VI Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad

MINISTERIO DE DEFENSA

VI Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad

Celebrado en la Academia de Caballería de Valladolid

Organiza

Isdefe

CATÁLOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES
https://cpage.mpr.gob.es

Edita:

MINISTERIO DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

© Autores y editor, 2019

NIPO: 083-19-230-5 (edición en línea)
Fecha de edición: febrero 2020
Maquetación: Ministerio de Defensa

https://publicaciones.defensa.gob.es/

Las opiniones emitidas en esta publicación son exclusiva responsabilidad del autor de la misma.
Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del © Copyright.

Índice

Prólogo 17

Introducción 19

Comité Organizador Permanente y Científico 21

Área 1- Armas y municiones 23

1A. Tecnologías de armas y municiones 25

Sistema avanzado de munición exploradora (AZOR) 27

Desarrollo del estopín a percusión PPE-76/62 para munición de 76 mm 37

Envejecimientos naturales y acelerados en los propulsantes de material compuesto 47

Integridad estructural de propulsantes sólidos 57

Desarrollo y validación de una nueva gama de propulsantes para mortero 67

Nanotecnología aplicada a la balística forense 77

1B. Capacidades tecnológicas de armas y municiones 85

Metodología de caracterización y simulación de sensores inerciales MEMS bajo aceleraciones elevadas 87

Área 11 - Sensores y Sistemas Electrónicos 97

2A. Tecnologías electrónicas 99

Electrónica impresa. Desarrollo de sensores flexibles y aplicación en el ámbito de defensa 101

SAAC, Sistema electrónico integrado de ayuda para la prevención de accidentes de tráfico en adelantamientos a ciclistas 111

Beamforming en comunicaciones tácticas 121

Sistema de navegación ISNAV para el VCR 8x8 131

Implementación en FPGA del algoritmo SIFT para la extracción de puntos característicos de imágenes VGA en tiempo real 141

Sistema de detección, clasificación, seguimiento y neutralización de UAS (Counter-UAS) 151

2B. Radar 161

Validación del modelo de cuatro niveles en el acoplo entre antenas de radar para el estudio de compatibilidad electromagnética 163

Sistemas radiantes en vehículos militares terrestres: caracterización y medidas electromagnéticas 171

RadioUAV: *«beyond-the-visible» applications with UAV* (aplicaciones «más allá de lo visible» con UAV) 181

Firma radar de vehículos aéreos no tripulados: revisión de datos publicados y tendencias actuales 191

Nuevo concepto de radares pasivos multiestáticos basados en LTE-R para vigilancia de líneas ferroviarias de alta velocidad 201

Validación de radares pasivos basados en la TDT para la detección de drones 211

Plataformas USRP para el desarrollo de radares pasivos de altas prestaciones reconfigurables 221

2C. Sensores y sistemas optrónicos 231

Investigación del efecto del tamaño de la fuente en equipos de termografía infrarroja y termómetros de radiación 233

Proyecto de mejora del telescopio TFRM en el marco de apoyo SST de la UE 241

Adquisición automática de blancos IR en entornos navales 251

LASERONUAV – Proyecto para desarrollo de microdiodo laser en 2,1 µm para sistema de contramedidas en RPAS 259

C90 (M3) reutilizable: diseño y desarrollo de un sistema lanzador reutilizable de bajo peso y funcionamiento mecano-eléctrico, compatible con los actuales proyectiles de la familia de desechables C90-CR (M3) 269

Sistemas embarcados de captura de datos 3D georreferenciados 279

Los láseres pulsados ultraintensos 289

Desarrollo de sistemas para aplicaciones LIDAR 299

Transceptores ópticos de alta velocidad para aplicaciones militares y aeroespaciales 309

Sistema de electrónica y control de cámara integrada estándar para microsatélites. Filosofía COTS 317

Análisis inteligente de vídeo para inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) 327

2D. Sensores y sistemas optrónicos 337

Desarrollo de un sistema integrado METOC/REA de apoyo a operaciones militares 339

Elaboración de una superficie de referencia hidrográfica en las aguas españolas. Aplicaciones cartográficas y en sistemas de información geográfica 349

Método de optimización de la respuesta en frecuencia de un canal acústico submarino 359

Valoración de una onda de sobrepresión según la norma MIL-STD-1474E mediante el software AHAAH (*Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans*) 369

Detección remota de la termoclina oceánica con sondadores monohaz 379

Estudio de las capacidades de vigilancia costera mediante el uso de plataformas autónomas colaborativas 389

2E. Guerra electrónica 399

Nuevas necesidades de los UAV para misiones en entornos contestados: D80 TITAN 401

Área III - Plataformas 411

3A. Energía 413

Aprovechamiento de bioaceite pirolítico de diversas procedencias como biocombustible y fabricación de bioexplosivos 415

Modelos de pronóstico de producción fotovoltaica para su aplicación en edificios de consumo de energía casi nulo en la Base Naval de Rota 423

Un nuevo concepto de foto-condensador 433

Sistemas energéticos compactos «HYCOGEN» basados en pilas de combustible, para aplicaciones portátiles en la defensa y la seguridad 439

Diseño y desarrollo de una microrred para la gestión y el almacenamiento de energía eléctrica de origen renovable 449

3B. Materiales 459

Evaluación de la integridad estructural en soldaduras de casco resistente de submarinos 461

Estudios de simulación y de campo de la influencia en la resistencia balística de acero tratado con poliurea 469

Evaluación del daño en muros de ladrillo con diferentes refuerzos a escala real tras una explosión 475

Simulación de muros de ladrillos y su resistencia ante explosiones cercanas 485

Compuestos con resinas epoxi y materiales de cambio de fase para almacenamiento térmico en aplicaciones militares 495

Determinación de la causa de rotura de un tubo de presión del control de combustible de un motor 505

Estudio de la rotura de un cabezal del actuador de compuerta de una aeronave 513

Influencia de la emisividad superficial en la determinación de la Tg mediante DMA 523

Caracterización mecánica de hidrogeles: ensayos e instrumentación 533

Medida de pequeñas deformaciones mediante efecto piezoresistivo. Aplicación en cohetes 543

Adhesivos estructurales en el sector defensa 551

Nanocomposites reforzados con grafeno y nanocerámicas de carburo de silicio para blindajes personales 561

Depósitos de combustible autosellantes, antiderrame y antiexplosión 571

Blindajes electromagnéticos: materiales compuestos a base de partículas de magnetita y matrices de caucho de nitrilo butadieno (NBR) 581

Mejora de las propiedades caloportadoras de lubricantes de uso militar basados en siliconas, mediante la adición de nanopartículas de grafeno 591

Caracterización térmica de estructuras aligeradas fabricadas mediante tecnologías FDM 621

Caracterización de materiales fabricados mediante tecnología FDM para aplicaciones de radiofrecuencia 631

Proyecto I+D CMB «protección balística: cálculo y aplicación de nuevos materiales en buques» 641

Aplicaciones de grafeno en defensa 647

3C. Bases e instalaciones 657

Proyecto de adecuación y modernización de la BAE Gabriel de Castilla 659

Interdependencia entre infraestructuras energéticas: evaluación de la robustez de las redes de gas y electricidad ante amenazas deliberadas 669

Auscultación de procesos activos sobre la ladera y la costa acantilada del entorno próximo a la Base Antártica española Gabriel de Castilla 679

Auscultación y cuantificación de la recesión y erosión en la costa acantilada del entorno próximo a la Base Antártica española Gabriel de Castilla 689

Nuevo «concepto contra sistemas aéreos no tripulados (C-UAS)» del JEMAD (2018) 699

Construcción de un puerto de circunstancias en Djibouti (Cuerno de África) 707

Guía básica para la protección de edificios frente a ataques terroristas 717

Uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la selección del emplazamiento óptimo de una base militar 725

Gestión de la generación y la demanda eléctrica en un campamento militar con OpenHAB 733

Diseño de infraestructura de telecomunicación para edificios de uso militar 743

Z-Damper 751

Avances y adecuación de dispositivos DDCE para la protección ante descargas eléctricas atmosféricas y pulsos electromagnéticos de infraestructuras y equipamiento en defensa 759

3D. Plataformas terrestres 769

Cooperación entre vehículos no tripulados (UGV-UAV) para misiones fuera de línea de vista 771

Validación y pruebas de vehículo de tracción eléctrica y rango extendido VAMTAC ST5 híbrido 781

Desarrollo de rodamientos *smart*, inalámbricos y autoalimentados 791

Sistema de misión de Indra para el VCR 8x8 801

3E. Plataformas navales 811

Buques inteligentes «sin tripulación»: adecuación de la normativa actual 813

Control de los tráficos marítimos de contenedores a través del análisis de datos 821

Sistema de mantenimiento predictivo y diagnóstico de anomalías para la propulsión naval: aplicación en motores diésel 2T 829

Diseño de un prototipo de USV como blanco naval de alta RCS 839

Sistema colaborativo multifuncional de vehículos híbridos no tripulados submarinos de alta autonomía y altas prestaciones, multimisión y basado en pilas de combustible (AUV SIROCO) 847

Herramienta de análisis de dotaciones para buques de la Armada 857

Caracterización del flujo aerodinámico sobre la cubierta de vuelo de una fragata 865

Sistema para la gestión de recursos embarcados y evacuación de un buque de guerra 873

Empleo de vehículos submarinos en la Armada: presente y futuro 883

Análisis de un enlace superconductor para plataformas navales 891

Efecto del posicionamiento de los anemómetros en una fragata 899

Efecto del viento en la pista de despegue del portaviones Juan Carlos I sobre las operaciones de aeronaves 909

Eficiencia energética en buques de guerra. Análisis de datos de consumo y posibilidades de reducción 919

Evolución del apoyo logístico en la Armada mediante tecnologías 4.0 929

La Industria 4.0 y los buques de guerra. Lecciones aprendidas y cómo mejorar el proceso de diseño 939

Análisis hidrodinámico experimental de la propulsión de buques de guerra 947

Flujo aerodinámico sobre el helicóptero en maniobra de aterrizaje sobre una fragata 955

Estimación de parámetros de un modelo de maniobra no lineal de un vehículo subacuático no tripulado: un enfoque de inferencia indirecta 965

3F. Plataformas aeroespaciales 973

RPAS y la extinción nocturna de incendios forestales: «Proyecto Nitrofirex» 975

El vuelo en formación de CubeSats y sus aplicaciones en Defensa 985

Sistemas de amortiguación avanzada en trenes de aterrizaje 995
Ignición de capas de mezcla supersónicas por onda de choque 1005
Las plataformas estratosféricas: desarrollos y capacidades de interés para la defensa 1015
Tecnologías de control y coordinación de enjambres de RPA 1025
Diseño y desarrollo de un RPAS categoría MALE para misiones de inteligencia, vigilancia, detección de blancos y reconocimiento 1035
Impacto de los sistemas electrónicos en los sistemas de distribución de potencia embarcados 1043
Milano: una visión futura para un UAS táctico 1051
ARION 2: el cohete lanzador español para pequeños satélites 1061
Empleo de naves no tripuladas (DRON/RPAS/UAV) en el entorno de la isla Decepción en el marco de la XXXI Campaña Antártica del Ejército de Tierra 1069
Caracterización experimental de la entrada en pérdida de superficies alares a baja velocidad 1079
Diseño y fabricación de una instalación experimental de bajo coste para el análisis de flujos en toberas convergentes-divergentes 1089
Tethered System 1099
Misiones y tecnologías de eliminación activa de desechos espaciales 1105
Aplicación de toma de decisiones multicriterio para evaluar técnicas de deflexión de asteroides en estudios de defensa planetaria 1115
ExoMars 2020: fabricación mediante tecnología FDM del cover de protección planetaria para ensayos de compatibilidad electromagnética del sensor AMR 1125
Área IV - Combatiente 1135
4A. Sistema combatiente 1137
Estudio experimental: «BHBT» producido por amenaza balística 1139
Desalinizadoras potabilizadoras autónomas de tamaño reducido 1149
Dispositivo ultraligero de evacuación de bajas en ambiente táctico e incidentes con múltiples víctimas 1159
Estudio e implementación de paneles fotovoltaicos en mochilas de logística para consumos de equipos auxiliares 1167

Modelización numérica de casco EOD ante impacto de fragmento 1177

4B. Factores humanos 1187

Ensayos de evacuación de un edificio con 200 soldados del Regimiento de Infantería América 66 1189

Eficacia de un entrenamiento interválico de alta intensidad como entrenamiento operativo específico 1197

Optimización de la cadena de suministro del Banco de Sangre y Tejidos de Aragón 1205

Efecto de la experiencia, equipamiento especial operativo y acciones de fuego en la respuesta psicofisiológica y memoria de soldados en operaciones subterráneas 1215

Análisis metrológico de los efectos biomecánicos y fisiológicos en la valoración de chalecos antibala 1223

Nueva metodología de selección de terapias acústicas para tratar el acúfeno mediante el análisis de señales de EEG 1241

La temperatura como indicador de confortabilidad en la valoración ergonómica de los casos de combate 1249

4C. Telemedicina 1259

Plataforma de monitorización biomédica para la monitorización de actividades subacuáticas 1261

Área V - NBQRe 1269

5A. Lucha contra IED 1271

Proyecto IEDDSE (*IED Detection Systems Effectiveness*) para la evaluación global de la eficacia de detección de IED 1273

Detección de materiales energéticos mediante una nariz electrónica basada en sensores MOx 1289

Simulación del efecto de ondas expansivas sobre estructuras porticadas 1299

5B. Defensa nuclear, radiológica, biológica y química (NRBQ) 1309

Evaluación de detectores de aerosoles biológicos en túnel de viento 1311

Biofuncionalización de superficies de nylon con anticuerpos anti-ricina para su uso en inmunobiosensores 1321

Bacillus anthracis: un nuevo método rápido de identificación molecular en muestras ambientales 1331

Metodología de cálculo de la huella hídrica gris (GWF) en una unidad del Ejército del Aire 1341

Dotación de antidotos NBQ y Fuerzas Armadas españolas 1347

Tecnología de narices electrónicas para la detección a distancia de sustancias peligrosas en el ámbito NRBQ 1357

Counterfog 1367

Área VI - C4I 1377

6A. Sistemas de información para C4I 1379

Modelo multidimensional de control de vida para todas las clases de material basado en una plataforma de *Business Intelligence* *1381*

Impacto de las tecnologías disruptivas en los futuros sistemas de mando y control para la defensa y la seguridad 1389

Control de sistemas de posicionamiento mediante BCI 1399

Extreme Learning Machine aplicado a sistemas BCI basados en imaginación de movimiento 1409

6B. Comunicaciones tácticas 1429

La evolución y estado actual de los proyectos piloto Galileo-PRS, a bordo del buque de investigación oceanográfica «Hespérides» 1431

Segmento radiocomunicaciones de la I3D 1441

Smallsats y constelaciones en órbita baja: aplicaciones para la defensa y seguridad 1449

Comunicaciones satelitales en UAV de pequeño tamaño 1459

GesCom VCR 8x8 1469

Diseño e implementación de un receptor de VLF para la detección de perturbaciones ionosféricas 1487

Alternativas de navegación, basada en radiofrecuencia, para RPAS en entornos de GNSS denegado 1495

Sistema de comunicación 3G/4G 1505

6C. Tecnologías para sistemas 1511
Enjambre heterogéneo de drones para defensa aérea 1513
Navegación inteligente para drones. Aplicación al aterrizaje autónomo en una plataforma móvil 1521
6D. Simulación para adiestramiento y CD&E 1541
PREDECIBLE - Sistema de analítica PREdictiva para DEfensa en el CIberespacio basada en escenarios reproducibles 1543
Técnicas avanzadas para el uso de la simulación en el apoyo a la toma de decisiones 1553
Simulación de bajo coste para el adiestramiento en el Ejército de Tierra 1563
6E. Aseguramiento de la información y las comunicaciones 1573
Implementación y validación de un cifrador de flujo en tiempo real basado en un *Skew Tent Map* *1575*
Técnicas de inteligencia artificial aplicadas al reconocimiento de personas a través de la marcha 1583
Desanonimización y categorización de servicios ocultos de la red Tor 1591
Ciberseguridad de sistemas autónomos basados en *software* abierto en el ámbito de la defensa 1601
Encriptación cuántica para comunicaciones seguras 1609
Detección de nodos críticos en redes mediante algoritmo metaheurístico GRASP para el problema de los separadores-α 1617
Área VII - Sociedad, economía y humanidades 1627
7A. Modelos socioeconómicos 1629
Análisis de las segregaciones horizontales y verticales por sexo en las Fuerzas Armadas en España 2009-2016 1631
Conectividad entre terrorismo y el rendimiento del mercado de acciones: el caso de España 1641
Productividad en mercados regulados: el caso de la industria española de defensa 1657
La visión de la RSC desde la óptica medioambiental en el Ejército del Aire 1667
El impacto socioeconómico de las unidades militares 1675

7B. Geografía, política y derecho 1685

La presencia de la Armada española en Guinea Ecuatorial (1778-1883) 1687

La ciberdefensa en el derecho de la guerra 1697

Operación Sophia: ¿una lucha contra el tráfico ilícito de migrantes o una causa de casos SOLAS? Posibles soluciones 1705

Cartografía de biomasa residual en masas de *Pinus halepensis* Miller en el entorno del CENAD «San Gregorio» mediante datos LiDAR-PNOA y trabajo de campo 1713

7C. Psicología y humanidades 1723

Estudio empírico de los estilos de pensamiento de los alumnos de la Academia General Militar 1725

La psicología al servicio del Estado 1733

Empleo del sistema de análisis de validez en la evaluación (Meta-protocolo SAVE) en el proceso de obtención de HUMINT en inteligencia militar 1741

Un enfoque cognitivo-conductual para la radicalización violenta. Más allá de las ideologías o creencias subyacentes 1751

Toma de decisiones bajo estrés y su relación con los niveles hormonales de cortisol en sangre 1761

Una propuesta de empleo para la toma de decisiones en el Ministerio de Defensa. *Analytic Hierarchy process* *1769*

Los efectos de la carga mental sobre la actividad electroencefalográfica: un estudio experimental con conductores de vehículos LMV 1777

Prólogo

Si la celebración de un congreso dedicado a poner en común los últimos avances en investigación, desarrollo e innovación es siempre una buena noticia, existen factores en torno a la celebración de la sexta edición del Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad (DESEi+d) que aumentan, si cabe, su relevancia.

Por un lado, la importancia de los retos a los que se enfrenta la sociedad en materia de defensa y seguridad, en un mundo cada vez más complejo e incierto, frente a los que la I+D+i puede aportar superioridad tecnológica, promoviendo a su vez el crecimiento económico y la creación de empleo del país.

Por otro, el creciente apoyo europeo a la I+D+i de aplicación a defensa, que sumado al que ya venía existiendo en el ámbito de la seguridad, complementa las posibilidades que a nivel nacional ofrece el Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación, ofreciendo nuevas vías para promover avances tecnológicos de aplicación a defensa y seguridad.

El DESEi+d es un congreso que aspira a crear un espacio de intercambio de conocimientos y avances, necesidades y oportunidades entre el conjunto heterogéneo de actores involucrados en la I+D+i de la defensa y seguridad de nuestro país (Fuerzas Armadas y Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, desarrolladores de tecnología y responsables de las políticas y la financiación de la I+D+i), propiciando las necesarias sinergias entre todos ellos para lograr que los esfuerzos en I+D+i lleguen en última instancia al mercado.

La creciente acogida que las cinco ediciones anteriores, en las que el número de asistentes ha crecido año tras año, supone un reconocimiento implícito a los fines perseguidos por esta iniciativa.

Por todo ello, no quisiera dejar de agradecer a todos los miembros de los Comités Organizador y Científico, a la Secretaría del DESEi+d 2018, albergada este año en la Unidad de Prospectiva y Estrategia Tecnológica de la DGAM y a los revisores de las comunicaciones, el gran esfuerzo y dedicación que han realizado durante los últimos meses, posibilitando que podamos disfrutar durante los tres días que dura el Congreso de un conjunto de ponencias y sesiones de gran riqueza e interés.

Por último, quiero agradecer también a la Academia de Caballería de Valladolid su hospitalidad al facilitar las instalaciones para la celebración del evento, agilizando de gran manera la posibilidad de exponer todas las comunicaciones recibidas y de albergar al gran número de personas inscritas.

Almirante D. Santiago Ramón González Gómez

Director general de Armamento y Material – Ministerio de Defensa

Introducción

En esta sexta edición del Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, se ha vuelto a consolidar el éxito de las ediciones anteriores, habiendo recibido también en torno a 250 comunicaciones. Las ponencias de las mismas se realizan en diferentes aulas en paralelo durante los tres días de celebración del Congreso. Este año el Congreso se celebra el 20, 21 y 22 de noviembre en la Academia de Caballería de Valladolid, que a diferencia de las anteriores ediciones, el primer día y el segundo constarán de sesiones de mañana y tarde y el tercer y último día tan solo de mañana, incrementado así el tiempo de las ponencias de los autores de las comunicaciones.

En este libro se exponen las comunicaciones presentadas y aprobadas por los revisores, agrupadas según las siete diferentes áreas temáticas del Congreso. Adicionalmente a estas presentaciones, tendrán lugar tres mesas plenarias, una cada día del Congreso en las cuales se abordarán las siguientes temáticas: *Coordinación nacional en torno al apoyo europeo a la industria de defensa y seguridad, Investigación de aplicación a defensa y seguridad y Sinergias entre las actuaciones públicas de I+D+i de aplicación a defensa y seguridad*.

El «Premio Isdefe I+D+i Antonio Torres» continúa, con su aportación económica, premiando a la mejor comunicación presentada al Congreso, incentivando de esta forma la calidad de las mismas.

General de división D. José Luis Murga Martínez

Subdirector General de Planificación, Tecnología e Innovación de la Dirección General de Armamento y Material- Ministerio de Defensa

Presidente del Comité Organizador Permanente del Congreso DESEi+d 2018

Comité Organizador Permanente y Científico

Comité Organizador Permanente

El Comité Organizador Permanente (COP) se constituye como el órgano rector del Congreso, responsable de su dirección y organización.

Presidente – GD. D. José Luis Murga Martínez (Subdirector SDGPLATIN)

- Vocal - CN D. Ramón Godín Magadán (DIGEREM)
- Vocal - D. José M.ª Pousada Carballo (CUD Marín)
- Vocal - D. Antonio Elipe Sánchez (CUD Zaragoza)
- Vocal - D. Nicolás Madrid García (CUD San Javier)
- Vocal - D. Natalio García Honduvilla (CUD Madrid)
- Vocal - D. Álvaro Manresa Sánchez (Isdefe)
- Secretario - Tcol. D. Juan Manuel González del Campo Martínez (SDGPLATIN)

Comité Científico

Su misión principal será coordinar la revisión, clasificación, análisis y evaluación de los artículos técnicos recibidos.

- Presidente - D. Natalio García Honduvilla (CUD Madrid)
- Secretario - Tcol. D. Juan Manuel González del Campo Martínez (SDGPLATIN)
- Vocal - Dña. Ángeles Dena Arto (CUD Zaragoza)
- Vocal - D. José M.ª Pousada Carballo (CUD Marín)
- Vocal - D. José Serna Serrano (CUD San Javier)
- Vocal - D. Daniel Mosquera Benítez (Isdefe)

Área I - Armas y municiones

I A. Tecnologías de armas y municiones

Sistema avanzado de munición exploradora (AZOR)

Gallego Esquinas, José Ángel [1,*], Fernández Muñoz, Jorge [1]

[1] everis Aeroespacial y Defensa. Av. Manoteras, 52. 28050 Madrid. Correo electrónico: Jose.Angel.Gallego.Esquinas@everis.com (JAG).

* Autor principal y responsable del trabajo; Jose.Angel.Gallego.Esquinas@everis.com (JAG).

Resumen

Los sistemas de munición exploradora o *Loitering Ammunitions*, basados en plataformas RPAS[1], constituyen una ventaja operativa muy interesante como munición guiada de alta precisión representando una alternativa eficaz a la munición guiada convencional. Sus ventajas operativas derivan fundamentalmente de la fusión de capacidades vigilancia y reconocimiento (ISR) y ataque.

El proyecto AZOR permitirá hacer frente a los principales retos tecnológicos de los sistemas avanzados de la munición exploradora; planteando su desarrollo en tres fases principales. Una primera fase orientada al desarrollo de las capacidades de navegación avanzadas basado en la navegación por visión para diferentes modos de vuelo: en ruta, merodeo, seguimiento autónomo de blancos y guiado terminal por punto de mira, manteniendo en todo momento enlace de vídeo en *real-time* y sin dependencias de señal GNSS[2]. La segunda fase del proyecto afrontará el desarrollo de una plataforma aérea de acuerdo a los requisitos de las operaciones expresados por el usuario final, así como el desarrollo del sistema lanzador y la GCS[3] con un *software* específico de control de misión. Finalmente, la tercera fase abordará el desarrollo de las capacidades propias de ataque de estos sistemas mediante el diseño, fabricación e integración de diferentes cabezas de guerra.

Como resultado del proyecto se obtendrá un sistema de munición exploradora dotado de capacidades avanzadas de navegación basada en visión y robusto a ambientes de GNSS[2] degradado o denegados, permitiendo dotar a las Fuerzas Armadas españolas de una ventaja táctica y operativa eficaz en materia de inteligencia y munición guiada de precisión para operaciones BLOS/NLOS[4] a través de sistemas de munición exploradora plenamente operativos de fabricación nacional.

Palabras clave

Loitering Ammunition, munición exploradora, munición inteligente, navegación por visión, munición recuperable, GNSS degradado o denegado.

---

1 RPAS: Remotely Piloted Aircraft Systems.
2 GNSS: Global Navigation Satellite System.
3 GCS: Ground Control Station.
4 BLOS: Beyond Line Of Sight / NLOS: Non Line of Sight.

1. Introducción

Los sistemas de munición exploradora o *Loitering Ammunition* representa un nuevo concepto de munición portable que permite dotar a las unidades sobre el terreno, generalmente infantería o artillería, de munición guiada de alta precisión caracterizada por su rápido despliegue y una alta flexibilidad operacional [1]. Estos sistemas se encuentran a mitad de camino entre los RPAS *(Remotely Piloted Aircraft System)* y la munición guiada de alta precisión, capaces de ser desplegados con rapidez en el teatro de operaciones, ajustando su fase de vuelo para satisfacer diferentes misiones sobre el objetivo.

Los sistemas de munición exploradora dotan a sus usuarios finales de una gran variedad de posibilidades operativas derivadas principalmente de la fusión de las capacidades ISR *(Intelligence, Surveillance and Reconnaissance)* y ataque [2]. Estos sistemas ofrecen la posibilidad de merodear durante un largo periodo de tiempo sobre un área de interés y llevar a cabo un guiado terminal por punto de mira de gran precisión, permitiendo: reducción de daños colaterales; optimización de efectos; misiones múltiples/enjambre; capacidades no letales; sistemas con baja huella radar, sonora y visual; evaluación de efectos tras la ejecución de una acción de combate *(Battle Damage Assessment)*; munición recuperable; reducción de costes; etc., lo cual afianza su posicionamiento como una alternativa real a los sistemas de municiones tradicionales basados en morteros o cohetes, y de coste reducido frente a las municiones con capacidad de guidado terminal SAL (*Semi-Active Laser*).

El alcance, la cabeza de guerra y la autonomía de vuelo caracterizan los sistemas munición exploradora. De este modo, en función del tipo de operación para el que haya sido diseñado el sistema, se buscará la solución de compromiso óptima que ofrezca a la plataforma aérea en cuanto a su capacidad letal, rango de operación y tiempo de merodeo. En este contexto se ha elaborado una primera clasificación de los sistemas de munición exploradora en función de sus capacidades operativas:

Small	Rango	< 10km	Permite cubrir necesidades operativas propias de tropas en contacto o unidades de operaciones especiales. Requerimientos importantes a nivel de puesta en operación y rápida configuración de misión para acciones BLOS.
	Autonomía	< 1h	
	MTOW[5]	< 5kg	
	Cabeza de guerra	< 1kg	
Medium	Rango	10km – 70km	Permite cubrir necesidades operativas BLOS/NLOS como una capacidad más de fuego indirecto. Se caracterizan por tener una gran precisión, muy baja huella radar/sonora/visual y una carga bélica limitada; minimizando los daños colaterales.
	Autonomía	1h – 3h	
	MTOW	5kg – 25kg	
	Cabeza de guerra	1kg – 3kg	
Large	Rango	> 70km	Permite cubrir necesidades operativas BLOS/NLOS como una capacidad más de fuego indirecto. Se caracterizan por tener una gran precisión y una carga bélica relevante, optimizando efectos gracias a su gran capacidad de fuego y precisión.
	Autonomía	> 3h	
	MTOW	> 25kg	
	Cabeza de guerra	> 3kg	

Tabla 1. Clasificación de los sistemas de munición exploradora

5 MTOW: *Maximum takeoff weight*

Tras la experiencia favorable en el empleo de estos sistemas en escenarios operativos reales, cada vez son más países los que cuentan, o tratan de adquirir las capacidades propias de los sistemas de munición exploradora.

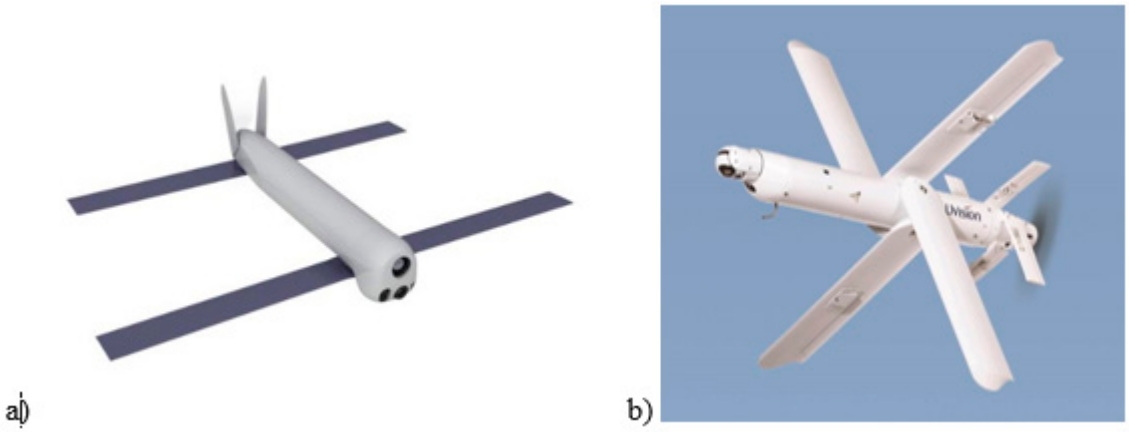


Figura 1. Ejemplos de sistemas de munición exploradora:
a) SWITCHBLADE (AeroVironment, USA); b) Hero-30 (UVision, Israel).

Gran parte de los desarrollos actuales en materia de munición exploradora se basan en la estimación de su posición a través de la señal GNSS *(Global Navigation Satellite System)* recibida o bien son pilotados remotamente sin una aviónica que asista a la navegación. Estas señales pueden verse sometidas a interferencia tanto intencionada como no intencionada. La interferencia intencionada de la señal GNSS ha surgido como una gran preocupación para los usuarios finales de los sistemas de munición exploradora, debido a la disponibilidad y fácil acceso a la tecnología de bloqueo de señal GNSS en el mercado *(Jamming* o *Spoofing)*.

1.1. Objetivo del proyecto

El objetivo principal del proyecto AZOR es el desarrollo de un sistema de munición exploradora completo, con capacidades avanzadas de navegación en ambientes GNSS degradado o denegado, permitiendo dotar a las Fuerzas Armadas españolas de una ventaja táctica y operativa eficaz en materia de inteligencia y munición guiada de precisión para operaciones BLOS/NLOS (*Beyond Line Of Sight / Non Line Of Sight*) a través de munición exploradora plenamente operativa de fabricación nacional.

Este proyecto se asienta en las capacidades y experiencias adquiridas por everis Aeroespacial y Defensa a lo largo de la ejecución de numerosos proyectos en el ámbito I+D como MIURA (kit de guiado de precisión para cohetes), TUCAN (mini RPA multipropósito con capacidad avanzada ISR), SCARB III (avión blanco de altas prestaciones) o ALAKRAN (portamorteros embarcado). En todos ellos, se ha puesto en valor la experiencia y conocimientos en sistemas de guiado, navegación y control (GNC); diseño, fabricación y operación de RPAS; diseño de *hardware* específico para aplicaciones de defensa; simulación de sistemas *(Software in the loop, Processor in the loop, Hardware in the loop)*; análisis estructural y dinámica de fluidos; sistemas de armas y sistemas avanzados para la defensa.

1.2. Retos tecnológicos del proyecto

A continuación se recogen los principales retos tecnológicos afrontados a lo largo del proyecto AZOR, actualmente en curso y que permitirá el desarrollo de un sistema de munición exploradora o *Loitering Ammunition* de altas prestaciones:

1. Navegación por visión en exteriores: desarrollar una navegación robusta que permita adquirir y hacer seguimiento de objetivos de forma automática, así como un guiado terminal óptimo a través de los

sensores optrónicos e inerciales embarcados entre otros que permita abatir blancos tanto fijos como móviles.

2. Navegación en entorno GNSS degradado o denegado: se trata de una necesidad creciente en los escenarios operativos de los sistemas de munición exploradora debido al auge de las tecnologías *Jamming* y *Spoofing* para la interferencia intencionada de la señal GNSS recibida por estos sistemas.
3. Estrategias de guiado terminal singulares: implementar diferentes estrategias en función del ángulo de ataque para optimizar los efectos de la acción de fuego.
4. Securización de comunicaciones: para este tipo de sistemas es crítico disponer de enlaces robustos y seguros a través de comunicaciones encriptadas y la implementación de contramedidas ante amenazas de inhibición y *Jamming*.
5. Enlace vídeo en tiempo real: garantizar y securizar enlace de vídeo en tiempo real a lo largo de todo el rango de operación del sistema para garantizar su efectividad y funcionalidad *man-on-the-loop.*
6. Diferentes mecanismos de armado y detonación: implementar diferentes soluciones de armado y detonación para maximizar los efectos, combinando detonaciones por proximidad, impacto o retardadas, permitiendo su selección y comando en vuelo una vez que se arma el sistema y se configura la fase terminal.
7. Sistema de recuperación segura: para misiones en que no se ejecute una fase terminal o habiéndose lanzado, se haya abortado, es imprescindible implementar un procedimiento de desarmado de la cabeza de guerra, con un sistema de verificación al menos triple redundado que garantice la seguridad física en su recuperación.
8. Lanzador encapsulado: para maximizar las posibilidades de estos sistemas, es necesario reducir al máximo su huella logística. Con soluciones tipo «*man-portable»* con pequeño tubo lanzador para sistemas pequeños, o tipo «*lanzador embarcable*» en vehículos de alta movilidad para sistemas medios.
9. Caracterización del aborto de misión (*wave-off*): la capacidad de abortar misión es una de las principales ventajas frente a la munición guiada convencional, siendo imprescindible caracterizar el punto de no retorno en función de las capacidades de la plataforma aérea y manteniendo la funcionalidad *man-on-the-loop.*
10. Implementación de maniobras evasivas, contramedidas y soluciones *detect&avoid*: una vez desplegado en un teatro de operaciones, debe tener capacidades propias para detectar y evitar, identificando amenazas además de obstáculos y ejecutando maniobras evasivas en vuelo.
11. Misiones múltiples/enjambre: implementación de maniobras cooperativas entre diferentes sistemas en vuelo, o híbridas con otros sistemas autónomos, operando en modo colaborativo, ampliando considerablemente las posibilidades de estos sistemas en cuanto a los diferentes tipos de misión que podrían abordar.
12. Integración ALI / ILS[6]: definición de procesos y procedimientos asociados al apoyo logístico integrado para la correcta operación y mantenimiento del sistema.
13. Optimización de costes: una vez definidos los requerimientos operativos de cada sistema, es imprescindible alcanzar la solución de compromiso que alcance dichos requerimientos con el menor coste posible, teniendo en cuenta que se trata de un sistema «desechable», aunque sea factible recuperarlo y volver a operar

2. Desarrollo

El proyecto AZOR está dividido en tres fases de desarrollo principales. En la primera fase, actualmente en ejecución, tiene como objetivo el desarrollo de la capacidad de navegación por visión en ambientes GNSS degradado o denegado. La segunda fase del proyecto abordará el desarrollo de una plataforma aérea de munición exploradora atendiendo a las necesidades operativas expresadas por los usuarios finales de las Fuerzas Armadas españolas (FAS). En esta fase también se abordará el desarrollo del sistema lanzador encapsulado, así como la estación de control terrestre (GCS) con un *software* específico

de control de misión. La tercera fase del proyecto tiene como objetivo dotar al sistema de la capacidad de ataque, abordando la integración de diferentes cabezas de guerra y espoletas para ofrecer un amplio abanico de posibilidades en función de la misión.

2.1. Fase 1: Navegación por visión

Los sistemas avanzados de munición exploradora deben garantizar su correcta operación en diferentes escenarios bélicos. En muchas de las misiones en las que se ven involucrados estos sistemas es esencial que tengan la capacidad de vuelo autónomo con independencia de la señal GNSS recibida, garantizando la navegación en ruta hasta el objetivo (1), siendo capaz de hacer merodeo sobre un área de interés (2) y seguimiento autónomo sobre los objetivos identificados por la misión (3), así como emprender un guiado terminal con capacidad *wave-off (4)*. Todo ello en entornos GNSS degradado o denegado y manteniendo en todo momento el enlace de vídeo en tiempo real que garantice el *man-on-the-loop* para el control de la plataforma tras su lanzamiento, a pesar del grado de autonomía otorgado en las diferentes fases de vuelo planteadas.

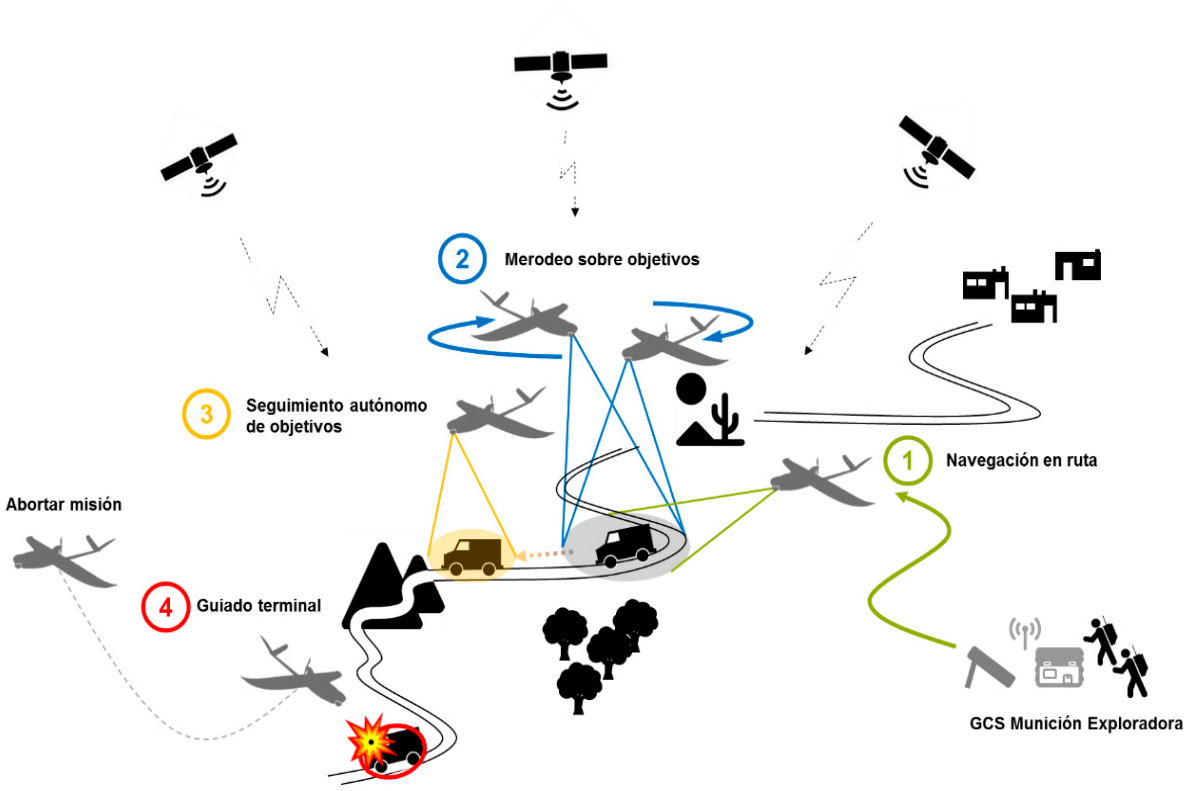


Figura 2. Escenario de operación sistemas avanzados de munición exploradora.

La estimación robusta, la solución de navegación y el estado de la plataforma de munición exploradora (posición, altura, velocidad y aceleraciones) es crítica en el vuelo de los sistemas autónomos debido principalmente a la propia dinámica de los sistemas. La información capturada por los diferentes sensores (GNSS, IMU, magnetómetro, barómetro, altímetro y sensor EO/IR) se recoge bajo un módulo que optimiza la fusión de sensores de la unidad de procesamiento embarcada. Desde el punto de vista de navegación por visión se han analizado diferentes alternativas para su desarrollo.

1. Odometría visual para vuelo autónomo.
2. Estereoscopia para posicionamiento exacto (solución actualmente orientada a la navegación en interiores).

3. Estimación de posición según la variación del horizonte.
4. Comparación de imágenes capturadas por el sensor EO/IR con una base de datos de imágenes georreferenciadas.

El módulo de fusión de sensores ha sido concebido con una arquitectura completamente modular con suficiente capacidad de proceso para aplicar técnicas de inteligencia artificial [3]. Esto quiere decir que el nivel de codificación y de desviación matemática en los cálculos debido a la adición o supresión de sensores es mínima [4]. A través de redes neuronales y algoritmos avanzados de *Deep Learning*, el módulo de fusión de sensores garantiza la obtención de información robusta del estado de la plataforma aérea, permitiendo la operación eficaz del sistema en ambientes de GNSS degradado o denegado.

La unidad de procesamiento embarcada garantiza el procesado en *real-time* de la información recogida por los diferentes sensores. A través del enlace de vídeo y RF se envía toda la información recogida a la estación de control terrestre (GCS), permitiendo a los operadores la toma de decisiones, manteniendo en todo momento la funcionalidad *man-on-the-loop* del sistema durante las diferentes fases de vuelo.

2.2. Fase II: Desarrollo de la plataforma aérea y lanzador

Teniendo en cuenta los escenarios operativos actuales y teatros de operaciones que se pueden presentar con escenarios bélicos asimétricos no convencionales; es fundamental garantizar la seguridad y efectividad de estos sistemas reduciendo la causalidad y daños colaterales. El desarrollo de una nueva plataforma aérea tiene como objetivo atender los requisitos operacionales expresados por las FAS maximizando las capacidades de rango de acción, autonomía de vuelo y carga de pago característicos de estos sistemas. Esta fase aún está pendiente de abordar en el marco del proyecto.

Para sistemas de munición exploradora categorizados como *Medium* o *Large,* se suele recurrir a sistemas de lanzamiento complejos basados en contenedores o catapultas instaladas en vehículos. Mientras que los sistemas de lanzamiento de munición exploradora de categoría *Small* deben basarse en la simplicidad y rápido despliegue ya sea mediante lanzadores de reducidas dimensiones (tubos lanzadores encapsulados) o plataformas capaces de ser lanzadas a mano por sus operadores, garantizando la capacidad *man-portable* de estos sistemas.

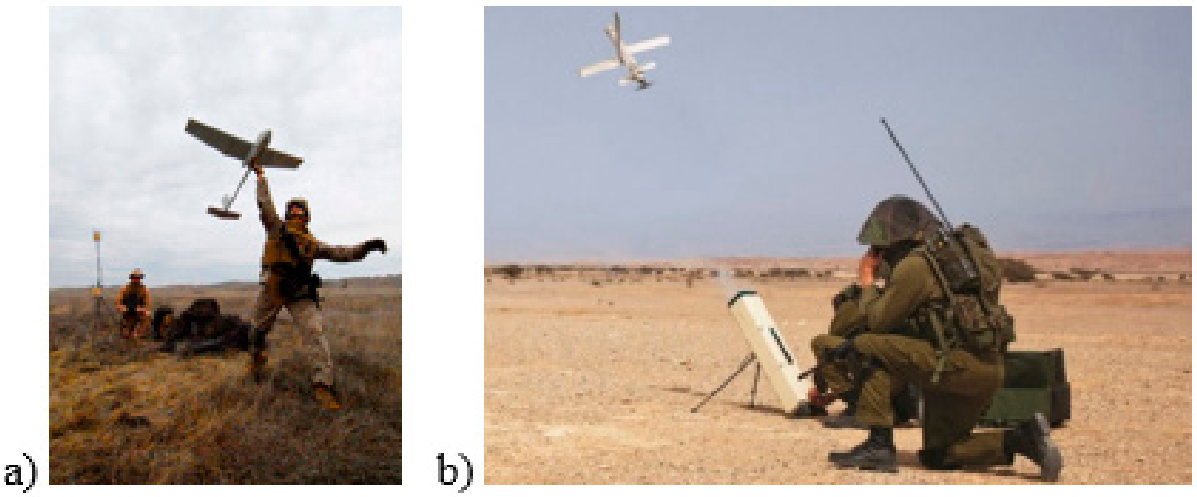


Figura 3. Lanzamiento de munición exploradora categoría Small: a) Lanzamiento a mano; b) Lanzamiento mediante tubo neumático encapsulado.

En una primera aproximación a la segunda fase del proyecto AZOR se plantea el desarrollo de una plataforma de munición exploradora categoría *Small,* con una estructura modular y compacta con capacidad de ser lanzada tanto a mano como mediante un tubo lanzador encapsulado dependiendo de la misión.

Por otra parte, cabe destacar el desarrollo de una estación de control en tierra (GCS) portátil y rugerizada que permita su rápido despliegue y configuración de misión. El *software* de la estación de tierra cumplirá las funciones de planificación, monitoreo y control de misión a partir de la información enviada por la plataforma aérea, permitiendo al operador la toma de decisiones y asumir el control sobre la aeronave en todo momento, manteniendo por tanto la funcionalidad *man-on-the-loop.*

2.3. Fase III: Capacidad de ataque

El desarrollo de esta fase del proyecto (que aún está pendiente de ejecutar) tiene como objetivo dotar al sistema de munición exploradora de una de sus funcionalidades principales, la capacidad de ataque sobre un objetivo designado. Durante la fase de ataque, el control de la plataforma de munición exploradora será semi-autónomo, manteniendo la funcionalidad *man-on-the-loop* en todo momento hasta el punto de no retorno, que también ha de ser caracterizado. El sistema electro-óptico embarcado en la plataforma aérea transmitirá en *real-time* la señal de vídeo capturada a la GCS permitiendo al operador dirigir la plataforma aérea hacia el objetivo identificado.

En esta fase del proyecto se abordará el desarrollo de diferentes cabezas de guerra, fácilmente intercambiables e integradas en la plataforma aérea, que se ajusten a los objetivos específicos de cada misión. Entre ellas, una cabeza de guerra sin capacidad de armado para su uso en operaciones de entrenamiento. A la hora de desarrollar la capacidad de ataque de los sistemas de munición exploradora es esencial garantizar su seguridad y estabilidad hasta el momento de su operación. En esta fase del proyecto también se abordarán el desarrollo de la espoleta, el módulo de armado, desarmado y detonación que garantice la seguridad de la cabeza de guerra mediante diferentes niveles de seguridad e implementando el modo de recuperación del sistema tras un aborto de misión.

3. Resultados y discusión

El proyecto AZOR se encuentra actualmente en ejecución de su primera fase: desarrollo de la capacidad de navegación por visión para dotar al sistema de munición exploradora de una mayor autonomía de la señal GNSS recibida. Las primeras campañas de vuelo están planificadas para finales del segundo trimestre de 2019. En ellas, se integrará la sensórica seleccionada junto a la unidad de procesamiento embarcada en la plataforma RPAS TUCAN, ya en operación por la Fuerzas Armadas españolas para labores de vigilancia.

Con el objetivo de justificar el desarrollo de la navegación por visión, se han realizado unas primeras pruebas experimentales de los resultados obtenidos en el posicionamiento de diferentes plataformas con señal la GNSS denegada. Para ello, se ha equipado una plataforma terrestre con un terminal SOTM (*Satellite Communications On The Move)* en Banda X. Se trata de un terminal capaz de transmitir y recibir dos portadoras tanto de forma simultanea como de forma independiente, basando su apuntamiento en la fusión de los datos obtenidos a partir de la unidad de navegación inercial INS (IMU-MEMS y DGPS a 1kHz) y de la señal de un receptor de baliza.

A la vista de los resultados, se pone de manifiesto la creciente necesidad de avanzar en el desarrollo de las capacidades propias de navegación por visión en los sistemas de munición exploradora permitiendo aprovechar las capacidad de la sensórica electro-óptica e infrarroja embarcada, reduciendo el error de posicionamiento absoluto de la plataforma así como el coste final del sistema frente a aquellas soluciones que embarcan INS de grado táctico o de navegación de mejores prestaciones.

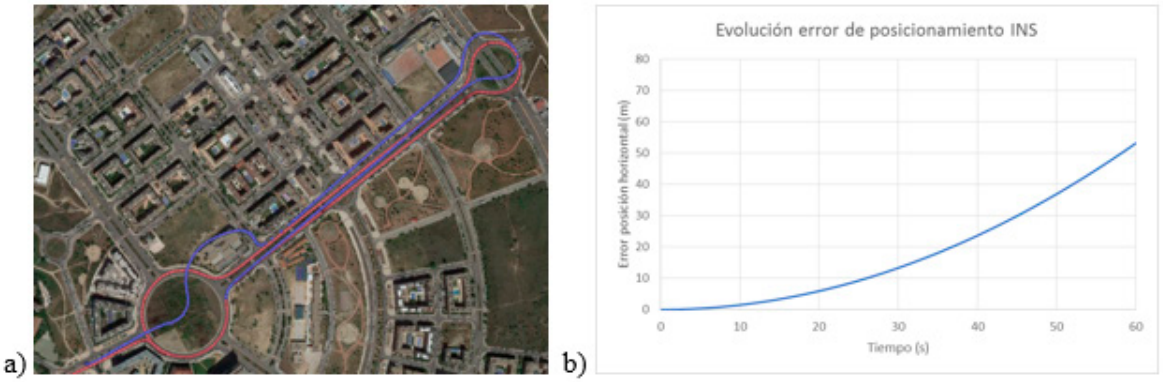


Figura 4. a) Posicionamiento GNSS (rojo) vs. INS (azul); b) Evolución error posicionamiento INS. a), puede observarse el posicionamiento de la plataforma obtenido con la señal GNSS permitida (rojo). Error de posicionamiento GNSS frente a la trayectoria marcada es de 3 metros de media. En una segunda pasada se anuló la señal GNSS, por lo que el posicionamiento de la plataforma se realizó a partir de los datos obtenidos con el INS (azul). Como se puede observar en lafigura 4 b), a medida que trascurre la prueba, error de posicionamiento acumulado por el INS aumenta significativamente, alcanzando los 50 metros en el segundo 58 de la prueba.

4. Conclusiones

Los sistemas avanzados de munición exploradora o *Loitering Ammunition* son una alternativa real a los sistemas de munición tradicional basados en morteros o cohetes y de coste significativamente reducido frente a los sistemas con guiado terminal SAL. El desarrollo de la capacidad de navegación por visión permite aprovechar las capacidades propias de los sensores EO/IR embarcados por estos sistemas, reduciendo significativamente su coste y dotándoles de una navegación robusta y fiable con independencia de la señal GNSS recibida. Por ello, es fundamental avanzar en la investigación y desarrollo de técnicas de navegación por visión en exteriores, que junto a los desarrollos propios de la plataforma aérea, sistema lanzador, GCS y capacidad de ataque, permita dotar a las FAS de un sistema de munición exploradora de fabricación nacional plenamente operativo, incluso en ambientes GNSS degradado o denegado.

Referencias

1. *Gettinger D, Holland Michel A. Loitering Munitions. Center for the Study of the Drone.; 2017.*
2. *i-deals. Robotics in the field of Defence and Security. everis Aeroespacial y Defensa S.L.U.; 2017.*
3. *i-deals. Artificial Intelligence and its applications in Aerospace & Defence. everis Aeroespacial y Defensa S.L.U.; 2018.*
4. *Kumar RV, Shen S, Michael N, Mohta K. Multi-sensor fusion for robust autonomous flight in indoor and outdoor environments with a rotorcraft micro-aerial vehicle (MAV). University of Pennsylvania; 2017.*

Desarrollo del estopín a percusión PPE-76/62 para munición de 76 mm

Cobo Curiel, Ángel [1,*] y Monasterio Peiteado, Zaira [2]

[1] Expal Systems, Avda. del Partenón, 16, 28042 Madrid. acobo@expal.biz: (AC).

[2] Expal Systems, Avda. del Partenón, 16, 28042 Madrid. zmonasterio@expal.biz: (ZM).

Email:

* Autor principal y responsable del trabajo; acobo@expal.biz: (AC).

Resumen

Durante varias décadas, la RTAM 1.306 REV. 2 ha establecido el uso de estopines tipo TR 54/63 para munición 76/62. Con el objetivo de desarrollar un diseño propio y una mejora en la calidad del producto y prestaciones, Expal ha desarrollado el estopín PPE-76/62. El diseño del mismo y la verificación de su funcionamiento ha sido realizada durante los últimos años con excelentes resultados para pólvoras tipo GSB 122 y GSB 122 ECO (simple base). Además, este estopín ha pasado todas las pruebas de la RTAM 1.306 REV. 2 con éxito y ha sido incluido en la nueva edición 3 [1], al igual que ha sido probado con éxito en cañones tipo Super Rapid Oto Melara de 76 mm.

Los cambios de diseño se han llevado a cabo en las zonas de montaje y percusión de la cabeza del estopín. Este diseño mantiene las características funcionales de su antecesor, al igual que el sistema de diseño del tubo recámara, garantizando el funcionamiento de las cargas de propulsión y prestaciones tanto anteriores como las actuales que Expal ha desarrollado en su versión ECO.

Este desarrollo da un paso más hacia la mejora de productos convencionales. En los próximos años se espera aplicar esta metodología de desarrollo a estopines de distinto calibre, para el desarrollo de diferentes líneas de productos de tipo insensible que le permita a EXPAL conseguir unas mejores prestaciones, mantener el liderazgo en munición convencional con alto valor añadido y un incremento de la calidad de los productos fabricados.

Palabras clave

Estopín a percusión, estopín PPE-76/62, munición 76 mm.

1. Introducción

El cañón naval Oto Melara de 76 mm, es un cañón ampliamente utilizado por marinas de todo el mundo. En su variante Super Rapid se ha mejorado su cadencia de tiro (120 d.p.m.) convirtiéndolo en un arma muy versátil, capaz incluso, de defensa de punto antimisil [2]. –

El suministro de estopines para disparo de 76 mm que se realiza para la Armada española emplea entre otros, estopines tipo TR 54/63, el cual sigue las pautas de diseño y requisitos de calidad establecidos en la RTAM 1.306 REV. 2 [1]. Esta norma, en edición 2, data del año 1990 y se basa en un diseño completo de estopín donde se incluyen los componentes hasta la cápsula iniciadora.

Durante estos años, Expal ha estado fabricando este tipo de estopines, pero con el transcurso de los años y los avances tecnológicos, de suministro y de procesos, se consideró un rediseño de este producto centrado en la seguridad y percusión de la cápsula que contiene el estopín TR 54/63.

El nuevo diseño desarrollado por Expal, PPE-76/62, consta de una cabeza a percusión con un mecanismo de seguridad a la percusión, en cuyo interior se aloja una cápsula iniciadora que cumple con normativa MIL, la cual es iniciada cuando el percutor incide sobre ella con una energía mínima determinada. Una vez iniciada, esta transmite la iniciación a un tubo-recámara repleto de pólvora negra, la cual entra en combustión [3][4]. Durante los últimos 2 años, el prototipo PPE-76/62 ha sido desarrollado, fabricado y validado por Expal, superando todas las pruebas definidas según la RTAM 1.306 REV. 2, pasando a ser un producto definitivo tras la primera fabricación en serie del mismo en las instalaciones de Expal.

2. Desarrollo

Para el desarrollo de este estopín se parte de las siguientes premisas:

- Seguro en el montaje, así como en la manipulación.
- Cumplimiento de los requisitos indicados en la RTAM 1.306 REV. 2.
- Sustitución de la cápsula del estopín TR 54/63 por una cápsula que disponga de normativa MIL.
- Optimización de la producción: disminución de las etapas de montaje y mejora de la calidad.
- Evaluación de nuevos proveedores garantizando la calidad de los suministros.

2.1. Diseño, viabilidad y fabricación de prototipos

Sobre su diseño funcional y requisitos técnicos, se persigue que el nuevo desarrollo mantenga las características de los estopines a percusión para disparo de 76 mm: sensibilidad de funcionamiento de 0,259 kg·m (2,54 J) y de no funcionamiento de 0,068 kg·m (0,68 J), rango de temperatura de 65 ºC a -46 ºC y capaz de soportar los esfuerzos generados en el arma para el montaje del disparo. Además de mantener su funcionalidad en disparo naval Oto Melara de 76 mm y ser capaz de funcionar a altas cadencias de tiro (120 d.p.m.).

Además de ello, las siguientes características físicas serán impuestas para así mantener su intercambiabilidad con el estopín TR 54/63: peso inferior a 200 g, peso de pólvora clase 3 mínimo de 18 g, longitud aproximada de 251,4 mm, diámetro aproximado de la cabeza de 20,4 mm y diámetro máximo del tubo de 15 mm.

Una vez realizado un diseño preliminar se evalúan una serie de proveedores, que serán los encargados de suministrar cada una de las partes: cápsula, cabeza estopín, sistema de percusión y tubo.

Figura 1. Estopín PPE-76/62, diseño y evaluación.

Una vez definidas las partes y propiedades que ha de cumplir el estopín PPE-76/62, se procede a definir sus etapas de montaje y ensamblado, para posteriormente, llevar a cabo la evaluación de los requisitos. Se plantea una metodología de trabajo de montaje en base a una filosofía tipo *lean manufacturing*, o fabricación ajustada, donde se busca una calidad total de cada una de las etapas del proceso y una gestión de tiempo de fabricación óptima. Por ello todo el proceso de montaje y prototipos iniciales se graba en vídeo y se visualiza juntamente con el equipo de trabajo y encargados de producción para aportar cada uno de ellos su visión del proceso, la reducción de posibles inconvenientes de fabricación y la colocación de autocontroles durante el proceso de fabricación de este estopín.

2.2. Pruebas de aceptación de producto según RTAM 1.306

Con objeto de diseñar y calificar el estopín según la RTAM 1.306 REV. 2, tanto las partes internas del estopín como el sistema completo, deberán de cumplir con los criterios de aceptación indicados en ella. Destacar, que, durante el desarrollo del estopín se realizan muchas más pruebas entre ellas pruebas parciales para ajuste y verificación de componentes y funcionamientos y se repiten las que se han considerado más críticas, tales como las que afectan a la seguridad del sistema.

Las pruebas y criterios de aceptación descritas en la RTAM 1.306 REV. 2, se muestran resumidas a continuación.

2.2.1. Prueba de sensibilidad y seguridad de la cápsula iniciadora

El estopín TR 54/63 contiene una cápsula fulminante cuyos requisitos técnicos son de sensibilidad de funcionamiento y de no funcionamiento a una determinada energía en función de una función estadística.

Sin embargo, el estopín PPE-76/62, contiene una cápsula fulminante que cumple con los requisitos de funcionamiento y estadístico establecidos en la norma MIL vigente y aplicable y de un suministrador, siendo mucho más exigente.

2.2.2. Prueba de rotura de cizallable

La prueba expone que el estopín debe tener un cizallable de seguridad que debe soportar al menos una determinada carga estática.

2.2.3. Prueba de sensibilidad y seguridad del conjunto cabeza estopín

La prueba se lleva a cabo sobre la cabeza estopín con su cizallable la cual debe mostrar a una determinada energía un siempre funcionamiento (2,54 J) y un no funcionamiento (0,68 J).

2.2.4. Prueba de caída de 8 m del conjunto cabeza estopín

La prueba se lleva a cabo alojando una cabeza de estopín en un martinete de 20 kg y dejándolo caer desde una altura de 8 m. Con el requisito de que cada cabeza de estopín aguante 3 caídas sin que se produzca su iniciación.

2.2.5. Prueba de funcionamiento en estático del estopín completo

Todos los estopines funcionarán tras ser percutidos con una energía de 0,259 kg·m (las dimensiones y características de este percutor vienen definidas por el tipo de cápsula).

2.2.6. Estopín completo pruebas de seguridad: traqueteo, vibración y caída 7 metros

Con objeto de simular el movimiento que sufriría el estopín durante su transporte y los esfuerzos que sufriría durante el disparo en un cañón tipo Super Rapid, se lleva a cabo la prueba de traqueteo y vibración, tal y como se describe en la RTAM 1.306. Estas pruebas serán consecutivas y realizadas con los mismos estopines: inicialmente traqueteo, posteriormente vibración y finalmente caída 7 metros.

Los criterios de aceptación son comunes para las tres pruebas, no deberán observarse cedimientos de las partes del estopín, funcionamiento de alguno de ellos y tampoco salidas del material (pólvora) al exterior, el estopín se mantendrá integro.

Prueba de traqueteo: 120 golpes por minuto con una amplitud de desplazamiento de 20 mm en un útil adaptado para ello durante una hora por cada eje, y en sus tres ejes.

Prueba de vibración: con una frecuencia de 800 a 3.000 ciclos por minuto, con incrementos sucesivos de 200 ciclos por minuto y una duración de 20 minutos por cada incremento durante 12 horas, cuatro horas de duración en cada eje (horizontalmente, verticalmente con el tubo arriba, y verticalmente con el tubo abajo). La amplitud vertical de la vibración deberá ser regulada 0,762±0,05 mm a 0,228±0,025 mm, según la frecuencia de la vibración.

Prueba de caída 7 metros: el estopín alojado en un martinete de 20 kg se dejará caer desde una altura de 7 metros.

2.2.7. Prueba de tiro

Una muestra de estopines, por un lado, estopines previamente traqueteados y vibrados, y por otro lado, estopines que no han sido sometidos a pruebas previas, serán sometidos a las pruebas de tiro, utilizando un cañón de calibre de 76/62. Esta prueba se llevará a cabo con una carga que proporcione una presión menor a 3.350 kg/cm^2 y mayor que 2.950 kg/cm^2, además de ello, los disparos serán atemperados a 23±3 ºC.

Los requisitos para la aceptación de la prueba de disparo 76/62 para balística externa es de 907±7 m/s y para balística interna una presión de 385±5 KPas a temperatura ambiente (23±3 ºC) para las cargas de proyección ya evaluadas.

2.3. Pruebas de validación del estopín PPE-76/62 adicionales

Adicionales a las pruebas indicadas en la RTAM se llevan a cabo otras pruebas complementarias:

- Caída en manipulación de 1,5 m, que garantizará la seguridad del estopín en manipulación.
- Prueba de no funcionamiento al estopín completo, que añade una prueba adicional de seguridad al sistema completo dentro de la aceptación de lotes de fabricación.
- Prueba de disparo en arma completa cañón tipo Super Rapid, prueba funcional en arma para garantizar el correcto funcionamiento del producto.

3. Resultados y discusión

3.1. Viabilidad, diseño y fabricación de prototipos

Con respecto a las modificaciones en el conjunto cabeza, se planteó un sistema de percusión basado en un percutor el cual es accionado tras el cizallado de uno de sus elementos. Se evalúa el montaje con todos sus componentes, tales como conjunto fulminante, arandelas elásticas, conjunto percutor y componentes del mismo, así como la modificación interior de la cabeza del estopín.

Figura 2. Conjunto de cabeza estopín PPE-76/62, despiece y montaje.

Una vez fabricados los diferentes prototipos en sus diferentes configuraciones y comprobado el correcto montaje, sus etapas del montaje, evaluación de tiempos de montaje y calidad de fabricación, se acepta que el montaje del estopín cumple con los requisitos marcados. Se evalúa durante esta etapa una optimización ajustada al proceso de fabricación.

3.2. Pruebas de aceptación de producto según RTAM 1.306

Como se ha indicado anteriormente, se realizan las pruebas parciales hasta que se configura un lote definitivo y que se presenta para aceptación según la RTAM. A continuación, se exponen, los resultados de estos últimos con los comentarios que se han considerado más relevantes de la etapa de desarrollo.

3.2.1. Prueba de sensibilidad y seguridad de la cápsula iniciadora

La cápsula se compra a un proveedor externo y esta debe estar conforme a su norma MIL. Se comprueba la documentación de calidad entregada por el proveedor mediante la realización de las pruebas de sensibilidad de la misma en Expal para corroborar los resultados de la documentación recibida, siendo los resultados acordes con la documentación facilitada. No obstante, al proveedor se le realiza un seguimiento continuado del proceso de fabricación de esta cápsula para garantizar que mantiene los estándares de calidad y cumple los requisitos en la norma MIL aplicable a la misma.

3.2.2. Prueba de rotura de cizallable

Durante el desarrollo, se evalúa el comportamiento de diferentes configuraciones del cizallable mediante el registro de la curva tensión-deformación con el equipo Instron 3345 con una capacidad de 5 kN, en las que modifica el diámetro del espigo y el material del mismo.

Como resultado, en su configuración óptima, la resistencia a la rotura de una carga estática (el desplazamiento se realiza a 1 mm por minuto) es acorde con lo indicado en la RTAM 1.306.

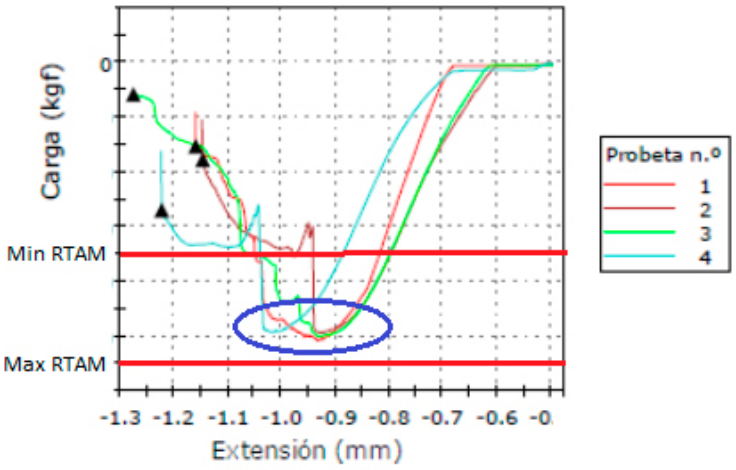


Figura 3. Curva rotura y valores de carga aplicados.

3.2.3. Prueba de sensibilidad y seguridad del conjunto cabeza estopín

Se realiza una distribución de funcionamiento y se comprueba que está dentro de los parámetros de siempre funcionamiento (2,54 J) y de no funcionamiento (0,68 J). Se comprueban finalmente, 100 unidades a siempre funcionamiento (2,54 J) y a no funcionamiento (0,68 J).

3.2.4. Prueba de caída de 8 m del conjunto cabeza estopín

Esta prueba se realiza a 25 unidades de cabeza de estopín. Como resultado de la prueba, no se produjo ningún tipo de funcionamiento. Tras el desmontaje de los estopines, se verificó que ninguna de las cápsulas presentaba indicios de percusión y el cizallable mantenía su posición.

3.2.5. Prueba de funcionamiento en estático del estopín completo

Se prueban 50 unidades de estopín a funcionamiento y 50 unidades a no funcionamiento a temperatura ambiente. Adicionalmente, se prueban 25 unidades a funcionamiento y a no funcionamiento a las temperaturas de -46 ºC y 63 ºC. Estas pruebas excedieron en número a lo marcado por la RTAM pero se consideró necesario realizarlo. Además, se grabaron parte de las pruebas con cámara de alta velocidad para comparar los funcionamientos.

Como resultado, se observó una correcta iniciación a la energía indicada, además de un correcto funcionamiento y quemado homogéneo, por lo que todos los estopines superaron la prueba.

3.2.6. Estopín completo pruebas de seguridad: traqueteo, vibración y caída 7 metros.

Estas pruebas se realizaron a 15 estopines de forma consecutiva, tras la finalización de la prueba de traqueteo, se comprueba la integridad de todos los estopines, que no presenten deformaciones, cedimientos o alteraciones de ninguna clase. Se realizó esta prueba por duplicado.

Posteriormente, los estopines son sometidos a vibración, tras la prueba, se evalúa nuevamente la integridad de los mismos. Tras esta prueba parte de los estopines quedan retenidos para la prueba de disparo y la otra parte, son sometidos a la prueba de caída de 7 metros.

Finalmente, parte de los estopines, previamente traqueteados y vibrados, son sometidos a la prueba de caída de 7 metros. Durante la prueba de caída de 7 metros, se observa la caída del martinete de 20 kg en cuyo interior va alojado el estopín, así como su impacto sobre el yunque de acero y el rebote del martinete de una altura superior a 90 cm.

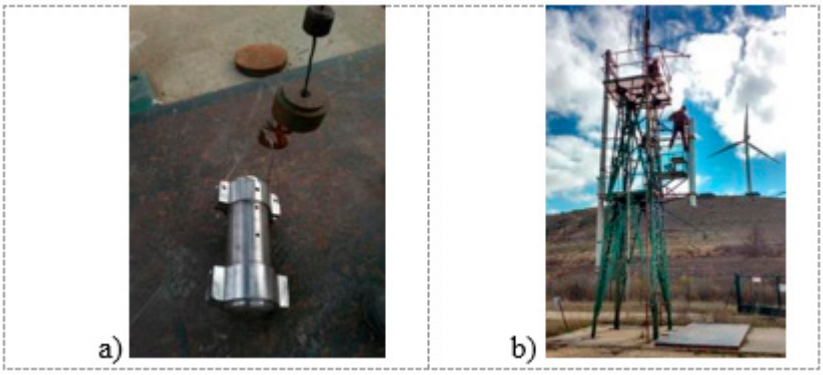


Figura 4. Martinete de 20 kg (a) y útil de caída 7m (b) para estopines PPE-76/62.

Tras la prueba, todos los estopines son desmontados, para comprobar la integridad de cada una de sus partes, apriete del roscado entre el tubo y el cuerpo, contenido en material energético, así como evaluación del cizallado del espigo en el conjunto de percusión. Los resultados fueron satisfactorios en todos los casos, se considera que el estopín es seguro para la manipulación y procesos de montaje.

3.2.7. Prueba de tiro

La prueba de tiro se lleva a cabo durante el año 2017 en series de varios días en las instalaciones del Centro de Ensayos de Torregorda (CET) en Cádiz. En dicha validación se emplea un cañón FN 76/62 OTO-MELARA y disparos atemperados a tres temperaturas 21 ºC (indicado en la RTAM 1.306), 63 ºC y -46 ºC, con objeto de evaluar su correcto funcionamiento en el rango de temperaturas de aplicación. El total de los disparos superó las 60 unidades, como resultado se observó que:

Todos los disparos en el rango de temperaturas de 21 ºC cumplen con los requisitos marcados en balística exterior e interior. Los disparos a 63 ºC y -46 ºC se consideraron adecuados y acordes con los valores registrados en comparación con otros disparos realizados a temperaturas similares.

Se examinan los estopines y las vainas tras la prueba, se verifica que no ha habido roturas ni deformaciones de los tubos del estopín. Se considera que la prueba se supera satisfactoriamente.

3.3. Pruebas de validación del estopín PPE-76/62 adicionales

La prueba de caída en manipulación de 1,5 m, se realiza para 15 unidades. Como resultado, todos los estopines superan la prueba, considerándose seguros para la manipulación y uso.

La prueba de no funcionamiento al estopín completo se añade como una prueba adicional de seguridad al sistema completo dentro de la aceptación de lotes de fabricación, según el punto 2.2.4.

La prueba de disparo en arma completa en cañón tipo Super Rapid se realiza en las instalaciones de la Navy School, Center for Weapons en Dinamarca, en el año 2017 en 4 test a diferentes cadencias:

- Test 1: 10 disparos a 30 disparos por minuto.
- Test 2: 20 disparos a 60 disparos por minuto.
- Test 3: 18 disparos a 120 disparos por minuto.
- Test 4: 20 disparos a 120 disparos por minuto.

Como resultado, se observó que todos los estopines mostraron un comportamiento correcto, dando lugar a velocidades medias de 905 m/s. Se evaluó el estado de los estopines y vainas tras el disparo y se comprobaron uno a uno, no se produjeron fuga de gases ni roturas en las zonas de percusión/unión.

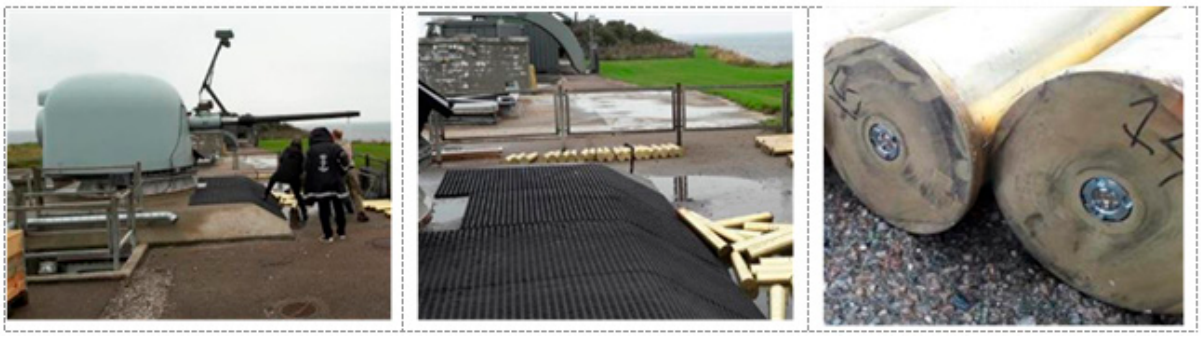


Figura 5. Prueba de disparo en cañón Super Rapid.

4. Acciones futuras

- Desarrollo de estopines PPE 76/62 compatibles con cargas tipo insensible (LOVA).
- Aplicar esta metodología a estopines de distinto calibre para un desarrollo de diferentes líneas de productos de tipo insensible.

5. Conclusiones

El estopín PPE-76/62 para disparo de 62 mm desarrollado por Expal ha superado con éxito todas las pruebas de validación descritas en la RTAM 1.306 REV. 2 al igual que ha sido probado con éxito en cañones tipo Super Rapid Oto Melara de 76 mm alcanzando una cadencia de disparo de 120 d.p.m.

El estopín PPE-76/62 garantiza el funcionamiento de las cargas de propulsión y prestaciones en su versión ECO.

Además de ello, dado su diseño robusto y mejorado, se ha disminuido el número de unidades defectivas durante el proceso de montaje.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a todos los compañeros que trabajan y colaboran en el grupo Expal, tanto en el departamento de I+D/T de Expal Systems y Expal Odrnance (en especial a los compañeros del pabellón 27 y del taller de mantenimiento), todos ellos han aportado su pequeño granito de arena mediante la experiencia, dedicación y contribuciones para mejorar la seguridad en los procesos y por fomentar las buenas prácticas de trabajo. Queremos agradecer este trabajo a Fidenciano Puente, que ha colaborado activamente en el desarrollo, y a Cesar Hojas, que nos ha ayudado en los trabajos de montaje desde EOR, ambos se han jubilado durante el año 2018 tras más de tres décadas en la empresa, les deseamos que disfruten de su merecido retiro.

Referencias

1. *Especificación RTAM 1.306. Especificación para la aceptación de los estopines TR 54/63 y PPE-76/62, para munición de 76/62 cal. REV. 3 12/06/17.*
2. *FAV-Club [Internet]. [cited 2018 Jul 18]. Available from: http://www.fav-club.com/2014/04/25/oto-melara-76mm62/.*
3. *Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. New York: Chemical Publishing Company INC; 1968.*
4. *Lake E R. Percussion Primers, Design Requirements. McDonnell Aircraft Company; 1970.*

Envejecimientos naturales y acelerados en los propulsantes de material compuesto

López Sánchez, Raúl[1,*], Ramírez Pedrosa, José[1], Peñafiel García, Rafael[1] e Iglesias Lebrato, Ignacio[1]

[1] Área de Materiales Energéticos, Departamento de defensa NBQyM, Subdirección de Sistemas Terrestres, INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Ctra. M301 km.10.5 Edif. 7, La Marañosa, 28330 San Martín de la Vega, Madrid, Spain.

* Contacto: lopezsr@inta.es (R. López).

Resumen

El envejecimiento natural es el proceso de degradación de propiedades químicas, físicas, mecánicas y balísticas que se produce en los materiales energéticos sometidos a transporte, manipulación y largos periodos de almacenamiento. Este proceso está fuertemente influido por las condiciones ambientales, afectando de manera relevante a los propulsantes sólidos, los cuales presentan mecanismos de degradación muy variados.

Mientras que la degradación de las pólvoras de base nitrocelulósica ha sido profusamente investigada, los propulsantes de material compuesto, o compositas, no ofrecen una bibliografía tan prolífica. La progresiva mejora en las formulaciones de los propulsantes sólidos ha convertido a las compositas en materiales muy seguros de almacenar y manipular, con un lento proceso de degradación. De no recurrir a envejecimientos acelerados, la predicción de la evolución de algunas propiedades por envejecimiento natural sería demasiado lenta, puesto que los envejecimientos artificiales deben mantener el mecanismo de descomposición natural.

En la última década se ha considerado al STANAG 4581 como la norma más relevante para la realización de envejecimientos acelerados en propulsantes de material compuesto, sin embargo, las nuevas normas y estudios propios apuntan en la dirección de abandonar técnicas de envejecimiento artificial sobre compositas que fueron desarrolladas para pólvoras nitrocelulósicas. En este documento se discute la validez de técnicas fuertemente arraigadas mediante el estudio de los mecanismos de degradación, proponiendo nuevas técnicas y metodologías.

Palabras clave

Composita, propulsante, envejecimiento, natural, acelerado.

1. Introducción

En el campo militar, los materiales energéticos se han convertido en un material ampliamente utilizado desde la introducción en el siglo XV de la pólvora negra en la artillería europea. Los propulsantes son una familia de materiales energéticos utilizados para proporcionar empuje a un proyectil mediante la generación de un elevado volumen de gas. La clasificación de los propulsantes suele realizarse en función de su estado físico y de la aplicación a la que vayan a ser destinados [1]. Actualmente, los propulsantes en estado sólido, pólvoras, constituyen el grupo más numeroso de los propulsantes para cohetes de uso militar, destacando la familia de las compositas o *composites*.

Las compositas, desde el punto de vista microestructural, son materiales compuestos de matriz polimérica. Estas mezclas heterogéneas de combustibles, oxidantes y aditivos suelen fabricarse por colada y posterior curado en la cámara de combustión, conformando un cilindro monolítico de composita denominado grano. La combustión del grano es una reacción de oxidación que genera gases para proporcionar la aceleración necesaria a todo el sistema.

Figura 1. a) Corte transversal del propulsante sólido de un cohete Roland© con vaciado en forma de estrella; b) esquema de las partes principales de un cohete.

La composición química de un grano de composita es muy variable y depende de la finalidad del cohete, el miembro más sencillo de esta familia se denomina APCP o *ammonium perchlorate composite propellant*. Las compositas, habitualmente, presentan como componentes mayoritarios al oxidante sólido e inorgánico y a una matriz que desempeña los roles de combustible principal y garantiza la integridad estructural, por lo que también denomina ligante o *binder*. Adicionalmente, la composición del grano también suele presentar combustibles rápidos, plastificantes, antioxidantes y modificadores balísticos.

1.1. Problemática del envejecimiento natural y mecanismos de degradación

En los materiales energéticos, el concepto de *envejecimiento natural* se refiere al lento proceso de pérdida de propiedades físicas, químicas, mecánicas y balísticas que afecta a pólvoras y explosivos de tipo orgánico durante los largos periodos de almacenamiento. La consecuencia de esta pérdida de propie-

dades afecta tanto a la utilidad como a la seguridad en la manipulación y almacenamiento del material energético. Los mecanismos de degradación pueden clasificarse [2] como:

- Termoquímicos: los modos de fallo están relacionados con cambios en la composición química. Su cinética de descomposición se acelera con la temperatura y con otros factores como la humedad. Dentro de este grupo se considera la descomposición de los propulsantes nitrocelulósicos.
- Mecánicos: relacionados con dos modos de fallo principales: la fatiga y la fractura. Por iniciación y propagación de grietas se produce un aumento incontrolado de la superficie de quemado en los propulsantes, o un aumento de la sensibilidad para los explosivos.
- Termomecánicos: corresponden con los fallos mecánicos debidos a deformaciones inducidas por efectos térmicos. Es representativo de esta familia el despegue, *dewetting*, que se produce por efecto de la temperatura en las intercaras de materiales con diferentes coeficientes de dilatación.

En general, el envejecimiento del material energético implica una degradación de su estructura química y la pérdida de algunas propiedades mecánicas, pero cada familia de materiales energéticos presenta sus propios modos principales de fallo:

- Propulsantes de base nitrocelulósica: su degradación a temperatura ambiente es muy lenta pero puede acelerarse con facilidad por aumento de la temperatura y de la humedad. Esta reacción de descomposición es autocatalítica, efecto que puede mitigarse mediante la adición de estabilizantes a la composición del grano.
- Propulsantes de tipo composita: habitualmente con matrices de caucho de tipo polibutadiénico, son susceptibles de sufrir un entrecruzamiento oxidativo. En estos materiales, la densidad de entrecruzamiento se presenta como un fuerte indicador del envejecimiento en el ligante, con un endurecimiento progresivo que aumenta la fragilidad del grano y que puede correlacionarse con una pérdida de la capacidad de deformación. La humedad presenta mecanismos de degradación diferentes al oxidativo, afectando principalmente a la intercara entre matriz y relleno.

1.2. Las pruebas de vigilancia y los envejecimientos acelerados

El programa de pruebas de vigilancia sobre la munición en servicio de la OTAN, programa ISS, *In Service Surveillance* [2], se define como el conjunto de actividades que permiten determinar el estado de conservación de los materiales energéticos, ver figura 2 [3]. Los materiales energéticos constituyen el grupo principal de materiales a estudiar en los programas de ISS y el conjunto de ensayos necesarios queda, en gran medida, a juicio del experto nacional [3] al que, en nuestro país, asesora el Área de Materiales Energéticos del INTA. Los materiales energéticos se clasifican por grupos [4] [5] y para ello se tiene en consideración su composición química, las propiedades del material y la posible evolución de propiedades con el tiempo, requiriéndose la aplicación de un programa previo que estudie los efectos de las condiciones en servicio.

Figura 2. Contexto de las pruebas de vigilancia, ISS.

Del programa de ISS se destacan, como elementos más importantes para el presente documento:

- CM: monitorización del estado, *Condition Monitoring*, son pruebas que implican el desmantelamiento de la munición y las pruebas destructivas sobre materiales energéticos tales como análisis químicos, la evaluación de las propiedades mecánicas y la cuantificación de la sensibilidad. En nuestro país habitualmente se denominan *pruebas de vigilancia*.
- PT: ensayos predictivos, *Predictive Testing*, permiten investigar los modos de degradación que se producen sobre la munición durante la vida en servicio como resultado de las condiciones de almacenamiento y manipulación. Estos ensayos permiten identificar los modos de fallo y las propiedades más sensibles a la degradación, conocimiento que retroalimenta las actividades del CM. La necesidad de estos ensayos predictivos se incrementa con la edad de la munición, volviéndose imprescindibles dentro del ISS cuando la munición ha superado la vida inicialmente estimada [3] por el fabricante. Las ampliaciones de vida útil de la munición requieren de una herramienta conocida como *envejecimientos acelerados*.

Los *envejecimientos acelerados* son procesos esenciales para realizar predicciones del tiempo de vida en servicio de los materiales energéticos, permitiendo estudiar la evolución de las propiedades críticas. Acelerar un proceso de envejecimiento natural no es sencillo y la técnica idónea depende del material energético y de la propiedad que se desea estudiar.

Actualmente, aunque se conocen los mecanismos principales de degradación natural para las diferentes familias de materiales energéticos, aún no se ha realizado una asociación entre cada propiedad de los materiales energéticos y el tipo de envejecimiento acelerado más apropiado. Atendiendo a la normativa vigente, solo existe una técnica de envejecimiento para todos los materiales energéticos para el estudio de todas sus propiedades: el incremento de temperatura. Esta situación de falta de técnicas adecuadas a las necesidades de los programas de ISS conlleva, irremediablemente, que el análisis de algunas propiedades no pueda ser concluyente y dificulta la predicción de la evolución de las propiedades por degradación de los propulsantes composite, pero también para la evolución de las propiedades físicas y mecánicas en todos los materiales energéticos.

En 2017, el AOP-64 [2] reconoce que el grueso de las pruebas de vigilancia de los materiales energéticos se focaliza sobre los propulsantes de base nitrocelulósica donde, habitualmente, se relaciona el tiempo de vida con el contenido de estabilizante. Sin embargo, los cohetes de gran tamaño de uso militar emplean propulsantes de tipo composita con mecanismos de degradación natural diferentes.

1.3. Estado normativo actual

El análisis de las normas disponibles en el entorno OTAN [6] permite una perspectiva general del estado del arte en el campo de los envejecimientos naturales y acelerados, ver Tabla 2.

Tabla 2. Contexto normativo OTAN para el envejecimiento natural y acelerado en M.E.

Envejecimiento		Justificación de Mecanismos y procedimientos del envejecimiento	
		Natural	Acelerado
Propulsantes	Nitrocelulósicos	AOP-48 [7]	
	Compositas	AOP-64 [2]*	STANAG 4581 [8]* AOP-7 [9]

Nota: * campo de aplicación limitado a ligantes inertes

Se considerarán, como principales aspectos en el análisis del estado del arte normativo a los envejecimientos naturales, artificiales y a los ensayos de cuantificación de propiedades críticas.

El conocimiento de un proceso de envejecimiento natural precisa tanto de la determinación de los mecanismos de degradación como de las principales propiedades afectadas. El envejecimiento natural en propulsantes de tipo composita suele producirse por degradación oxidativa y afecta principalmente a las propiedades mecánicas.

La aplicación de procesos de envejecimiento acelerado de forma correcta requiere de una técnica que acelere la cinética de la descomposición respetando el mecanismo de degradación natural. La aplicación de los protocolos de envejecimiento térmico sobre una composita [8] con intención de acelerar la degradación oxidativa del ligante presenta serias dificultades a la hora de justificar su mecanismo de funcionamiento y ofrece pobres correlaciones de tipo causa-efecto (envejecimiento-degradación de propiedades).

Al igual que con los procesos de envejecimiento acelerado, en el entorno OTAN, los ensayos recomendados para las pruebas de vigilancia sobre materiales energéticos se encuentran normalizados [2]. Nuestro país, con un avance notable en este campo, utiliza técnicas y métodos similares al de nuestros aliados, ver Tabla 3, pero con algunas mejoras cualitativas en propiedades mecánicas tales como fractura o fatiga, cuyo estudio se recomienda en el entorno OTAN [10] pero que nuestros socios, aún, no declaran públicamente [9].

Tabla 3. Pruebas de vigilancia en España para el estudio de los propulsantes composita.

Material energético	*Propiedad*		*Tipo de ensayo*	*Norma de ensayo*
Propulsantes compositas	Estabilidad		Estabilidad a vacío	STANAG 4556
	Composición		Antiox. y plastificantes	STANAG 4581
			Humedad (KF)	NM-P-2785
	Propiedades mecánicas	Entrecruzamiento	Dureza Shore	UNE-ISO 7619-1
			Sol-Gel	STANAG 4581
			Fracción soluble	STANAG 4581
		Resistencia mecánica	Tracción-compresión	NMP 2361
			Despegue inhibidor	NME-2557
		Viscoelasticidad	DMA	STANAG 4540
		Mecánica de la fractura	Fractura	-
			Fatiga	-
	Análisis microscópico		Despegue de la intercara	-
			Aparición de oquedades	-
			Análisis radiológico	-
			Análisis por ultrasonidos	-
	Propiedades balísticas		Bomba Crawford	NME-2461
			Micromotores	AOP-57, AOP-58

2. Envejecimiento acelerado en compositas mediante atmósferas oxidantes

El procedimiento para el envejecimiento acelerado sobre compositas se recoge en el STANAG 4581 [8], declarándose ligeras modificaciones en su aplicación por algunos países OTAN en el AOP-7 [9]. En todo caso, la única técnica de envejecimiento acelerado que se presenta, se basa en la temperatura. El AOP-64 [2] define claramente que, entre otras, las propiedades mecánicas no presentan los mismos mecanismos de degradación que las termoquímicas cuya cinética sí se acelera con la temperatura. Las compositas, por el contrario, ofrecen modos de fallo principalmente relacionados con la mecánica de la fractura y cuando su matriz es de tipo caucho, el entrecruzamiento oxidativo se presenta como el mecanismo principal que debe ser considerado tanto para el estudio de la degradación natural como para su aceleración. Nuestra experiencia constata una pobre correlación entre envejecimiento acelerado y degradación de propiedades y, por ello, se propone la viabilidad de un envejecimiento acelerado por un mecanismo oxidativo que, mediante ozono, degrade la matriz de las compositas.

2.1. Envejecimiento acelerado mediante ozono

El ozono, O_3, es un oxidante fuerte utilizado para acelerar el envejecimiento natural de los cauchos y muestra un comportamiento especialmente agresivo sobre los polibutadienos [11]. El principal agente oxidante atmosférico al que están expuestos los propulsantes es el oxígeno, O_2. El ozono y el oxígeno comparten mecanismos de envejecimiento similares sobre los propulsantes, presentando al ozono como un candidato apropiado para acelerar el proceso de oxidación natural. Es posible encontrar metodologías de envejecimiento en normativas [12] y en patentes [13] basadas en este principio. Se ha comprobado que la pérdida de propiedades mecánicas se produce por degradación de la matriz, pudiendo llegar a agrietar el propulsante por entrecruzamiento oxidativo [12].

Algunas referencias [12] combinan la exposición al O_3 con deformaciones mecánicas, aunque lo habitual es exponer el elastómero en reposo a O_3 durante largos periodos de tiempo [13]. En nuestro caso se ha desarrollado una cámara de envejecimiento con un volumen total de 4,5 L que trabaja a temperatura ambiente. La generación de ozono se produce por descarga de corona a alto voltaje, ver figura 3 a), mantenida por un dieléctrico cerámico y electrodos refrigerados por aire.

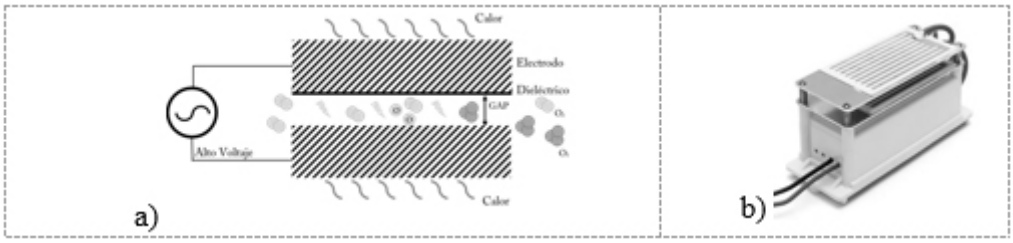


Figura 3. a) Esquema de la generación de O3 por descarga de corona con alto voltaje; b) sistema de generación de ozono.

El sistema es capaz de realizar una generación de ozono de hasta 200 mg/h, permitiendo realizar un envejecimiento acelerado al mantener una concentración de ozono constante de 1.000 ppb durante 15 días a temperatura y humedad ambiental.

3. Fallos de tipo mecánico en las compositas

En estos materiales energéticos, el AOP-46 [10] identifica tres modos de fallo principales: térmicos, mecánicos y termomecánicos, presentando solo para el primer modo de fallo una técnica apropiada de envejecimiento acelerado, el incremento de temperatura. Sin embargo, para los otros dos modos de fallo, no proporciona alternativas. A pesar de que tanto el STANAG 4581 [8] como en el AOP-7 [9] presentan el método térmico como la solución actual, pero acorde a nuestra experiencia, fruto de las pruebas de vigilancia sobre compositas, no se observa degradación de las propiedades principales por aplicación de envejecimientos acelerados de tipo térmico e, incluso, algunas de estas propiedades ofrecen mejores resultados tras el envejecimiento térmico.

3.1. Fatiga

Los fallos mecánicos en los propulsantes constituyen el mecanismo más relevante en los propulsantes de tipo composita envejecidos de manera natural. El comportamiento del material a fractura y a fatiga, puede ser estudiado dentro de la disciplina conocida como Mecánica de la Fractura y nos permiten cuantificar la tenacidad a fractura de estos materiales. El comportamiento a fatiga en compositas, según el AOP-46 [10], debería regirse por una ley de tipo Paris-Erdogan, ver ecuación 1.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \qquad (1)$$

donde C y m son constantes del material y ΔK el Factor de Intensidad de Tensiones.

La validez de esta ecuación se verificó mediante trabajos propios y sus resultados ya se presentaron en el DESEI+D 2017 [10], aunque dada la naturaleza gomosa de la matriz, se consideró más apropiada la Tasa de Liberación de Energía, G, en vez del Factor de Intensidad de Tensiones, ΔK, como fuerza impulsora de la fatiga en compositas. Posteriormente, se ha presentado a patente una máquina de esfuerzos cíclicos para realizar el ensayo de forma normalizada [14].

3.2. Validación del envejecimiento acelerado por ozono

Para soportar la afirmación de que el envejecimiento propuesto ofrece una alternativa viable a la técnica basada en el incremento de temperatura, se ha optado por determinar la evolución de la respuesta a fatiga [10] de dos motores de propulsante con un fuerte envejecimiento natural (>20 años). Fragmentos equivalentes de ambos motores se sometieron a envejecimientos térmicos (60 ºC, 3 meses) y acelerados por ozono para, posteriormente, evaluar el comportamiento a fatiga tanto del material envejecido naturalmente como de los dos tipos de envejecimiento acelerado. Este ensayo se considera una condición necesaria, pero no suficiente, para validar el método de envejecimiento acelerado por ozono.

Del estudio de los resultados, ver figura 4, puede observarse que la respuesta a fatiga en compositas se ve empeorada por el envejecimiento mediante ozono, desplazando las curvas de fatiga hacia velocidades superiores de crecimiento de grieta para la misma Tasa de Liberación de Energía, G. Por el contrario, el proceso de envejecimiento térmico mejora el comportamiento del propulsante a fatiga.

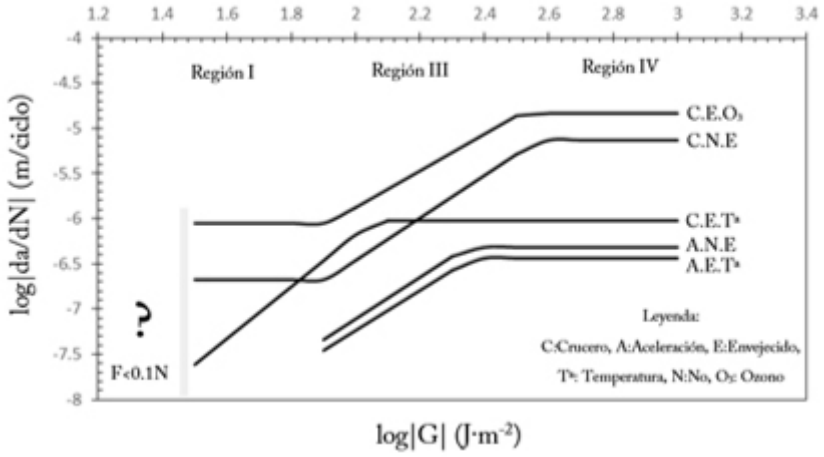


Figura 4. Representación de una de las curvas de fatiga para diferentes condiciones.

4. Resumen y trabajos futuros

Se ha presentado un estudio bibliográfico que justifica la insuficiencia de técnicas para la realización de envejecimientos acelerados sobre propulsantes de tipo composita. Esta problemática puede ser extendida, al menos, a todo el entorno OTAN.

En el presente documento se ofrece una alternativa viable para realizar envejecimientos acelerados, abordándolos desde la perspectiva de acelerar el mecanismo de entrecruzamiento oxidativo utilizando ozono. El análisis de la degradación producida con ozono presenta resultados muy prometedores, mejores que la técnica actualmente utilizada para estos materiales. Para soportar esta afirmación se han utilizado los datos presentados en el DESEI+D 2017.

Aun cuando los resultados presentados ofrezcan un salto cualitativo para la mejora de las pruebas de vigilancia en propulsantes de tipo composita, sigue siendo necesario validar la técnica de envejecimiento acelerado mediante la cuantificación de otras propiedades diferentes a la presentada, tales como elongación máxima o densidad de entrecruzamiento en propulsantes envejecidos natural y artificialmente. Dentro de los trabajos futuros, es esencial diseñar tablas de equivalencia para las condiciones de envejecimiento

acelerado, estas tablas permitirían relacionar el tiempo de envejecimiento natural con las condiciones del envejecimiento acelerado. Dada la lenta cinética del proceso natural, obtener estas tablas requerirá un estudio con una duración cercana a los 20 años, aspecto que precisará de una buena planificación de ensayos y un compromiso a largo plazo del Área de Materiales Energéticos con este tipo de estudios.

Agradecimientos

Se agradece al INTA, en particular al Departamento de NBQyM de la Subdirección de Sistemas Terrestres, el uso de las instalaciones para el desarrollo de la presente investigación. El apoyo científico del Grupo de Investigación, Durabilidad e Integridad Mecánica de Materiales Estructurales de la URJC ha sido imprescindible para la validación del proceso de envejecimiento acelerado.

Referencias

1. *Agrawal JP. High Energy Materials: Wiley-VCH; 2010.*
2. *AOP-64: In-service surveillance of munitions condition monitoring of energetic materials. NATO Standarization Office (NSO), 2017.*
3. *AOP-62: In service surveillance of munitions general guidance. NATO Standarization Office (NSO), 2017.*
4. *NME-2154 (Ed. 2017): Clasificación y nomenclatura de los explosivos detonantes. Servicio de Normalización del Órgano Central. SDG. INREID. 2017.*
5. *NME-2018 (Ed. 2017): Clasificación y nomenclatura de los explosivos propulsores sólidos (pólvoras). Servicio de Normalización del Órgano Central. SDG. INREID. 2017.*
6. *NATO Standarization Document Database. [Online]. Available from: https://nso.nato.int/nso/nsdd/_CommonList.html*
7. *AOP-48 (Ed. 2): Explosives, nitrocellulose-based propellants, stability test procedures and requirements using stabilizer depletion. NATO Standarization Office (NSO), 2008.*
8. *STANAG 4581 (Ed.1): Explosives, assessment of ageing characteristics of composite propellants containing an inert binder, NATO Standarization Office (NSO), 2006.*
9. *AOP-7 (ed.2): Manual of data requirements and tests for the qualification of explosive materials for military use. NATO Standarization Office (NSO), 2003.*
10. *AOP-46 (Ed.1): The scientific basis for the whole life assessment of munitions, NATO Standarization Office (NSO), 2006.*
11. *Schweitzer PA. Corrosion of Polymers and Elastomers. 2nd ed. CRC Press; 2006.*
12. *UNE-ISO 1431-1. Caucho vulcanizado o termoplástico. Resistencia al agrietamiento por ozono. Parte 1: Ensayo de deformación en condiciones estáticas y dinámicas. AENOR; 2010.*
13. *Jacobs WMi, inventor; Method of Age Testing Rubber Based Propellants. Estados Unidos patent US4262541. 1981 Abril 21.*
14. *López R., Salazar A., Rodríguez J. Comportamiento mecánico a fatiga de propulsantes sólidos. Congreso DESEI+D. 2017, en edición.*
15. *López R., Baza D., Salazar A., Rodríguez J. Máquina de Esfuerzos Cíclicos sobre Propulsantes. Solicitud de patente nacional P-07804. 2018 Jul 26.*

Integridad estructural de propulsantes sólidos

Martínez Sánchez, Mario[1], López Sánchez, Raúl[2,*], Salazar López, Alicia[1] y Rodríguez Pérez, Jesús[1]

[1] Grupo de Investigación, Durabilidad e Integridad Mecánica de Materiales Estructurales (DIMME), Universidad Rey Juan Carlos (URJC), Calle Tulipán, s/n, 28933 Móstoles, Madrid, Spain

[2] Área de Materiales Energéticos, Departamento de defensa NBQyM, Subdirección de Sistemas Terrestres, INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Ctra. M301 km.10.5 Edif.7, La Marañosa, 28330 San Martín de la Vega, Madrid, Spain.

* Contacto: lopezsr@inta.es (R. López).

Resumen

Los propulsantes sólidos son los materiales energéticos encargados de proporcionar empuje a vehículos aeroespaciales como los cohetes. Estos materiales pueden ser almacenados y transportados durante largos periodos de tiempo, estando sometidos a vibraciones y a cargas de origen térmico. Estas solicitaciones producen grietas en los propulsantes sólidos, que pueden influir gravemente en la funcionalidad del cohete. La presencia y crecimiento de grietas genera un comportamiento a priori impredecible del cohete durante su funcionamiento, pues la superficie expuesta a la combustión no será la misma que para la que fue diseñado. A pesar de la gravedad de la presencia de grietas en los materiales energéticos, la bibliografía sobre fractura y fatiga de propulsantes sólidos de material compuesto es escasa.

El objetivo del presente estudio es aplicar la Mecánica de la Fractura para caracterizar el comportamiento a fractura de propulsantes sólidos de material compuesto con el fin de evaluar la resistencia a fractura de estos materiales. En concreto, se aplicarán dos aproximaciones de la Mecánica de la Fractura (Mecánica de la Fractura Elástica y Lineal y Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica), comúnmente empleadas en el análisis del comportamiento a fractura de los propulsantes sólidos tipo *composite,* para determinar si su uso es adecuado o no. Se analizarán los materiales procedentes de un cohete de doble etapa haciendo especial hincapié en la diferente respuesta a fractura en función del material.

Palabras clave

Propulsantes sólidos, compositas, composites, misil, fractura.

1. Introducción

Los propulsantes son materiales energéticos empleados en la propulsión de cohetes y misiles. Esta propulsión se consigue mediante la generación de gases durante su combustión, formando parte de su composición el combustible (agente reductor) y el comburente (agente oxidante). Los propulsantes sólidos muestran grandes ventajas como su estabilidad temporal y capacidad para ser almacenados largos periodos de tiempo, posicionándolos como los materiales energéticos más empleados actualmente para la propulsión de cohetes de gran tamaño.

El problema de integridad estructural que concierte a estos materiales es la propagación incontrolada de grietas. Durante su almacenamiento (generalmente prolongado, mayor a 20 años) y transporte son sometidos a diferentes cargas, principalmente vibraciones y cargas térmicas [1-2].

Figura 1. Propulsante sólido procedente de un misil de dos etapas cortado en láminas. Motor de aceleración (oscuro) y motor de crucero (claro).

En la bibliografía referente a los estudios de fractura de propulsantes sólidos, es frecuente encontrar publicaciones en las que se emplea la aproximación de la Mecánica de la Fractura Elástica y Lineal [3-4]. Esto se debe a la facilidad de cálculo que ofrece esta aproximación. Sin embargo, los propulsantes sólidos tipo *composite* presentan un comportamiento mecánico marcadamente no lineal.

2. Objetivo

En el presente estudio se ha caracterizado a fractura un propulsante sólido de tipo *composite* procedente de un misil de dos etapas: motor de crucero y motor de aceleración (ver figura 1). Los propulsantes que se han estudiado se clasifican dentro de la categoría de los de matriz polibutadiénica hidroxiterminal (HTPB) con perclorato amónico (AP) como oxidante principal, además de diversos aditivos como las partículas de aluminio micronizado en el motor de aceleración (etapa de color gris) o la nitroguanidina en el motor de crucero (etapa de color blanco).

Conocer las propiedades mecánicas de los propulsantes sólidos, en concreto, el comportamiento a fractura puede minimizar los fallos catastróficos en el funcionamiento de los cohetes durante su lanzamiento, dadas las altas presiones y temperaturas a las que son sometidos durante este proceso.

3. Composición de los materiales

La composición de los propulsantes analizados en este estudio es la que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición de los propulsantes tipo *composite* en porcentaje en peso (% wt).

	Combustibles		**Plastificante**	**Oxidante**	**Ligante**
Tipo de motor	*Aluminio*	*Nitroguanidina*	*Isodecil pelargonato*	NH_4ClO_4	*CTPB*
Aceleración	16,0 ± 0,7	-	3,6 ± 0,3	54,2 ± 1,0	26,2 ± 2,0
Crucero	-	14,7 ± 0,6	3,8 ± 0,1	53,5 ± 1,5	28,0 ± 2,2

El propulsante del motor de aceleración contiene aluminio, un combustible rápido que ofrece un mayor empuje en la etapa inicial del vuelo; y el propulsante del motor de crucero presenta nitroguanidina que actúa como un combustible que mantiene el empuje estable durante el vuelo hasta alcanzar el objetivo.

4. Caracterización a tracción

La caracterización a tracción uniaxial se realizó con una máquina universal de ensayos de la marca Microtest con una célula de carga de 500 N, a una velocidad de ensayo de 5 mm/min y a una temperatura de 22 ºC. Las probetas ensayadas son probetas JANNAF con las dimensiones mostradas en la figura 2.

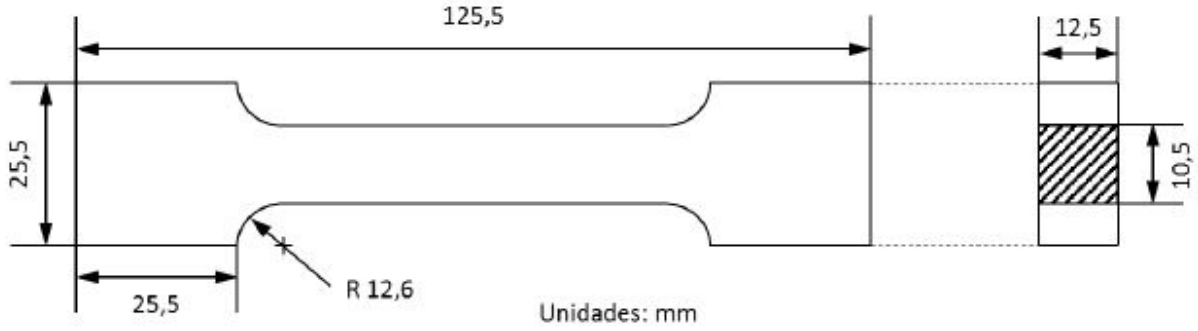


Figura 2. Probetas JANNAF empleadas en los ensayos de tracción uniaxial.

Mediante estos ensayos se ha obtenido la tensión de cedencia (σ_y) y el módulo elástico (E) de los propulsantes.

5. Caracterización a fractura

Para la caracterización a fractura en modo I se han realizado ensayos utilizando dos tipos de probetas, CT (*Compact Tension*) y SENB (*Single Edge Notched Bend*), mostrados en las figuras 3 a y b, respectivamente, con el fin de analizar la influencia de la geometría en los parámetros de fractura.

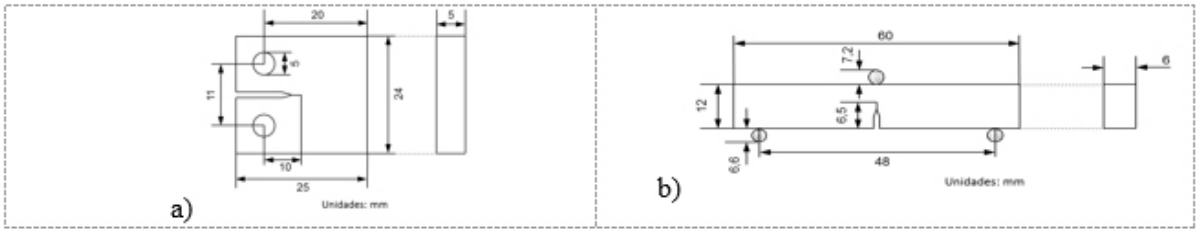


Figura 3. Probetas de ensayo, a) CT; b) SENB.

Los ensayos de fractura de las probetas SENB se han llevado a cabo en una micromáquina de marca DEBEN modelo MT200 con célula de carga de 200 N (ver figura 4) a 22 ºC y a una velocidad de 1 mm/min utilizando un dispositivo de flexión en tres puntos.

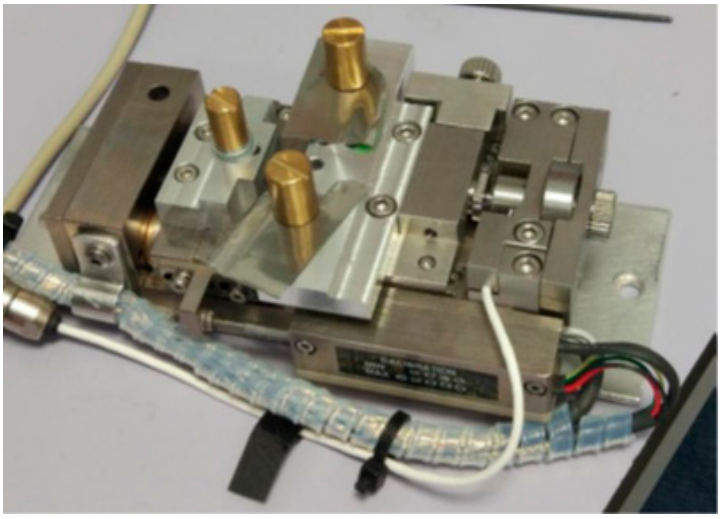


Figura 4. Micromáquina DEBEN empleada en los ensayos de flexión.

Las probetas CT se han ensayado en una máquina universal de ensayos de la marca Microtest con una célula de carga de 500 N a 22 ºC con una velocidad de 1 mm/min.

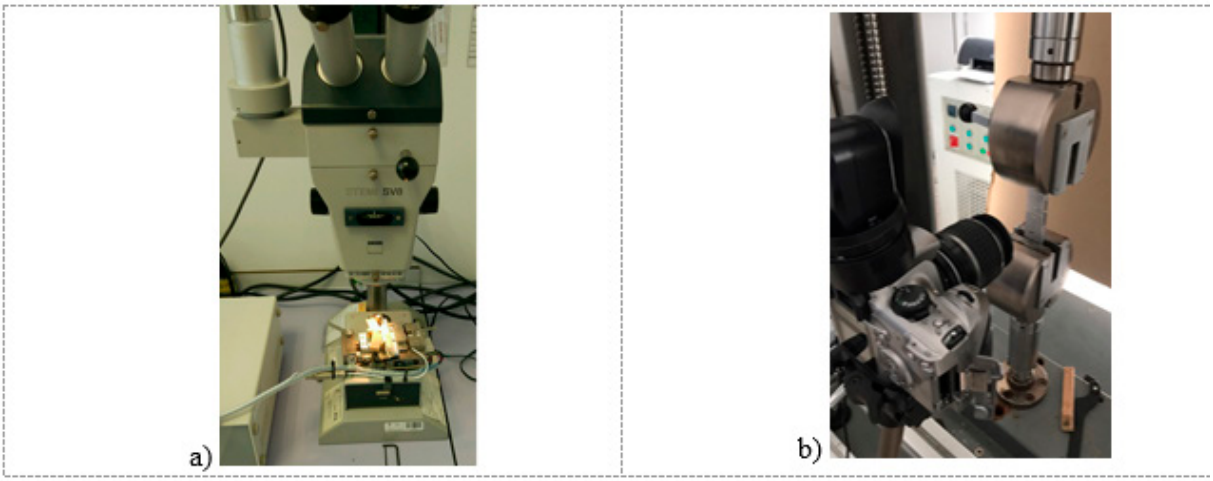


Figura 5. Configuraciones de ensayo. a) Con probetas SENB; b) Con probetas CT.

La medición del tamaño de grieta se realizó empleando cámaras tal y como se muestra en las figuras 5 a y b. Durante la realización de estos ensayos se ha intentado minimizar la componente viscoelástica de estos materiales mediante la realización de ensayos suficientemente lentos.

6. Mecánica de la Fractura Elástica y Lineal y Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica

Según la respuesta mecánica del material, se aplicaron dos aproximaciones de la Mecánica de la Fractura. La Mecánica de la Fractura Elástica y Lineal presupone un comportamiento a fractura inestable, elástico y lineal; sin embargo, la Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica asume un crecimiento estable de la grieta. En ambos casos, las aproximaciones requieren de una grieta preexistente, situación muy habitual en propulsantes envejecidos.

Las propiedades obtenidas a través de estas aproximaciones son los valores críticos del factor de intensidad de tensiones (K_{IC}), la tasa de liberación de energía (G_{IC}), el valor crítico asociado a la integral J (J_{IC}) y las curvas J-R en las que se representa el valor de la integral J en función del crecimiento de grieta. Los subíndices de estas propiedades denotan el modo de apertura de la grieta (modo I) y que corresponden a los valores críticos (C) de las respectivas propiedades del material.

Todas las magnitudes anteriormente mencionadas buscan caracterizar la fractura, pero considerando comportamientos muy diferentes como es el crecimiento estable o inestable de la grieta. Además de la diferente aproximación para el cálculo (MFEL para K_{IC} y G_{IC} y MFEP para J_{IC} y curva J-R), se utilizaron dos criterios diferentes: un criterio tensional (K_{IC}) y un criterio energético (G_{IC} y J_{IC}). Las ecuaciones empleadas en el cálculo de estos parámetros son:

$$K = \frac{P}{h \cdot w^{1/2}} \cdot f(a/w) \qquad G = \frac{U}{h \cdot w \cdot \phi(a/w)} \qquad J = \frac{\eta U}{h(w-a)}$$

Las ecuaciones dependen de las dimensiones de la probeta (espesor, «h», y anchura, «w»), de un factor corrector [f(a/w), φ(a/w) y η], donde «a» es el tamaño de grieta inicial, «η» es un parámetro dependiente de la geometría, P es la carga asociada al inicio de la propagación de la grieta y U es el área bajo la curva fuerza-desplazamiento del punto de la curva empleado en el análisis, dependiendo de si se utiliza el criterio tensional o energético. El criterio tensional permite conocer la carga a la que se puede someter al material antes de que suceda la rotura inestable o el crecimiento de grieta, mientras que el criterio energético permite conocer la energía necesaria para provocar el inicio de la propagación de la grieta o bien la energía necesaria para que la grieta crezca cierta cantidad.

La caracterización de estas propiedades (K_{IC}, G_{IC}, J_{IC}, curva J-R, σ_y y E) en propulsantes sólidos constituye, por sí mismo, un objetivo interesante dada la escasa bibliografía existente al respecto.

La determinación del valor crítico de la integral J, J_{IC}, se obtiene a partir del punto de la curva fuerza-desplazamiento asociado al instante en el que se observa el inicio de la propagación de la grieta durante el ensayo. La curva J-R aporta información sobre el crecimiento de la grieta (fractura estable) en los propulsantes y los datos experimentales se ajustan a una ecuación potencial:

$J = C_1 \cdot \Delta a^{C_2}$ donde C_1 y C_2 son constantes del material.

Esta curva es, en realidad, la propiedad del material no lineal. A pesar de ello, se suele emplear J_{IC}, es decir, el valor de iniciación como parámetro para el diseño estructural.

7. Resultados

A continuación, se detallan los resultados más relevantes del estudio.

7.1. Tracción uniaxial

Los resultados mostrados en los ensayos de tracción son coherentes con los resultados mostrados por M. C. J. Van Ramshorst, *et al*. [6] cuyos propulsantes de HTPB-AP muestran un módulo de elasticidad (E) en el rango de los 6,58 a 8,68 MPa.

En la tabla 2 se observa que el propulsante de motor de aceleración es menos rígido y menos resistente que el de motor de crucero, pero tiene una mayor capacidad de deformación (ε_u deformación para la carga máxima, ε_f deformación para la carga de rotura).

Tabla 2. Datos del ensayo de tracción uniaxial.

Motor	*E (MPa)*	σ_y *(MPa)*	ε_u	ε_f
Aceleración	7 ± 2	0,55 ± 0,04	0,62 ± 0,07	0,66 ± 0,08
Crucero	10 ± 2	0,79 ± 0,07	0,30 ± 0,05	0,35 ± 0,11

7.2. Fractura

Los resultados de los ensayos de fractura analizados a través de la MFEL se muestran en la tabla 3. Los valores de K_{IC} son similares, pero la energía necesaria para el inicio de la propagación de la grieta, G_{IC}, es notablemente mayor en los propulsantes de motor de aceleración. Este aspecto es coherente con la conclusión de que el propulsante de aceleración presenta una mayor resistencia a fractura que el motor de crucero.

En cuanto a los resultados de ambas geometrías, la tenacidad a fractura (K_{IC}) no muestra diferencias apreciables para ningún tipo de motor. No obstante, la tasa de liberación de energía (G_{IC}) sí presenta diferencias notables en los propulsantes de ambos tipos de motor en las dos geometrías.

Tabla 3. Resultados del ensayo de fractura según la MFEL.

Motor	***SENB***		***CT***	
	K_{IC} (kPa·m$^{1/2}$)	**G_{IC} (J/m^2)**	**K_{IC} (kPa·m$^{1/2}$)**	**G_{IC} (J/m^2)**
Aceleración	47 ± 6	360 ± 90	55 ± 7	600 ± 100
Crucero	48 ± 3	250 ± 30	60 ± 20	500 ± 200

G. S. Tussiwand *et al*. [4] estudiaron este tipo de materiales con ensayos realizados a una velocidad de 50 mm/min obteniendo un valor de K_{IC} aproximado a 47 kPa·m1/2, similar al obtenido en nuestros resultados.

En la figura 6 se muestran las curvas fuerza-desplazamiento típicas de los propulsantes analizados. En ella se señalan los puntos PQ correspondientes al punto en el que la MFEL predice el inicio de la propagación de la grieta y los puntos PBL que son los puntos en los que se ha observado el inicio real de la propagación de la grieta.

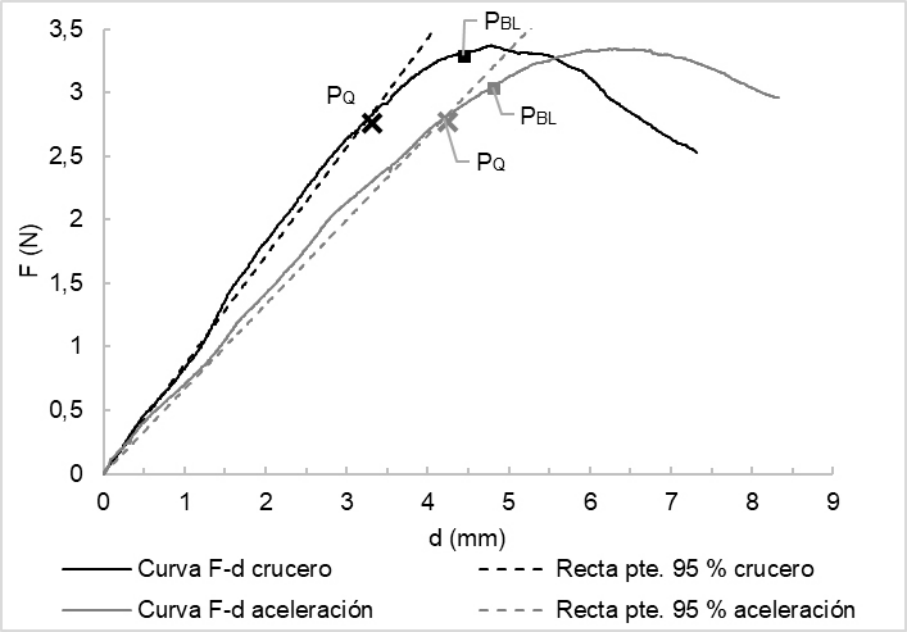


Figura 6. Curvas F-d de fractura de los propulsantes de motor de aceleración y crucero.

Tal y como se puede observar en la figura 7, el comportamiento mecánico es no lineal y la predicción de inicio de la propagación de la grieta mediante la MFEL no es acorde con el inicio real, por lo que la MFEL no representa una alternativa correcta para el análisis del comportamiento mecánico de los propulsantes sólidos de tipo *composite* como los analizados. Es por ello por lo que se ha recurrido a la aproximación de la MFEP para realizar el análisis del comportamiento mecánico de estos materiales. En la tabla 4 se muestran los parámetros de fractura analizados y en la figura 7 se muestran las curvas J-R representativas de los resultados del análisis a través de la MFEP.

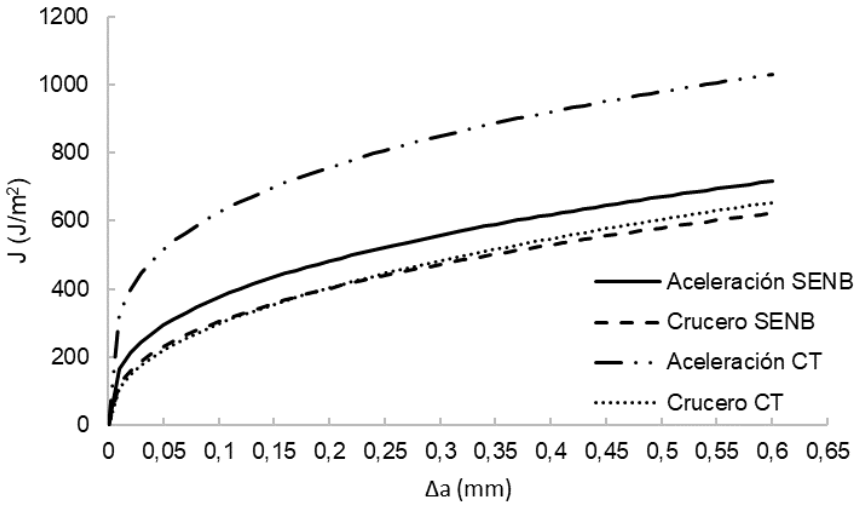


Figura 7. Curvas de resistencia J-R de los propulsantes de motor de aceleración y de crucero.

En la figura 7 se puede apreciar que el propulsante de motor de aceleración es más resistente a la fractura que el motor de crucero en ambas configuraciones, es decir, las curvas de resistencia J-R del propulsante de motor de aceleración se encuentran por encima de las del propulsante de motor de crucero.

Atendiendo al efecto de la configuración (SENB y CT), el propulsante de motor de crucero presenta un comportamiento a fractura prácticamente idéntico e independiente de la configuración de ensayo. Sin embargo, el propulsante de motor de aceleración presenta diferencias notables en su comportamiento a fractura y claramente dependiente de la geometría utilizada.

Tabla 4. Resultados del ensayo de fractura según la MFEP.

	SENB			***CT***		
Motor	$\mathbf{J_{IC}}$ **(J/m²)**	$\mathbf{C_1}$ **(J/m³)**	$\mathbf{C_2}$	$\mathbf{J_{IC}}$ **(J/m²)**	$\mathbf{C_1}$ **(J/m³)**	$\mathbf{C_2}$
Aceleración	500 ± 100	900 ± 200	0,4 ± 0,1	900 ± 300	1.200 ± 300	0,3 ± 0,1
Crucero	450 ± 20	770 ± 90	0,4 ± 0,2	400 ± 100	800 ± 200	0,4 ± 0,2

En la tabla 4 se puede observar que los valores críticos de la integral J, además de las constantes que describen la curva de resistencia (ecuación 2), son similares en el caso del propulsante de motor de crucero en ambas configuraciones y no lo son para el propulsante de motor de aceleración.

En la configuración SENB, los propulsantes de ambos tipos de motor presentan valores críticos de J semejantes, dándose así el inicio de la propagación de la grieta para semejantes cantidades de energía, mientras que en la configuración CT sí se observan diferencias en la cantidad de energía necesaria para provocar el inicio de la propagación de la grieta en los propulsantes de los dos motores.

Cabe destacar también la diferencia entre los valores J_{IC} y G_{IC} que se han obtenido. Los valores de J_{IC} son mayores que los de G_{IC}, esto a priori es algo que cabía esperar, pues la MFEP contempla el enroma-

miento de la punta de la grieta previo al inicio de la propagación de la grieta, siendo necesaria una mayor cantidad de energía para producir ese inicio de la propagación (figura 7).

8. Conclusiones

El propulsante del motor de aceleración analizado es más resistente a la fractura que el propulsante del motor de crucero.

La Mecánica de la Fractura Elástica y Lineal es la aproximación aplicada generalmente para caracterizar estos materiales, tal y como muestra la bibliografía, debido principalmente a la facilidad de cálculo que nos ofrece. Sin embargo, esta aproximación no es a priori aplicable a los materiales objeto de este estudio, debido al crecimiento estable de grieta tras su iniciación y la clara respuesta no lineal de las curvas fuerza-desplazamiento. Por tanto, el uso de la Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica proporciona las propiedades mecánicas de los propulsantes de tipo *composite* mucho más precisas, aun cuando siguen existiendo algunas limitaciones, principalmente la influencia de la configuración del ensayo (geometría de la probeta) en algunos propulsantes.

Esta influencia de la configuración del ensayo puede ser debido a la influencia que la viscoelasticidad puede presentar en los resultados obtenidos planteando nuevos retos para los futuros intentos de caracterizar mecánicamente estos materiales a través de nuevos modelos, aspecto imprescindible para mejorar la seguridad en el uso de estos materiales estratégicos.

Agradecimientos

Se agradece al INTA, en particular al Departamento de NBQyM de la Subdirección de Sistemas Terrestres, el uso de las instalaciones. De igual forma debe reconocerse la contribución del programa de prácticas en empresa de la URJC, Grupo de Investigación, Durabilidad e Integridad Mecánica de Materiales Estructurales (DIMME), por proporcionar alumnos altamente preparados para pequeños proyectos de investigación que apoyan su formación.

Referencias

1. *Liu C. Effects of cyclic loading sequence on cumulative damage and constitutive behavior of a composite solid propellant. 28th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference.*
2. *Britton S. C., Tormey J. F. Effect of Cyclic Loading on Solid Propellant Grain Structures. AIAA Journal. 1963:1(8):1763-1770. DOI: 10.2514/3.1922.*
3. *Rao B. B. Fracture of Solid Rocket Propellant Grains. Engineering Fracture Mechanics. 1992: 43(3):455-459. DOI: 10.1016/0013-7944(92)90113-S.*
4. *Tussiwand G.S. et al. Fracture Mechanics of Composite Solid Rocket Propellant Grains: Material Testing. Journal of Propulsion and Power. 2009:25(1): 60-73. DOI: 10.2514/1.34227.*
5. *ASTM. (2006). Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. ASTM E1820. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.*
6. *Van Ramshorst M. C. J et al. Investigation of the Failure Mechanism of HTPB/AP/Al Propellant by in-situ Uniaxial Tensile Experimentation in SEM. Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2016:41(4):700-708. DOI: 10.1002/prep.201500264.*

Glosario de abreviaturas

AN: Ammonium nitrate.
AP: Ammonium perchlorate.
CTPB: Carboxyl-terminated polybutadiene.
GAP: Glycidyl Azide Polymer.
HTPB: Hydroxyl-terminated polybutadiene.

Desarrollo y validación de una nueva gama de propulsantes para mortero

Mur Sanz de Galdeano, Ramón[1,*], Laso Laso, Ana[1] y Otón-Martínez, Ramón A.[1]

[1] EXPAL Systems S.A. (MAXAM Defence), Avda. del Partenón, 16, 28042 Madrid, España.

* rmur@expal.biz.

Resumen

Recientemente se ha implementado un nuevo concepto en cuanto a diseño y fabricación para los propulsantes de granada de mortero en EXPAL. El sistema de propulsión para granada de mortero de EXPAL combina un propulsante para el cartucho iniciador y un único propulsante para los incrementos, que permiten ajustar el alcance del disparo. Los propulsantes tradicionales para granada de mortero en EXPAL se basaban en el concepto de pólvora doble base extruida en forma de hilos (cartucho), y pólvora de doble base laminada y cortada en forma de planchuelas (suplementos). Estas pólvoras presentan inconvenientes desde el punto de vista de la seguridad y la eficiencia del proceso de fabricación. Las pólvoras en forma de filamentos para el cartucho siguen un proceso de producción de bajo rendimiento en la extrusión y en el cargado en el cartucho. Por su parte las pólvoras en forma de planchuelas suponen un riesgo de seguridad, debido al peligro de iniciación del material energético durante el proceso de laminación. El nuevo sistema cambia radicalmente de concepto para centrarse en los propulsantes de granos con geometría cilíndrica uniperforada. Este nuevo diseño, tanto del propulsante del cartucho iniciador como de los incrementos, se fabrica exclusivamente por extrusión con tecnología de doble base con disolventes, que tiene importantes ventajas: mayor repetitividad y homogeneidad del producto, lo que mejora las dispersiones obtenidas en arma; mayor eficiencia en el proceso de extrusión; mayor facilidad de carga, que puede ser automatizada fácilmente, reduciendo manipulación (menor riesgo para el operario) y los costes. Desde el punto de vista de su rendimiento balístico, los nuevos propulsantes han sido validados mediante el anexo A de la STANAG 4225, con excelentes resultados. En el presente artículo se describe el proceso de diseño e industrialización de los nuevos propulsantes, así como las pruebas realizadas para su validación y calificación.

Palabras clave

Granadas de mortero, propulsantes, diseño, balística interior.

1. Introducción

En los últimos años, el sistema de propulsión empleado por EXPAL para toda la gama de granadas de mortero (de calibres 60, 81 y 120 mm) ha consistido en pólvoras extruidas en forma de filamentos para el cartucho iniciador y pólvoras laminadas para los suplementos, en ambos casos de doble base (ver figura 1).

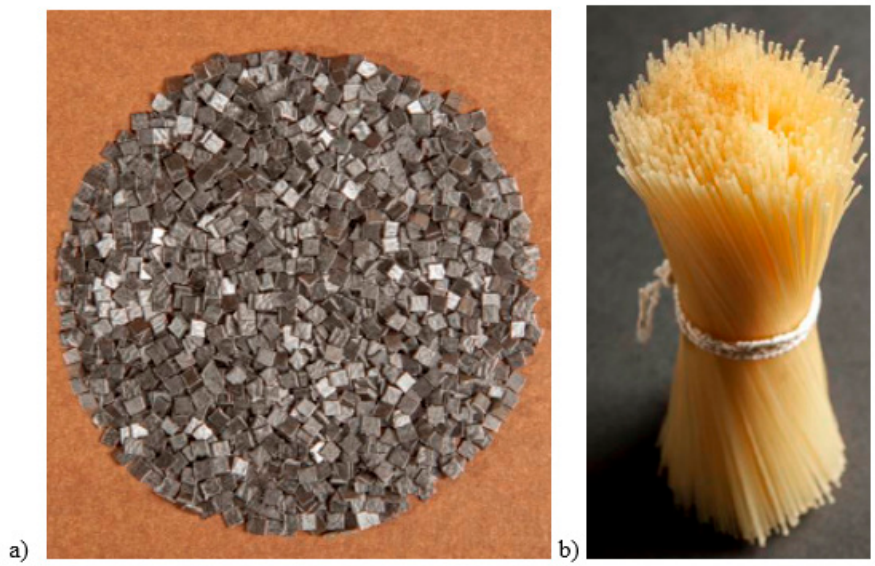


Figura 1. Pólvoras empleadas en los últimos años por EXPAL en suplementos (a) y cartuchos; (b) de granadas de mortero.

Debido a los riesgos inherentes del proceso de fabricación de propulsantes mediante laminación, EXPAL inició en el año 2011 el desarrollo de una nueva gama de propulsantes de doble base con disolventes para granada de mortero, fabricados mediante extrusión. La presencia de disolventes, de forma general, disminuye el riesgo de iniciación durante el proceso de fabricación, además de ser ventajoso desde el punto de vista de la eficiencia del proceso (extrusión y corte). Este desarrollo contó con diferentes etapas, pasando por la definición de la formulación y geometría, fabricación y validación mediante prueba de fuego de lotes a escala prototipo, fabricación y validación de lotes piloto a escala industrial y finalmente calificación del producto acorde a STANAG 4225.

2. Definición del propulsante y fabricación a escala prototipo

Se explica a continuación el proceso de desarrollo del propulsante GDB112, para suplemento de granada de mortero de calibre 81 mm, consistente en granos cilíndricos uniperforados. El desarrollo del resto de

propulsantes siguió un proceso muy similar, siendo necesarias un número menor de iteraciones en los sucesivos desarrollos, debido a las lecciones aprendidas.

El desarrollo comienza con la definición de una formulación y una geometría del propulsante tubular que permita obtener una balística interior similar a la de la pólvora laminada. Se define una composición química que teóricamente permita obtener un calor de explosión similar al de la antigua pólvora (empleando un *software* basado en el STANAG 4400). Empleando esta formulación, se fabrican varias matrices de extrusión con el objetivo de fabricar varios lotes prototipo en una planta piloto, con diferentes relaciones de diámetro externo/interno del grano. Una vez fabricados estos prototipos, se ensayan mediante combustión en bomba manométrica (según STANAG 4115), empleando como referencia un patrón de la antigua pólvora laminada. Se muestran, en la tabla 1, los resultados de estas primeras pruebas, con la vivacidad relativa porcentual con respecto al patrón:

Lote	Vivacidad con respecto a la referencia (%)
1	90
2	108
3	107
4	114
5	116
6	118
7	104
8	110
9	106
10	100
11	87
12	98

Tabla 1. Vivacidades relativas con respecto al patrón obtenidas durante la primera iteración a escala prototipo

Aunque alguno de los lotes prototipo fabricados presentó vivacidades muy parecidas al patrón, estos lotes tenían la desventaja de una densidad gravimétrica excesivamente baja, lo cual puede provocar que no sea posible cargar en los suplementos la cantidad de pólvora necesaria para alcanzar los requisitos balísticos. Hubo que reformular el propulsante apuntando a un calor de explosión más alto. Se fabricaron nuevos lotes prototipos con esta nueva formulación empleando varias matrices (menos que en la primera iteración, dado que fue posible descartar algunas geometrías en base a los resultados obtenidos en bomba manométrica). En esta segunda iteración, se obtuvieron los resultados en bomba manométrica que se muestran en la tabla 2, tomando como referencia la antigua pólvora laminada.

Lote	Vivacidad con respecto a la referencia (%)
1	80
2	90
3	81
4	95

Tabla 2. Vivacidades relativas con respecto al patrón obtenidas durante la segunda iteración a escala prototipo

El lote N.º4 fue el que presentó la vivacidad más parecida al patrón, con una densidad gravimétrica superior a los lotes de la primera iteración. Es por esto por lo que se decidió llevar este lote a pruebas de fuego en mortero probeta (instrumentado con sensores de presión piezoeléctricos y radar Doppler). Se muestran a continuación los resultados de la prueba balística con la velocidad en boca del proyectil

y presión máxima en la recámara, en la serie de uniformidad a carga máxima, como porcentaje sobre la velocidad nominal y presión máxima admisible del disparo.

Velocidad media (%)	Presión máxima (%)
100,3	86,7

Tabla 3. Resultados pruebas balísticas segunda iteración lote prototipo a escala prototipo

Los resultados de estas primeras pruebas balísticas fueron positivos ya que se alcanzó la velocidad nominal de la munición, manteniendo la presión máxima por debajo del límite admisible. Sin embargo, se detectó que la densidad gravimétrica de esta pólvora no permitía el cargado de los suplementos con mucha holgura, de forma que esto puede ser un problema a posteriori, debido a la variabilidad intrínseca del proceso industrial, dándose la posibilidad que en algún lote industrial se obtuviera una vivacidad ligeramente menor. Para corregir esto, se decidió fabricar dos nuevos lotes prototipo, reduciendo el tamaño exterior del grano, con el objetivo de aumentar la densidad gravimétrica, pero manteniendo la vivacidad dinámica en valores similares. Se obtuvieron, con cada uno de los lotes, los resultados en bomba manométrica que se muestran en la tabla 4.

Lote	Vivacidad con respecto a la referencia (%)
1	85,7
2	93,3

Tabla 4. Vivacidades relativas con respecto al patrón obtenidas durante la tercera iteración a escala prototipo

Se selecciona el lote N.º 2 para ser llevado a prueba de fuego por ser el que presentó un comportamiento más similar con respecto a la referencia. Se obtuvieron los resultados en pruebas balísticas a carga máxima que se muestran en la tabla 5, pudiendo cargar la pólvora con holgura en el suplemento.

Velocidad media (%)	Presión máxima (%)
100,5	87,8

Tabla 5. Resultados pruebas balísticas tercera iteración lote prototipo a escala prototipo. Fabricación y validación del lote preindustrial

En vista de los resultados positivos, se decide pasar a la fabricación y validación de un lote a escala industrial empleando la misma formulación y geometría obtenidas en el lote N.º 2 de la tercera iteración. Para esta primera experiencia piloto, se obtuvo una vivacidad relativa del 97 %, mediante ensayo en bomba manométrica, con respecto a la pólvora antigua. Se efectuaron pruebas balísticas de validación, para asegurar el correcto comportamiento del propulsante en todo el rango de temperaturas de uso de la munición. Como se muestra en la tabla 6, los resultados de estas pruebas balísticas fueron positivos, y por tanto se decidió congelar esta configuración del propulsante y pasar a las pruebas de calificación del producto.

Velocidad media (%)	Presión máxima (%)
100	77,5

Tabla 6. Resultados pruebas balísticas de validación con el lote industrial

3. Principales pruebas de validación realizadas sobre la nueva gama de propulsantes para granadas de mortero de 81 y 120 mm

El proceso de desarrollo de las pólvoras de doble base extruidas en forma de granos cilíndricos iniciado por EXPAL comenzó en 2011, con los primeros lotes de pólvoras GDB112 y GDB113, para suplemento y cartucho de granadas de 81 mm, respectivamente. En 2014, dio comienzo el desarrollo, para las pólvoras de granada de 120 mm. Sobre estos lotes, EXPAL ha realizado un extenso trabajo de validación,

mediante una gran diversidad de ensayos, hasta que finalmente en 2017 se completó la validación necesaria para las combinaciones de GDB112 (suplemento) y GDB113 (cartucho) para granadas de mortero de 81 mm, y de GDB108 ECO (cartucho) y GDB115 (suplemento) para la granada de mortero de 120 mm. En los siguientes subapartados se describen brevemente, las principales pruebas superadas.

3.1. Pruebas evaluación balística de lotes piloto y pre-industriales

Las combinaciones de pólvora GDB112 y GDB113 para granadas de 81 mm y de GDB115 y GDB108 para granadas de 120mm han sido sometidas a varias pruebas balísticas en las instalaciones de EXPAL con el fin de validar el comportamiento balístico de los primeros lotes y de verificar que estas nuevas pólvoras cumplen todos los requerimientos en cuanto a características balísticas se refiere.

Una vez que los lotes piloto cumplieron los requerimientos exigidos, se fabricaron los lotes preindustriales, los cuales fueron sometidos a pruebas balísticas en el Centro de Ensayos de Torregorda (Cádiz) con resultados positivos.

La tabla 7 permite visualizar de una forma sencilla las pruebas que han superado cada una de las pólvoras aquí mencionadas.

Pólvora	**Granada**	**Lugar/Año**	**Pruebas evaluación internas a 21 ºC**	**Pruebas evaluación internas lote a temperaturas extremas**	**Temperaturas extremas lote pre- industrial**
GDB112 Usada en suplemento	81 mm	Superadas en:	2013	2014	2015
		Centro de ensayo:	EXPAL	EXPAL	Centro de Ensayos Torregorda
GDB113 Usada en cartucho	81 mm	Superadas en:	2013	2014	2015
		Centro de ensayo:	EXPAL	EXPAL	Centro de Ensayos Torregorda
GDB115 Usada en suplemento	120 mm	Superadas en:	2015	2015	2015
		Centro de ensayo:	EXPAL	EXPAL	Centro de Ensayos Torregorda
GDB108 Usada en cartucho	120 mm	Superadas en:	2015	2015	2015
		Centro de ensayo:	EXPAL	EXPAL	Centro de Ensayos Torregorda

Tabla 7. Resultados pruebas balísticas de validación con el lote industrial

3.2. Pruebas ANEXO A del STANAG 4225

Las nuevas pólvoras de mortero para 81 mm y 120 mm han sido sometidas a la calificación según el anexo A del STANAG 4225. En concreto, las pruebas realizadas son: «MOP Trial», «Blast Overpressure» y «Wet propellant efficiency trial». Todas estas pruebas han sido superadas con éxito para las pólvoras mencionadas, según se muestra en la tabla 8.

Pólvora	**Granada**	**Lugar/ Año**	**STANAG 4225 (ANEXO A)**		
			MOP Trial	**Blast Overpressure**	**Wet propellant efficiency trial**
GDB112 Usada en suplemento	81 mm	Superada en:	2016	2016	2016
		Centro de ensayo:	Centro de Ensayos Torregorda	Centro de Ensayos Torregorda	EXPAL

Pólvora	Granada	Lugar/ Año	STANAG 4225 (ANEXO A)		
GDB113 Usada en cartucho	81 mm	Superada en:	2016	2016	2016
		Centro de ensayo:	Centro de Ensayos Torregorda	Centro de Ensayos Torregorda	EXPAL
GDB115 Usada en suplemento	120 mm	Superada en:	2016	2016	2016
		Centro de ensayo:	Centro de Ensayos Torregorda	Centro de Ensayos Torregorda	EXPAL
GDB108 Usada en cartucho	120mm	Superada en:	2016	2016	2016
		Centro de ensayo:	Centro de Ensayos Torregorda	Centro de Ensayos Torregorda	EXPAL

Tabla 8. Resultados pruebas calificación ANEXO A de STANAG 4225

3.3. Pruebas para determinar la corrección en velocidad por variación en temperatura

Con el fin de tener caracterizado el comportamiento de las combinaciones de pólvoras para granada de 81 mm y de 120 mm a diferentes temperaturas, EXPAL realizó una serie de ensayos balísticos en instalaciones propias. Se trata de una caracterización extensa, realizando series de disparos a todas las cargas, con uno o varios tubos y a 5 temperaturas distintas (-46 ºC, -10 ºC, +21 ºC, +36 ºC y +63 ºC).

Estas pruebas (ver tabla 9) han permitido tener un amplio conocimiento del comportamiento del propulsante en función del tubo, temperatura y carga. Esta caracterización, es también de gran interés para los cálculos de balística exterior, puesto que, es información de relevancia para la elaboración de tablas de tiro, y, por lo tanto, en la estimación del alcance de la munición.

Pólvora	Granada	Lugar/ Año	Pruebas balísticas a todas las cargas varias temperaturas (-46 ºC, -10 ºC, +21 ºC, +36 ºC, +63 ºC)
GDB112 Usada en suplemento	81 mm	Superada en:	2017
		Centro de ensayo:	EXPAL (evaluado en 2 tubos: 1,15 y 1,45 m)
GDB113 Usada en cartucho	81 mm	Superada en:	2017
		Centro de ensayo:	EXPAL (evaluado en 2 tubos: 1,15 y 1,45 m)
GDB115 Usada en suplemento	120 mm	Superada en:	2016
		Centro de ensayo:	EXPAL (evaluado en 1 tubo:1,60 m)
GDB108 Usada en cartucho	120 mm	Superada en:	2016
		Centro de ensayo:	EXPAL (evaluado en 1 tubo:1,60 m)

Tabla 9. Resultados pruebas de evaluación de comportamiento a temperatura

3.4. Pruebas de laboratorio-análisis químicos

Además de las pruebas anteriormente mencionadas, EXPAL ha realizado una calificación interna según STANAG 4170 de las pólvoras GDB112, GDB113, GDB115 y GDB108.

España no dispone de un organismo oficial acreditado para certificar los ensayos correspondientes a STANAG 4170. EXPAL dispone de instalaciones para poder realizar pruebas descritas en dicho estándar, a nivel interno. Debido al gran interés de la información que aportan los ensayos, se realizaró la calificación interna para la nueva gama de pólvoras. Las pruebas que EXPAL ha realizado en la calificación interna según STANAG 4170 de dichas pólvoras son:

- **Estabilidad química según STANAG 4582.** Prueba realizada para evaluar si el propulsante es químicamente estable durante 10 años a 25 ºC.
- **Estabilidad química mediante envejecimiento según AOP 48.** Prueba realizada para evaluar si el propulsante es químicamente estable durante 10 años a 25 ºC.
- **Compatibilidades según STANAG 4147.** Prueba para evaluar la compatibilidad química de los propulsantes con los materiales que estén directamente en contacto con él.
- **Sensibilidad al impacto según STANAG 4489.** Prueba para evaluar la sensibilidad al impacto del propulsante.
- **Sensibilidad a la fricción según STANAG 4487.** Prueba para evaluar la sensibilidad a la fricción del propulsante de estudio.
- **Sensibilidad a la descarga electrostática según norma EN 13938-2.** Prueba para evaluar la sensibilidad del propulsante a las descargas electrostáticas.
- **Temperatura de ignición según STANAG 4491.** Prueba que permite conocer la temperatura a la que inicia el propulsante.
- **Cambio de propiedades tras envejecimiento acelerado según AOP-7.** En esta prueba se envejece la pólvora de estudio y se somete de nuevo a las pruebas de sensibilidad al impacto, a la fricción y a la descarga electrostática. De esta manera permite evaluar cómo ha cambiado la sensibilidad del propulsante ante dichos efectos.

En todos casos, los resultados fueron positivos, por lo que se garantiza la seguridad de la munición en lo referente a la nueva gama de propulsantes.

4. Conclusiones

En los últimos años, EXPAL ha realizado un trabajo de desarrollo y validación con el fin de sustituir las pólvoras laminadas y en forma de filamentos, para granada de mortero, por una nueva gama de propulsantes de doble base con disolventes extruidos. Este esfuerzo ha culminado en la validación y calificación a nivel interno de una gama de productos que, manteniendo las características balísticas de presión y velocidad de la solución tradicional, garantiza el comportamiento seguro y repetitivo de la munición, mejorando en seguridad y eficiencia del proceso de fabricación. Entre las pruebas de validación realizadas, se ha superado con éxito el STANAG 4225 (anexo A), STANAG 4170 y se ha caracterizado el comportamiento a diferentes temperaturas.

Agradecimientos

Parte de este proyecto fue llevado a cabo en el marco del proyecto INNPACTO «Smart Propellants» (IPT/2011/0712/020000) del Ministerio de Economía y Competitividad. Los investigadores agradecen a Ángel Zubero y a todos los miembros del equipo del Centro Tecnológico de Materiales Energéticos – Propulsantes (MAXAM), así como al personal técnico de la Fábrica de Propulsantes de EXPAL Propellant Systems, por su excelente trabajo y compromiso en este proyecto.

Referencias

1. *Definition and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants. STANAG 4115 (Edition 2). Brussels: Military Agency for Standardization, 1997.*
2. *The Safety Evaluation of Mortar Bombs. STANAG 4225 (Edition 2). Brussels: Military Agency for Standardization, 2001.*
3. *Derivation of Thermochemical Values for Interior Ballistic Calculation. STANAG 4400 (Amendment 1). Brussels: Military Agency for Standardization, 1993.*
4. *Principles and methodology for the qualification of explosive materials for military use. STANAG 4170 (Edition 3). Brussels: Military Agency for Standardization, 2008.*

5. *Explosives, nitrocellulose-based propellants, stability test procedures and requirements using stabilizer depletion. AOP-48 (Edition 2). Brussels: Military Agency for Standardization, 2008*
6. *Explosives, chemical compatibility with munition components (non-nuclear applications). STANAG 4147 (Edition 3). Brussels: Military Agency for Standardization, 2013.*
7. *Explosives, nitrocellulose-based propellants, stability test procedure and requirements using heat flow calorimetry. STANAG 4582 (Edition 1). Brussels: Military Agency for Standardization, 2004.*
8. *Explosives, impact sensitivity tests. STANAG 4489 (Edition 1). Brussels: Military Agency for Standardization, 1999.*
9. *Explosive, friction sensitivity tests. STANAG 4487 (Edition 2). Brussels: Military Agency for Standardization, 2009.*
10. *Explosives, thermal sensitiveness and explosiveness test. STANAG 4491 (Edition 2). Brussels: Military Agency for Standardization, 2015.*
11. *Manual of data requirements and tests for the qualification of explosive materials for military use. AOP-7 (Edition 2). Brussels: Military Agency for Standardization, 2003.*
12. *Explosivos para uso civil. Propulsantes y propulsores para cohetes. Parte 2: Determinación de la resistencia a la energía electrostática. UNE-EN 13938-2 (Edición 2). España: Asociación Española de Normalización y Certificación, 2005.*

Nanotecnología aplicada a la balística forense

Ollero Moya, Montserrat[1,*], Cantero Obregón, Antonio[2]

[1*] Academia de Oficiales de la Guardia Civil. Dama alférez cadete. Fase de formación. Cuerpo de la Guardia Civil. Calle Princesa s/n. 28300-Aranjuez. Madrid. montserratollero@guardiacivil.es (MOM).

[2] Escuela Politécnica Superior del Ejército. Profesor titular. Doctor ingeniero. Comandante. Cuerpo de Ingenieros Politécnicos del Ejército de Tierra. Calle Joaquín Costa, 6. 28002- Madrid. acanobr@oc.mde.es (ACO).

Resumen

La tecnología ha evolucionado a lo largo de los años. Una rama reciente de ella es la nanotecnología. Ofrece soluciones en ámbitos multidisciplinares como son las ciencias forenses. Por otro lado, la balística forense se encarga de la individualización de un arma mediante las señales que quedan registradas en el casquillo y/o proyectil tras el disparo.

De esta manera, por ejemplo, se puede conocer el arma exacta. Esto es útil para investigar y resolver los delitos en los que intervienen armas de fuego, además de ser empleado para el análisis de huellas dactilares y de residuos de disparo, campos de las ciencias forenses en los que sí se emplea la nanotecnología. El desarrollo de la nanotecnología hace necesaria la existencia de equipos e instrumentación específicos para poder observar y analizar las muestras de estudio a nivel nanométrico.

El objeto del artículo es analizar la nanotecnología como herramienta para los estudios forenses de la balística. Para ello, se estudian los diferentes equipos que son susceptibles de ser empleados es este campo. Por último, se detallan algunas aplicaciones de esta tecnología dentro del ámbito del análisis balístico forense.

Para emplear equipos a escala nanométrica, primero es necesario preparar el material para su estudio. Un tipo de instrumentación aconsejable a emplear es el microscopio de fuerzas atómicas (AFM), ya que deteriora menos la muestra tras su análisis.

Hoy en día, en la Guardia Civil, se emplea esta técnica para la práctica forense apoyándose en organismos de investigación externos. Se puede plantear el que disponga de equipos y personal cualificado para afrontar este tipo de análisis así como de otros análisis no propiamente forenses de interés para el Cuerpo.

Palabras clave

Nanotecnología, balística, forense, microscopio de fuerzas atómicas, ciencias forenses, huellas dactilares, residuos de disparo.

1. Introducción

El inicio de la rama de las ciencias forenses, conocida como balística forense, data de 1915, cuando tras un crimen ocurrido en Kansas un jornalero fue acusado de asesinar a dos víctimas por tener en su poder un arma que se correspondía con el calibre de los proyectiles hallados en los cuerpos de las víctimas. Albert Hamilton presentó ante el juez pruebas que declaraban culpable al jornalero, pero se requirió una segunda opinión. En este segundo estudio, se descubrió que el cañón del arma perteneciente al acusado estaba tan sucio que demostraba llevar tiempo sin usarse. Además, las marcas que dejaba ese arma en los proyectiles eran diferentes a las presentadas en los proyectiles que se encontraban en los cuerpos de las víctimas.

Esta técnica fue evolucionando debido a la necesidad de resolver más crímenes, entre los cuales destaca el de Washington DC en el año 2002 (un francotirador asesinó a gente de manera aleatoria) [1].

La nanotecnología comienza en 1959 con un discurso que tuvo lugar en la Universidad de Caltech en California, ofrecido por el físico norteamericano Richard Feynman, siendo el primero en hablar de esta novedosa tecnología y de las posibilidades que presenta [2]. Sin embargo, es en 1974 cuando se define por primera vez el concepto de nanotecnología en la Universidad de Ciencias de Tokio por Norio Taniguchi [3].

Por lo tanto, se ha observado una evolución de la tecnología a lo largo de los años, en concreto de la nanotecnología. Es este, un campo reciente que puede ofrecer soluciones en otros ámbitos multidisciplinares y multisectoriales y que tiene implicaciones importantes tanto en ciencia como en tecnología [4]. Además, ha comenzado a jugar un papel importante durante la investigación de incidentes con armas de fuego [5].

El campo de la nanotecnología se encuentra en pleno crecimiento y los investigadores tienen muchas esperanzas puestas en esta tecnología en cuanto a las mejoras que propone ante los problemas planteados, esperando que lleguen a cumplirse en un futuro próximo.

Es necesario añadir que la nanotecnología es clave para el desarrollo industrial y tecnológico de España, aumentándose así su competitividad y su independencia [6].

El objetivo principal de esta comunicación es conseguir estructurar la ciencia de la balística forense dentro del entorno nanotecnológico, así como identificar los posibles beneficios que esta «nueva» tecnología podría aportar a este campo que es de gran importancia para la Guardia Civil.

2. Desarrollo

2.1. Consideraciones previas

La nanociencia consiste en el estudio de la materia a escala nanométrica, donde cabe la posibilidad de que surjan propiedades y fenómenos diferentes de los que presenta la materia macroscópica y distintos a los átomos y moléculas individuales [7].

La nanotecnología se puede definir como la tecnología que tiene aplicaciones como la fabricación de materiales, estructuras, dispositivos y sistemas funcionales a través del control y ensamblado de la materia a escala del nanómetro, así como la aplicación de nuevos conceptos y propiedades que surgen como consecuencia de esta escala tan reducida, en el mundo real [7].

Los nanomateriales son aquellos materiales que tienen un tamaño de nano-escala, es decir, con propiedades morfológicas inferiores al micrómetro en al menos una dimensión [4].

Las ciencias forenses son un campo de estudio complejo y multidisciplinar, en la que se integran otras ciencias como son la médica, la jurídica y la físico-química, empleadas para conseguir el esclarecimiento de los sucesos criminales que se produzcan [8].

La balística forense es una rama especial de la ciencia balística, basada en las relaciones de identidad existentes entre las lesiones o marcas que presentan los casquillos y proyectiles, una vez percutidos y disparados respectivamente, y las partes del arma que, al interaccionar con aquellos, producen dichas señales identificativas [9].

La nanoindentación consiste en la medición de propiedades mecánicas en la superficie del material, midiéndose la dureza y el módulo de elasticidad, entre otros. Es necesario destacar que la nanoindentación también se presenta para investigaciones consideradas fundamentales en las ciencias de los materiales, como la localización de deformaciones a nanoescala [10].

2.2. Principales avances

En los últimos años, la nanotecnología ha experimentado un crecimiento rápido en el ámbito forense.

Esta tecnología tuvo un impacto destacado en el desarrollo de la investigación de la huella latente, la cual se deja en cualquier objeto debido al sudor y a las glándulas sebáceas de la piel. Es invisible y precisa de técnicas ópticas para su descubrimiento y observación, además de emplearse polvos específicos para su revelación.

¿Cómo resultaría útil la nanotecnología en este tipo de análisis forense? Pues bien, tras un estudio realizado en la Universidad de Sidney, se consiguió demostrar que con polvos de óxido de zinc (ZnO) a nanoescala, no solo se obtienen imágenes más claras y de mejor calidad, sino que son fluorescentes bajo luz UV. Esto permite, utilizarse en condiciones húmedas. Además, la empresa ROAR Particles ha creado unos nanopolvos que permiten identificar los productos químicos, tanto los residuos por contacto con otros materiales como los excretados (sudor), que forman parte de la huella dactilar. Esto permite la identificación de personas que hayan manipulado drogas o explosivos [11].

Otra utilidad en este campo se relaciona con la resolución de hechos delictivos en los que intervienen armas de fuego. Así, los investigadores de la Universidad de Leicester han desarrollado una técnica para casos en los que alguien deja impregnada una huella en un casquillo. Esta consiste en el empleo de un revelador a nanoescala y una fuente de rayos X que permiten crear una imagen de las huellas dactilares impregnadas en el casquillo aunque este haya sido limpiado [11].

2.3. Instrumentación nanométrica

El nanoanálisis es una de las técnicas que se emplea en las ciencias forenses. Este, incluye el empleo de microscopios electrónicos, como son el de transmisión y el de barrido, la microscopía Raman y los microscopios de sonda de barrido, entre los que destacan el microscopio de fuerza atómica y el microscopio de efecto túnel [5].

- Microscopía electrónica

El microscopio electrónico de transmisión emplea una técnica consistente en el paso de haz de electrones a través de lentes electromagnéticas sobre una muestra depositada sobre una rejilla. De esta manera, los electrones chocan con átomos de la muestra o atraviesan la misma. Se emplea para determinar tamaños o para proporcionar información sobre la composición con resolución espacial, aunque lo más destacado es la posibilidad, que presenta, de acoplarse a otras técnicas. La muestra empleada debe muy delgada,

y por lo tanto, debe ser tratada con anterioridad, siendo una preparación complicada y con una inversión grande de tiempo. Además, presenta una gran ventaja, ya que cuenta con una gran resolución que le permite observar átomos individuales. Se puede observar una imagen del mismo en la ilustración 1.

Ilustración 1. Microscopio electrónico de transmisión.
Fuente: elaboración propia.

El microscopio electrónico de barrido produce imágenes ampliadas en gran medida mediante el uso de electrones y rayos X focalizándose sobre la superficie de la muestra a analizar. En este caso, no se requiere un espesor muy fino del material, pero se hace necesario que sea conductor, ya que si la muestra es aislante se hace necesario recubrir la superficie, y de esta manera se podría perder información valiosa. El análisis realizado con este tipo de microscopio permite obtener una imagen en tres dimensiones de manera directa, mostrándose a su vez sus características. Se puede apreciar este microscopio en la ilustración 2.

Ilustración 2. Microscopio electrónico de barrido.
Fuente: elaboración propia.

- Microscopía de sonda de barrido

El microscopio de efecto túnel [12] muestra información sobre las propiedades electrónicas que presentan los materiales que se encuentran a escala nanométrica, así como permitir caracterizarlas. También

puede ser empleado para mover los átomos de los que se componen los nanomateriales de manera individual, pudiendo realizarse cambios en la composición molecular de la materia.

El microscopio de fuerzas atómicas [12] permite medir fuerzas y manipular los pequeños materiales de estudio. Mediante este microscopio se obtiene imágenes de alta resolución en tres dimensiones. Añadir, que no se requiere ninguna preparación previa de la muestra que pueda dañarla, lo que hace que sea una técnica no invasiva.

La microscopía de fuerzas atómicas [13] es una técnica ya empleada en las ciencias forenses que consiste en el estudio de las características morfológicas de los residuos de disparo, mediante la investigación de las partículas depositadas en las manos del individuo que efectúa un disparo y la bala, además de conseguir establecer la distancia a la que ha tenido lugar el disparo. Por lo tanto, el microscopio de fuerzas atómicas es y puede llegar a ser una herramienta potencial para la investigación, caracterización y distinción de evidencias para ayudar en las investigaciones forenses a nivel de nanoescala. Puede observarse un detalle de este microscopio en la ilustración 3.

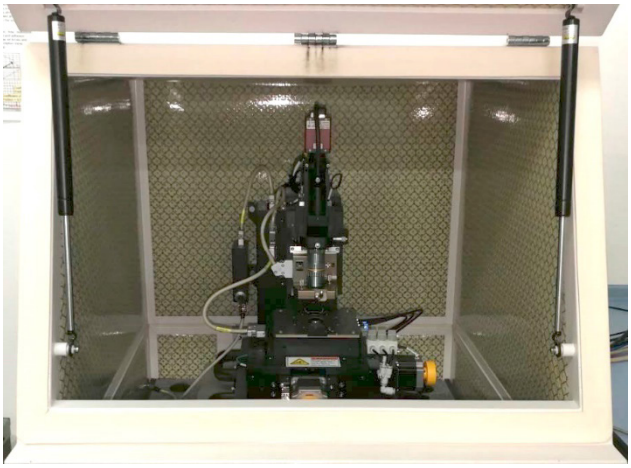


Ilustración 3. Microscopio de fuerza atómica. Fuente: elaboración propia.

3. Supuestos de estudio (resultados y discusión)

La Guardia Civil contempla dentro de su acción forense el empleo de técnicas a nivel nanométrico en disciplinas forenses, tales como la obtención de huellas dactilares o el análisis de residuos de disparo. Sin embargo, a día de hoy, no hay investigaciones llevadas a cabo a nivel nanotecnológico de aplicación a la balística forense en este Cuerpo. A continuación se van a explicar brevemente una serie de supuestos en los que podría ser útil la nanotecnología para la balística forense.

- Empleo de la técnica de la nanoimpresión para imprimir un número de serie en la superficie de la cabeza de cierre que dejaría marca en el culote del casquillo al efectuarse un disparo. Esta impresión sería imperceptible al ojo humano siendo necesario el empleo de microscopios a nivel nano como podría ser el microscopio de fuerzas atómicas, que es uno de los menos invasivos, y de esta manera no se dañaría la evidencia.

  Este supuesto presenta algunos inconvenientes ya que las piezas de un arma son intercambiables, y sería necesario realizar un cambio en el reglamento de armas. Pero para que esta técnica sea útil se debería disponer de una base de datos con el número de serie del arma y su número de cabeza de cierre correspondiente, una vez que sale de la fábrica.
- Empleo de la técnica de la nanoindentación, junto con el microscopio de fuerzas atómicas. Sin embargo, se ha desarrollado una técnica híbrida en la que se incorpora al nanoindentador un microscopio electrónico de transmisión proporcionando así imágenes in situ de la evolución que experimenta la estructura [10].

Se debe disponer de una base de datos para recoger la información relativa a la munición de cada fábrica, así como alguna posible marca o deformación característica dejada por la máquina de fabricación. Es necesario una constante actualización de dicha base de datos, lo que podría considerarse un inconveniente debido a la pérdida de tiempo al comprobar y actualizar los cambios producidos en los datos. Además, habría que establecer contacto con todos los países fabricantes de munición. De esta manera, se fomentaría la colaboración y cooperación entre países, siendo una base de datos internacional, y todas las policías de los distintos países podrían acceder a ella. Así, se podrían perseguir delitos de tráfico de armas y munición, así como su falsificación.

4. Conclusiones

Los estudios llevados a cabo por los miembros de la Guardia Civil, pertenecientes al Departamento de Balística y Trazas Instrumentales del Servicio de Criminalística de la Guardia Civil, para las averiguaciones del arma de fuego que ha tomado parte en algún hecho delictivo se realizan con éxito con el material y equipos de los que disponen actualmente.

Además, a la nanotecnología aún le queda camino por avanzar, aunque ya ha comenzado a formar parte en algunos campos de las ciencias forenses, útil para la resolución de hechos delictivos en los que intervienen armas de fuego. Por ejemplo, para sacar huellas dactilares (identificación), o incluso para el análisis de los residuos de disparo (química).

A día de hoy, no se dispone de material nanotecnológico para los estudios que se realizan en balística forense, pero viendo las técnicas de nanoimpresión y nanoindentación, podría estudiarse la posibilidad de implementar esta novedosa tecnología. Para ello, primero sería necesario observar su utilidad, así como los beneficios que aportaría para la resolución y averiguación de delitos.

La línea de investigación forense a nivel nanotecnológico es un campo que está abierto a nuevas acciones. Por esta razón, no se descarta la posibilidad de incorporar técnicas a nivel nanotecnológico en esta rama de las ciencias forenses, ya que viendo los avances que va experimentando esta tecnología con el paso de los días, se podría facilitar el trabajo realizado por los peritos en el departamento, así como agilizarlo.

No se hace necesaria la adquisición de estos medios de visualización y estudio a nivel nano, ya que se pueden establecer relaciones con empresas o institutos que se dediquen a ello, como podría ser el Instituto Madrileño de Estudios Avanzados de Materiales. En este instituto, disponen de los instrumentos nanotecnológicos más recientes y está formado por un grupo de expertos en ese campo.

Se observa que la instrumentación empleada para el nivel nano presenta muchas funciones y se pueden obtener bastantes características de determinados materiales. Hay que añadir que es necesario reducir el material en cuestión para su estudio, por lo tanto se podría dañar la evidencia. De las investigaciones realizadas se aprecia que el AFM sería el microscopio más adecuado ya que es el menos agresivo para la muestra.

Agradecimientos

Agradezco a la Escuela Politécnica Superior del Ejército, el haber podido realizar el trabajo, así como realizar una mención especial a mi tutor el comandante D. Antonio Cantero Obregón, por el apoyo y la orientación que he recibido en todo momento.

También quiero agradecer la ayuda y los medios ofrecidos para poder llevar a cabo dicho proyecto al Servicio de Criminalística de la Guardia Civil, al Instituto Madrileño de Estudios Avanzados de Materiales y al Servicio de Armamento y Equipamiento Policial de la Guardia Civil.

Referencias

1. *TVE. (31 enero, 2016). Documental- Técnicas forenses pioneras: balística forense [Internet]. [cited 2018 Abr 16]. Available from: https://www.youtube.com/watch?v=k3-o3rZa8HE*

2. *The room bottom. (s.f.). Historia de la nanotecnología [Internet]. [cited 2018 May 07]. Available from: https://theroombottom.wordpress.com/historia-de-la-nanotecnologia/*
3. *Euroresidentes.com. (s.f.). Historia de la nanotecnología [Internet]. [cited 2018 May 07]. Available from: https://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/historia_nanotecnologia.htm*
4. *Díaz del Castillo Rodríguez, F. Introducción a los nanomateriales. México: Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán; 2012.*
5. *Pandey, G., Tharmavaram, M., Rawtani, D., Kumar, S., y Agrawal, Y. Multifarious applications of atomic force microscopy in forensic science investigations. Forensic Science International. 2017; 273(1): 53-63.*
6. *Rivera de Lucas, C. Investigación en nanotecnología aplicada a sistemas para la defensa. Madrid: Ingeniería y Servicios Aeroespaciales. 2010*
7. *Martín Gago, J. y Briones Llorente, C. NANO-INTRO: El nano-mundo a vista de pájaro. En Nanociencia y nanotecnología. Madrid: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. 2008:17-46.*
8. *8. Fuertes Rocañín, J., Cabrera Forneiro, J. y Serrano Gil, A. Esquemas en ciencias forenses y derecho sanitario. Madrid: Arán; 2006.*
9. *Verón Bustillo, E.J. Ciencias forenses II (Parte I): balística y trazas instrumentales. Aranjuez: Centro Universitario de la Guardia Civil; 2016.*
10. *Schuh, C.A. Nanoindentation studies of materials. Materialstoday. 2006; 9(5): 32-40.*
11. *Pitkethly, M. Nanotechnology has the potencial to make a positive social contribution in an area it is not normally associated with: solving crimes. Materialstoday. 2009; 12(6): 6.*
12. *Ocw.uc3m.es. (s.f.). Microscopía de efecto túnel y microscopía de fuerza atómica. [Internet]. [cited 2018 May 07]. Available from: http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/microscopia-de-fuerza-atomica/otros-recursos-1/Apuntes_STM_y_AFM_00.pdf*
13. *Pandey, G., Tharmavaram, M., Rawtani, D., Kumar, S., y Agrawal, Y. Multifarious applications of atomic force microscopy in forensic science investigations. Forensic Science International. 2017; 273(1): 53-63.*

I B. Capacidades tecnológicas de armas y municiones

Metodología de caracterización y simulación de sensores inerciales MEMS bajo aceleraciones elevadas

Gómez-López, Miguel[1,*], Lopez Almajano, Alba[2], Urrutxua Cereijo, Hodei[3], Laso Martín, David[4], Sánchez García, Jesús[5], Nieto Illescas, Alberto[6]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). gomezlma@inta.es: (MGL).

[2] Universidad Rey Juan Carlos (URJC). a.lopezalma@alumnos.urjc.es: (ALA).

[3] Universidad Rey Juan Carlos (URJC). hodei.urrutxua@urjc.es: (HUC).

[4] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). lasomd@inta.es: (DLM).

[5] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). sanchezgje@inta.es: (JGS).

[6] Aurea Avionics. alberto.nieto@aureaavionics.com: (ANI).

* Miguel Ángel Gómez López; gomezlma@inta.es: (MGL).

Resumen

Uno de los retos más importantes para poder desarrollar la tecnología de un equipo de navegación inercial, apta para operar embarcado en municiones, sin disparar los costes, es la caracterización de las fuentes de error más significativas que afectan a los sensores inerciales en este tipo de entornos. La mayoría de los sensores comerciales disponibles no han sido nunca caracterizados para estas aplicaciones tan exigentes, o no existen datos del fabricante al respecto.

En este estudio se abordan dos aspectos: 1) la descripción de los distintos ensayos definidos para simular las condiciones mecánicas y térmicas típicas de la operación de municiones, junto con los resultados obtenidos para un sensor de desarrollo propio; y 2) la implementación de un simulador que permite contrastar las distintas fuentes de error teóricas con aquellas encontradas en los ensayos, con el objetivo de poder conocer a priori, dadas ciertas especificaciones del fabricante, si un sensor será o no apto para la aplicación.

En este trabajo se recoge la descripción de un conjunto de test ideadas específicamente para municiones, en particular pruebas de aceleración axial, cambio de temperatura, y altas velocidades de giro. Por un lado, se han analizado los errores de factor de escala, *bias*, *bias instability*, *angle random walk*, *rate random walk*, desalineamiento y por acoplamiento en ejes cruzados. Estos ensayos han sido realizados dentro de los límites de medida operativos de los sensores, así como en condiciones que no han sido en principio contempladas por el fabricante.

Palabras clave

Navegación inercial; municiones guiadas; calibración de sensores; caracterización de errores; *bias instability*; *random walk*.

1. Introducción

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de los errores más característicos de los elementos que componen distintos sensores (giróscopos y acelerómetros) para poder compararlos y elegir entre ellos los que sean aptos para ser sometido a altas dinámicas.

Los sensores utilizados son sensores inerciales con tecnología MEMS (sistemas microelectromecánicos), con la particularidad de que no están diseñados para ser usados en altas dinámicas y, por tanto, van a saturar. Esta elección se debe a dos factores fundamentales, por un lado el coste, y por otro evitar las limitaciones de exportación (ITAR). La elección de los MEMS también viene respaldada por su bajo consumo y su reducido peso, coste contenido, variedad de oferta y proveedores en el mercado, y sin necesidad de mantenimiento.

Los sensores sobre los que se ha trabajado en este proyecto son sensores MEMS de tipo multieje en un chip, esto es, en vez de usar 3 sensores de forma separada, combina dos sensores MEMS en el plano y uno fuera del plano en un mismo chip, lo que ofrece ventajas como: menor tamaño, peso, coste y consumo, mayor facilidad de trabajar con ello, y la capacidad de llevar a cabo una caracterización completa de la unidad en una sola operación [3].

1.1. Caracterización de los errores

Los errores de los sensores inerciales son debidos a imperfecciones mecánicas internas, errores electrónicos, limitaciones de diseño o deficiencias constructivas, entre otros factores. El efecto de estos errores se limita a la precisión y repetitividad de las medidas (ej. *Turn-on to turn-on*), con la que se puede medir la velocidad angular o la aceleración. A continuación, se detallan los errores más característicos que afectan a los sensores inerciales, los cuales se pretende caracterizar. Los errores aleatorios no se pueden compensar.

Los errores de un sensor inercial se pueden dividir en dos categorías: errores estocásticos y errores deterministas. Los errores deterministas son fijos y/o función de la entrada de los sensores, es decir, son aquellos donde no interviene la aleatoriedad, por lo que producirán siempre la misma variación sobre la medida ideal y por lo tanto se pueden caracterizar y corregir. Los errores estocásticos son de naturaleza aleatoria y por tanto, se deberán caracterizar a través de variables estadísticas, en este caso por medio de su varianza [1].

1.2. Errores deterministas

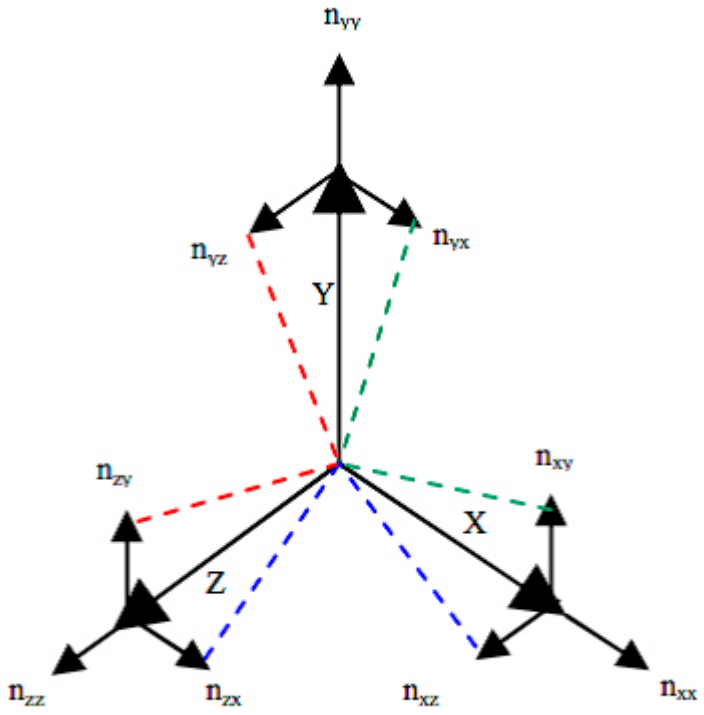
Error de factor de escala: es la variación de la sensibilidad del sensor en cada eje con respecto a su sensibilidad nominal. Para sensores lineales, se caracteriza como la pendiente de la recta de medida entre la señal de excitación y la salida del sensor. Su valor puede ser obtenido empíricamente mediante el método de los mínimos cuadrados.

***Sesgo (Bias)*:** su componente determinista es conocida como *offset*, es la salida producida en ausencia de entrada; es decir, dada una entrada nula, la salida no es nula. Tanto el factor de escala como el *bias* pueden ser caracterizados mediante la ecuación de una recta: , siendo *x* la salida, *S* el factor de escala, *f(x)* la entrada y *b* el bias. Este error está asociado a otros fenómenos no deterministas: *turn-on to turn-on bias variation* o incluso *Rate Random Walk*.

Error de ejes cruzados: cuando se está midiendo en un solo eje, los otros dos ejes deberían proporcionar un valor nulo, por ser teóricamente ortogonales entre sí. Sin embargo, en la práctica, las medidas en un eje afectan a las medidas en los demás. Este error es el denominado error de ejes cruzados (también conocido como *desalineamiento*) y se puede caracterizar imponiendo una entrada no nula a un eje, y observando la variación que sufren los otros dos ejes originada por la entrada no nula del primer eje. Las siguientes ecuaciones se usan para obtener la no ortogonalidad angular sobre un eje particular:

$$\Delta_x = arcsin\left(\frac{n_{yz}}{Y}\right) = arcsin\left(\frac{n_{zy}}{Z}\right)$$
$$\Delta_y = arcsin\left(\frac{n_{xz}}{X}\right) = arcsin\left(\frac{n_{zx}}{Z}\right)$$
$$\Delta_z = arcsin\left(\frac{n_{xy}}{X}\right) = arcsin\left(\frac{n_{yx}}{Y}\right)$$

Y los términos de dichas ecuaciones quedan reflejados en el esquema 1:



Esquema 1. Esquema con los errores cruzados, y sus nomenclaturas. Fuente: [15].

1.3. Errores estocásticos

El método de la varianza de Allan permite caracterizar distintos tipos, como alternativa a la representación clásica de densidad de potencia espectral (PSD), obteniendo una curva característica de varios errores contenidos en los datos medidas de los sensores. El análisis de la varianza de Allan consiste en calcular la varianza

o desviación de la señal promediada en una sucesión de intervalos temporales, y representar esta desviación como una función de los diferentes promedios de tiempo, para luego analizar las regiones características y las pendientes de las curvas de desviación de Allan, permitiendo así identificar los diferentes tipos de ruido [7].

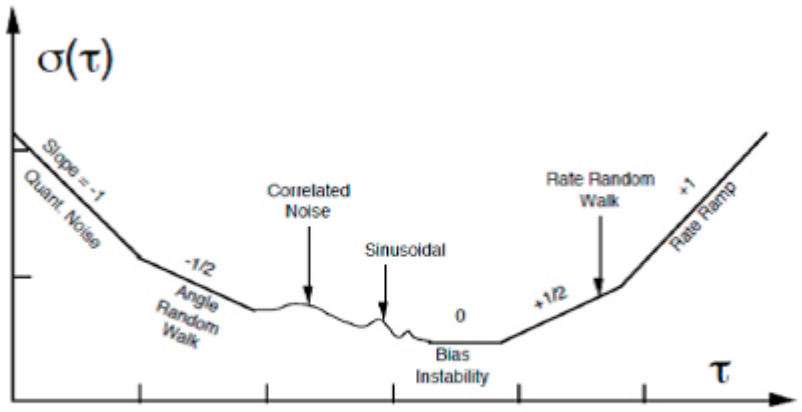


Figura 15: Desviación de Allan en escala logarítmica[12].

Figura 1. Esquema de la varianza de Allan con todas sus partes. Fuente: [10].

Rate Random Walk: existen distintas definiciones respecto al origen de este error ya que algunos consideran que es un error debido a la presencia de ruido que responde a un proceso de Gauss-Markov [10] mientras que otros consideran que es debido a variaciones en la temperatura [11]. El método de Allan es especialmente interesante para visualizar este error, ya que en una gráfica PSD no se visualiza claramente. Sin embargo, debe ser tenido en cuenta que, para que aparezca, hace falta tomar medidas en intervalos de tiempo más largos, de al menos 60 minutos para los MEMS (típicamente) [12].

Ruido blanco termo-mecánico: es también conocido como *Angle Random Walk* para el giróscopo y *Random Velocity Walk* para el acelerómetro. Se define como la acumulación de error en la salida del sensor debido a la presencia de ruido blanco [13]. Este ruido se representa como la pendiente de valor -1/2 en la gráfica de la desviación de Allan.

Turn-on to turn-on bias variation: hace referencia a la variación que sufre el valor del *bias* de forma aleatoria entre cada encendido del dispositivo. No obstante, al ser un fenómeno estocástico, conocido el error de *bias* se puede obtener un rango de valores entre los que se encontrará su variación. Se podría asociar al RRW, pero se ha diseñado una prueba específica para determinarlo.

2. Desarrollo

Existe un amplio abanico de pruebas para calibrar sensores y determinar los distintos errores que pueden aparecer al someterlo a ese tipo de situaciones. La realización de las pruebas de este proyecto se ha hecho en base a distintos métodos de calibración, adaptándolo a las capacidades y tecnologías disponibles en INTA.

Uno de los errores analizados en este trabajo es el denominado *bias* u *offset*; por lo general, este error suele analizarse junto con el factor de escala; esta prueba se realiza de forma distinta dependiendo de si caracterizamos los errores de un giróscopo o un acelerómetro. Otro de los errores deterministas que se han caracterizado en este proyecto es el error de ejes cruzados [17]. Para los errores estocásticos se decide medir con el sensor en estático y analizar la dependencia de estos con la temperatura. Existen distintas opciones de proceder; una de ellas es variar la temperatura en intervalos de 25C desde -40C hasta 85C [18], mientras que otras, implican distintos intervalos de temperatura y límites, por ejemplo, de -30C hasta 70C dejándolo fijo una hora en intervalos de 10C. A continuación, se procede a detallar la realización de los ensayos.

2.1. Cámara climática

Mediante esta prueba se han caracterizado los errores estocásticos y su variación con la temperatura, esto es, los errores *Angle Random Rate* y *Rate Random Walk*. Con la misma electrónica descrita en el apartado anterior se han realizado las pruebas. El procedimiento consiste en introducir los sensores en la cámara climática y, en estáticamente, se somete a los mismos a variaciones de temperatura, lentas y durante intervalos iguales de tiempo. En este caso, se ha variado la temperatura de 10C a 70C en intervalos de 10C y se ha dejado un tiempo de 10 minutos (tiempo insuficiente para intentar determinar el RRW) para cada temperatura una vez que el sensor se ha estabilizado.

2.2. Mesa giroscópica

El montaje sobre el que se ha trabajado se recoge en la siguiente figura. Como se puede ver, se ha utilizado una mesa giroscópica de 3 grados de libertad, que puede alcanzar velocidades de hasta 700º/s. La electrónica ensayada, también en la imagen, se compone de un microcontrolador, los sensores usados, una radio para telemetría y una tarjeta de memoria SD para guardar todos los datos y poderlos analizar después.

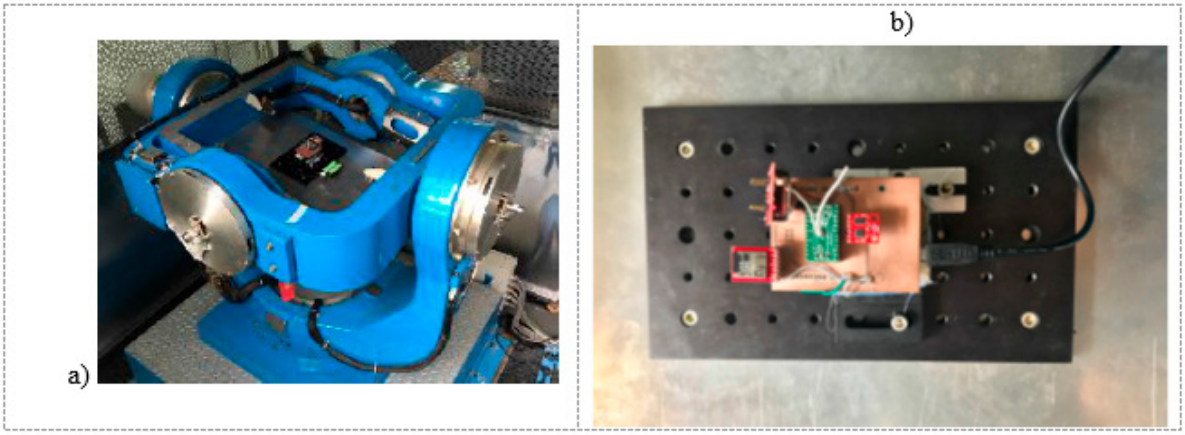


Figura 2. La figura a) recoge la mesa completa con el dispositivo y los sensores; en b) se observa el detalle del dispositivo fabricado con el fin de realizar las pruebas.

2.3. Aceleración centrífuga

Mediante esta prueba se caracteriza el error de *bias* y factor de escala del acelerómetro. En este caso, se toman medidas de 2 segundos a 500 rpm, 1.000 rpm, 1.500 rpm, 2.000 rpm, 2.100 rpm y 2.200 rpm en el eje z. Esto es debido a que, al usar el sensor en altas dinámicas, el único eje que va a ser sometido a fuerza específica es el eje z. El tiempo de 2 segundos es debido a que el vehículo donde se está estudiando incorporar el sensor tiene una fase propulsora que está entre 1,5 y 2 segundos. Los valores de aceleración ensayados se deben a que el vehículo estará sometido a un máximo de 200 g y se quería comprobar si este iba a soportar dicha aceleración; además, se desconocía si el microcontrolador era también capaz de aguantar la aceleración, por lo que es posible que el sensor no sobreviva a esas aceleraciones más tiempo, y tampoco lo haga a más de 150 g de aceleración.

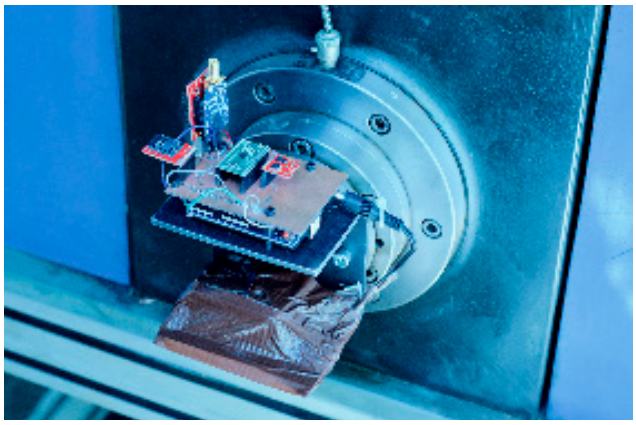


Figura 3. Conjunto mecano-eléctrico usado en la prueba de aceleración.

3. Resultados y discusión

3.1. Mesa giroscópica

Los resultados de la prueba en la mesa giroscópica se recogen a continuación. En ellos se puede analizar dos de los errores deterministas del giróscopo: el sesgo y el error en el factor de escala. Aunque el fabricante nos da unos valores típicos en la documentación del sensor de los mismos, estas pruebas aseguran el valor exacto de nuestro sensor en particular.

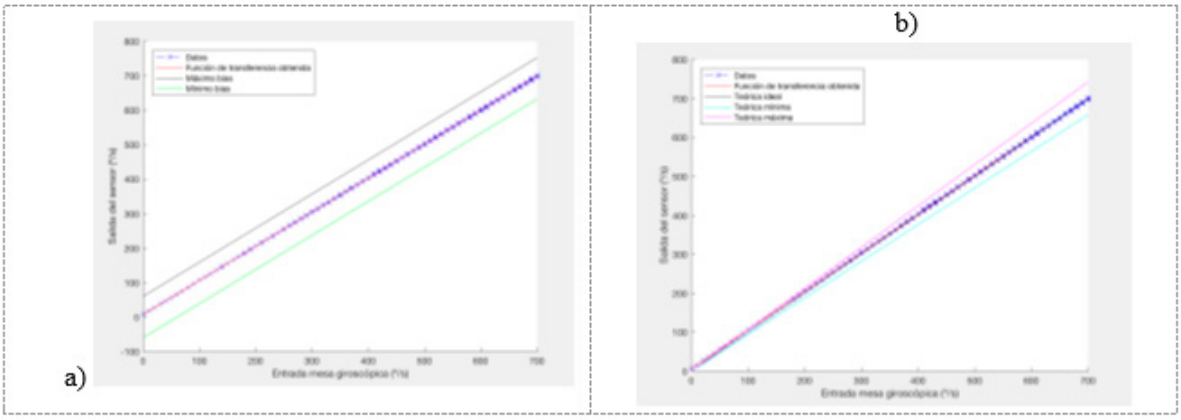


Figura 4. La figura a) recoge la curva de respuesta del giróscopo en eje X; mientras que en b) se observa el eje Y.

Como se puede observar, el sesgo y el factor de escala de nuestro sensor están dentro de los parámetros esperados por el fabricante, pero además ahora poseemos el valor exacto de los mismos.

3.2. Cámara climática

En la cámara climática se puede estudiar tanto un error determinista como los errores estocásticos. Caracterizamos inicialmente la variación con la temperatura del sesgo, comprobando que continúa estando dentro de los límites del fabricante.

^{o}C	Bias eje x giróscopo	Bias eje y giróscopo	Bias eje z giróscopo	Bias eje x acelerómetro	Bias eje y acelerómetro	Bias eje z acelerómetro
5	-17.8619	0.4110	-1.5689	-1.6525	-0.3831	0.9740
10	-13.9831	0.1209	-1.2397	-1.1702	-0.7290	0.9787
20	-6.3425	-0.1845	-0.3030	-1.2536	-0.7986	0.9458
30	-0.5845	0.3408	0.5320	-1.1334	-0.7156	0.5122
40	5.0937	1.1164	1.3538	-0.9037	-0.7793	0.2396
50	9.2000	1.9861	2.0618	-0.8962	-0.7266	0.1422
60	12.8001	3.5033	2.9739	-0.8247	-0.6544	0.1800

Tabla 9: Variación del bias del sensor en según la temperatura.

Figura 5. Resultados de la prueba en la cámara climática para distintos errores y temperaturas.

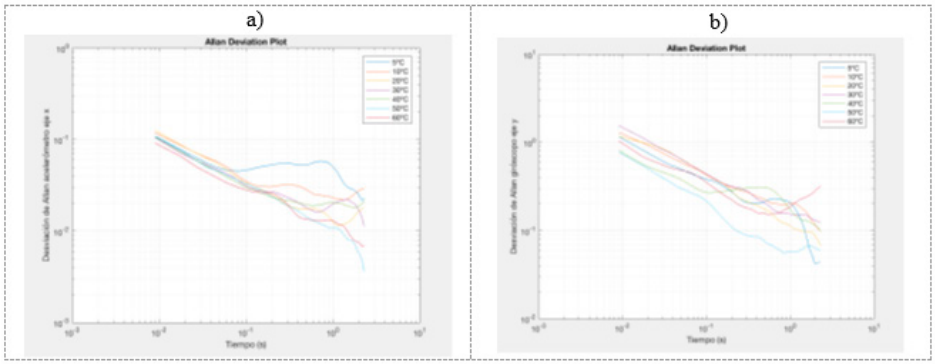


Figura 6. Resultados de la prueba en la cámara climática para distintos ejes (X, Y) analizados mediante la varianza de Allan.

Además, ahora poseemos una *look up table* para descontar el valor de este sesgo, si conocemos la temperatura de nuestra unidad inercial. Esto se hace tanto para el giróscopo como para el acelerómetro. Por otro lado, se observa cómo los errores estocásticos, en función de la temperatura tienen una enorme variabilidad, lo que hará imprescindible el uso de un filtro de Kalman en la unidad de navegación, así como una posible solución será introducir estos errores entre los estados, estimándolos de manera *online* todo el tiempo, en lugar de poseer un modelo y unos parámetros previos, que simplificaría el problema de manera considerable.

3.3. Simulación

La simulación consiste en, dadas las características del sensor por el fabricante, se simula cuál sería la salida de este considerando los errores que puedan perturbar la señal. En algunos casos, esto permitirá descartar directamente algunos sensores. Se ha simulado la salida de nuestro sensor y se han comparado los resultados de la simulación con los obtenidos en las pruebas.

Figura 4. Vehículos empleados para las medidas.

Como se puede observar en ambas figuras, el *software* desarrollado nos da unos resultados cualitativamente semejantes. Esto es suficiente para analizar el sensor en términos de «pasa, no pasa» para una aplicación particular, y algoritmo de navegación particular.

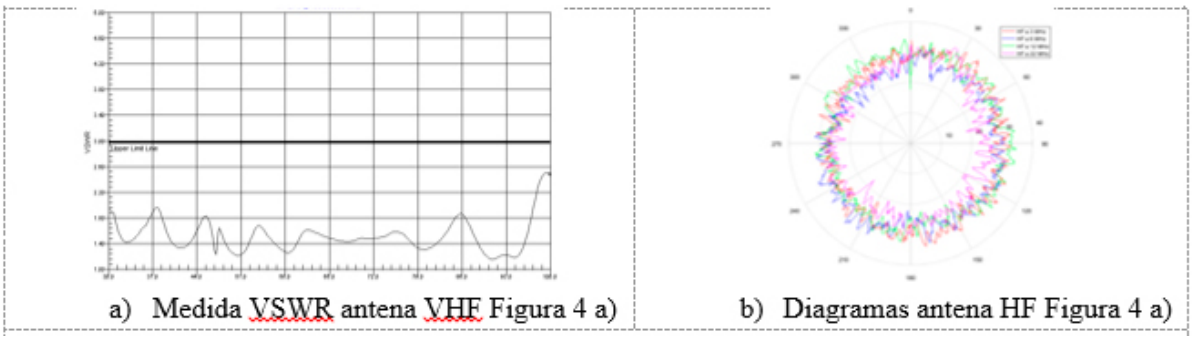


Figura 5. Medida VSWR de VHF y diagramas de HF.

Figura 3. Unidad móvil y levantamiento de diagramas de un vehículo militar.

Por otro lado, y como se ha visto en las pruebas en cámara climática, estas simulaciones deberán incluir la temperatura entre sus *inputs*, ya que la variabilidad de las características de estos «ruidos» con la misma es un efecto dominante.

4. Conclusiones

Se ha evaluado si un sensor de bajo coste, similar al empleado en videojuegos o telefonía móvil, puede ser implantado en vehículos sometidos a dinámicas que implican altas aceleraciones. Para ello, se han realizado distintas pruebas para caracterizar los errores dominantes en este tipo de sensores. Las pruebas realizadas, objeto de desarrollo en este proyecto, han sido: pruebas en máquina de aceleración centrífuga (caracterizando el error *bias* y factor de escala del acelerómetro del sensor), pruebas en mesa giroscópica (caracterizando el sesgo, factor de escala y error de ejes cruzados del giróscopo), y por último las pruebas en la cámara climática, caracterizando el *angle random walk* y *bias instability* (notar que sería posible caracterizar el *rate random walk* también).

Durante el desarrollo de las pruebas, se concluye que este sensor no es el más adecuado para esta misión, pero que de ser necesario, con estos trabajos previos, podría llegar a utilizarse. El principal escollo para su aplicación es la gran variabilidad que hay en sus características, con los cambios en temperatura, y de manera no lineal. Este sensor podría ser utilizado sin embargo mediante un filtro de Kalman, fusionándolo con otros sensores, resultaría válido para aplicaciones no tan exigentes, como municiones de tipo cohete, pero no de tipo proyectil. Por otro lado, se ha concluido que las simulaciones utilizadas son las adecuadas para poder reproducir los errores dominantes en sensores con esta tecnología y prestaciones.

En el futuro. Se propone continuar con el conjunto de pruebas propuesto, pero en sensores de mejores prestaciones, aunque aún de bajo coste, que han aparecido recientemente en el mercado, de tecnología MEMS.

Referencias

1. *The Limits of In-Run Calibration of MEMS Inertial Sensors and Sensor Arrays. Henry Martin, Paul Groves and Mark Newman.*
2. *Strapdown Inertial Navigation Technology, Second Edition. David H. Titterton and John L. Weston.*
3. *http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4966/fichero/e.+Tecnologia+MEMS.pdf*
4. *Giroscopios. Francisco A. Candelas Herías y Juan A. Corrales Ramón.*
5. *Sensor medidor de aceleración. Acelerómetro. Universidad de Sevilla. http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf*
6. *IMU Errors and Their Effects. APN-064. Novatel.*
7. *Allan Variance: Noise Analysis for Gyroscopes. Freescale Semiconductor: AN5087.*
8. *Low-Cost Inertial Sensor Modelling Using Allan Variance. A. A. Hussen, I. N. Jleta.*
9. *IEEE Std 952, IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros Std., 1997.*

10. *IEEE Std 528, Standard for Inertial Sensor Terminology Std., 2001.*
11. *Bias Prediction for MEMS Gyroscopes. M. Kirkko - Jaakkola, J. Collin y J. Takala. IEEE Sensors Journal, vol. 12, n.º 6, pp. 2157 - 2163, junio 2012.*
12. *Notes on Stochastic Error s of Low Cost MEMS Inertial Units. Y. Yuksel y H. Burak Kaygisiz.*
13. *IEEE Std 2700, Standard for Sensor Performance Parameter Definitions Std., 2017.*
14. *Calibration of a Novel MEMS Inertial Reference Unit. Jan K. Bekkeng.*
15. *High-Efficiency Low-Cast Accelerometer-Aided Gyroscope Calibration. Alberto Olivares, Gonzalo Olivares, J.M.Górriz y J.Ramirez. 2009 International conference on Test and Measurement.*
16. *Design and Error analysis of Accelerometer-Based Inertial Navigation Systems. Chin-Woo Tan Sungsu Park. California Partners for Advanced Transit and Highways.*
17. *A Standard Testing and Calibration Procedure for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units. Aggarwal, P., Syed and El-Sheimy, N. University of Calgary, Canada.*
18. *IEEE Std 1293, Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear, Single-Axis, Non-Gyroscopic Accelerometers.*

Área II - Sensores y Sistemas Electrónicos

2A. Tecnologías electrónicas

Electrónica impresa. Desarrollo de sensores flexibles y aplicación en el ámbito de defensa

Castán Lafuente, Joaquín[1,*] y Otero Belmar, Susana[1]

[1] Dpto. Impresión Funcional y Recubrimientos. AIMPLAS Instituto Tecnológico del Plástico, Parc Tecnològic, Carrer de Gustave Eiffel, 4, 46980 Paterna, València. Correo electrónico: jcastan@aimplas.es;sotero@aimplas.es

* Autor principal y responsable del trabajo. jcastan@aimplas.es

Resumen

La sensorización representa un importante nicho de investigación. La medición de constantes vitales mediante «*smart* textiles» y el uso de sensores de presión en vehículos y/o estructuras, resultan de especial interés. En el ámbito de la defensa, tienen una lógica implementación para monitorización de la actividad del personal e impactos en vehículos optimizando la respuesta ante los mismos.

La electrónica convencional ha dado respuesta a estas necesidades; sin embargo, su elevada rigidez y peso hacen que su implementación en prendas resulte en un artículo incómodo. Por otro lado, la integración en vehículos requiere de conexiones complejas y reduce la habitabilidad.

El presente trabajo presenta la electrónica impresa y su aplicación al desarrollo de sensores flexibles integrables en diferentes materiales y superficies. Su reducido peso y factor de forma plana permiten adaptarlos a formas complejas siendo de interés en prendas, uniformes y vehículos aportando funcionalidad, confortabilidad y mayor espacio en el habitáculo del vehículo.

Palabras clave

Sensores, electrónica flexible, *wearables electronics*, *smart* textiles.

1. Introducción

En el ámbito de la electrónica, la miniaturización de los dispositivos, la versatilidad en su integración y los altos costes de producción son factores limitantes para nuevos desarrollos.

Con objeto de hacer frente a estas limitaciones surge la electrónica impresa, como la tecnología que «consiste en dotar de funciones avanzadas al producto impreso, a través de la deposición de materiales con propiedades avanzadas mediante tecnologías de impresión».

En los últimos diez años se ha producido un gran avance en la química de materiales alcanzando importantes desarrollos en tintas funcionales. Tal es el caso de las tintas conductoras, basadas principalmente en metales con una alta conductividad, y tintas dieléctricas.[1]-[6].

La aplicación de la electrónica impresa permite obtener dispositivos planos y flexibles dando respuesta a las limitaciones antes indicadas. Así mismo, la evolución de esta tecnología permitirá obtener unos novedosos dispositivos totalmente integrables en productos con geometrías complejas y en textiles inteligentes.

Los estudios actuales se orientan a la mejora y optimización de dispositivos electroluminiscentes impresos [7] y antenas de radiofrecuencia para soluciones de identificación a distancia. No obstante, existe un nuevo campo y es posible encontrar investigaciones sobre sensores impresos en el ámbito biológico para la detección de glucosa [8] o colesterol [9].

Estos dispositivos representan un avance y evidencian la capacidad de la electrónica impresa como técnica de fabricación de dispositivos electrónicos; sin embargo, la funcionalidad alcanzada no cubre totalmente las necesidades de sectores como el industrial y seguridad o defensa, que demandan de la medición de variables físicas para la detección de pulsaciones, movimientos o presión de impacto.

Así mismo, los desarrollos actuales en integración de electrónica impresa, están focalizados en la visualización de datos (figura 1), y la iluminación. Sin embargo, el abanico de posibilidades que la impresión electrónica ofrece resulta mucho más amplio y es especialmente interesante en el ámbito de la sensórica.

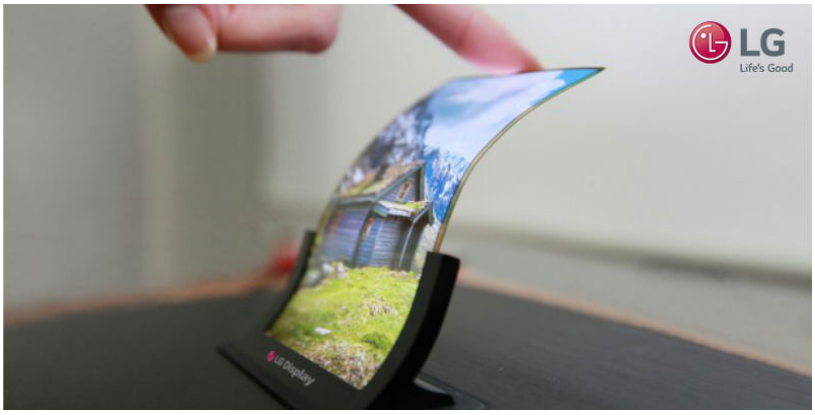


Figura 1. Pantallas flexibles. Fuente: LG.

Por ello, el desarrollo de un dispositivo, como el recogido en el presente artículo, de sensorización de la presión con aplicación a mayor escala e integrable en producto final resulta innovador y de interés en los sectores como medicina, seguridad y/o defensa, donde el control de recursos y la sensorización de variables son clave.

2. Desarrollo

El plan de actuación establecido para la ejecución de la investigación contempla diferentes tareas.

2.1. Tarea 1. Selección de materiales

El objetivo establecido es aplicar técnicas de impresión tradicionales a la obtención de los nuevos dispositivos. Así, se estableció el uso de la serigrafia convencional por sus capacidades de resolución media y alto espesor de capa depositado. En base a esta tecnología, la tarea inicial se ha focalizado en la selección de tintas funcionales y sustratos compatibles para la obtención del dispositivo.

En previsión de las necesidades funcionales se identificó la necesidad de seleccionar tintas tanto conductivas como dieléctricas. Paralelamente a la selección de las tintas se seleccionó el sustrato de impresión flexible compatible con las mismas. En este sentido, el tratamiento térmico de funcionalización de las tintas, 130 ºC durante 10 minutos, es un factor limitante en la estabilidad estructural del sustrato flexible.

2.2. Tarea 2. Diseño conceptual

Si bien existen diferentes tipos de sensores de presión, no todos pueden ser reproducidos por técnicas de impresión tradicional, tal es el caso de sensores neumáticos o hidráulicos. En este sentido, el equipo de proyecto identificó dos tipos de sensores que, por su estructura, podían ser desarrollados mediante impresión por serigrafía:

- Sensor resistivo.
- Sensor capacitivo.

Sensor resistivo

Estos sensores basan su funcionamiento en el hecho de que la presión ejercida produce el contacto entre dos materiales conductores permitiendo la circulación de la corriente eléctrica. En base a la información obtenida de estudios analizados [10] se alcanzó un diseño de concepto de un sensor imprimible con el funcionamiento indicado.

La estructura consta de un material semiconductor impreso sobre un film, en la capa superior, y una capa inferior formada por el film sustrato impreso con tinta conductiva. Ambas capas están separadas por un material, así, la presión ejercida sobre la capa superior deforma el sustrato hasta contactar con la capa inferior permitiendo medir una resistencia.

Sensor capacitivo

Este tipo de sensores actúan como un condensador. La capacidad, C, de un condensador con dieléctrico viene definida por la ecuación 1 en la cual:

C = Capacidad (F).

K_e = Constante dieléctrica del material dieléctrico (adimensional).

ε_0 = Constante dieléctrica del vacío ($8{,}85*10^{-12}$F/m).

S = Superficie de las placas (m).

d = distancia entre placas (m).

El estudio de investigaciones al respecto [11] ha permitido definir la estructura. El funcionamiento se basa en la modificación de la distancia entre las capas conductivas del dispositivo. Según la **ecuación 1** el cambio indicado produce una variación medible en la capacidad del sensor proporcional a la presión ejercida para reducir la distancia entre placas.

$$C = K_e \varepsilon_0 \frac{s}{d}$$

Ecuación 1. Capacidad de un condensador con dieléctrico

El equipo de desarrollo estableció la impresión de un material conductivo sobre el film sustrato. Sobre esta capa, se realizará la impresión de la correspondiente capa de dieléctrico. Finalmente, para concluir el dispositivo se imprimirá la capa de conductivo superior en un nuevo film introduciendo como separación entre esta impresión y la de la zona inferior un material aislante como en el caso del sensor resistivo (figura 2).

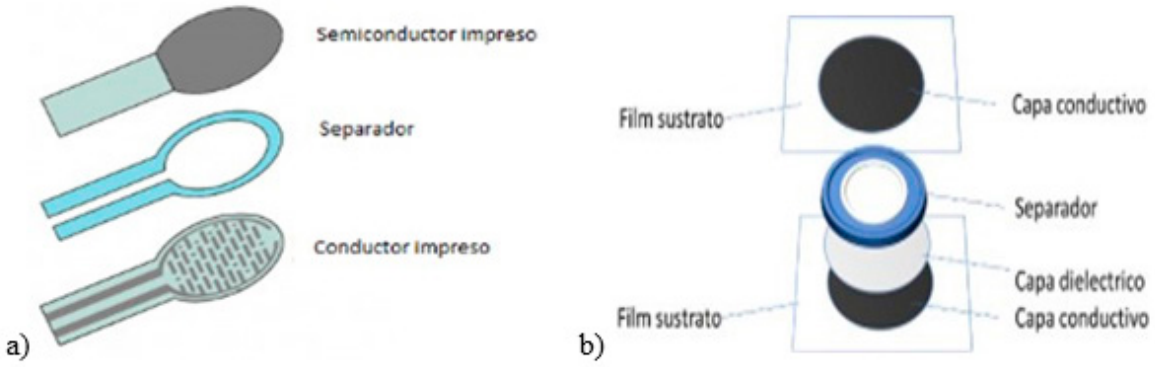


Figura 2. A) Estructura sensor resistivo. B) Estructura sensor capacitivo. Fuente: a) Techtronics; b) AIMPLAS.

La deformación del film superior, por la presión ejercida, tiene un recorrido correspondiente al espesor del material separador siendo viable modificar la separación entre las capas conductivas y obteniendo una lectura de capacidad diferente en base a la presión ejercida.

2.3. Tarea 3. Desarrollo de sensores impresos

El equipo de proyecto ha abordado el desarrollo de sensores mediante aplicación de serigrafía consistente en transferir una tinta a través de una malla tensada en un marco. El paso de la tinta se bloquea en las áreas donde no habrá imagen mediante una emulsión, quedando libre la zona donde pasará la tinta (figura 3).

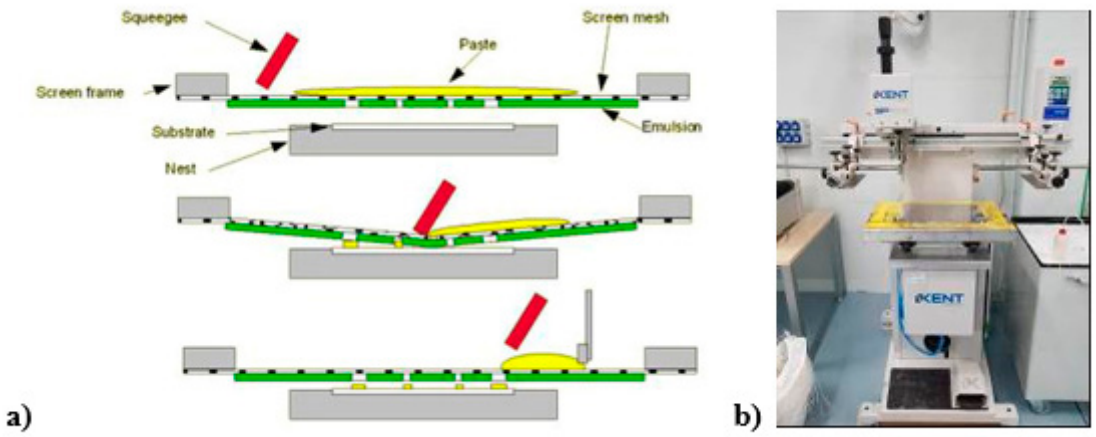


Figura 3. a) Esquema serigrafía; b) Equipo serigrafía semiautomática AIMPLAS. Fuente: a) http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/116893-Desarrollo-escalado-dispositivos-electroluminiscentes-flexibles-aplicacion-sector.html; b) AIMPLAS.

En el marco de esta tarea, el equipo investigador analizó las diferentes pantallas de serigrafia a usar seleccionando las más adecuadas según se recoge en el apartado 3 de resultados. Igualmente se definieron los parámetros de proceso óptimos para la consecución del objetivo.

- Tipo de racle: cuadrado.
- Ángulo de racle: 45º.
- Velocidad de impresión: ≈8/13 m/min.
- Separación pantalla-sustrato: 2-3mm.

Junto a estas actuaciones, los investigadores trabajaron en el diseño gráfico para reproducir los diferentes elementos y en la impresión de prototipos modificando la variable de velocidad y analizando su efecto. Esta modificación de la variable de operación está relacionada con el volumen de tinta a depositar y la resolución alcanzada con una misma pantalla [12].

Referente al diseño, se introdujo una modificación en el sensor resistivo integrando una estructura interdigitada en una capa conductiva con el fin de analizar la lectura de resistencia diferente en base a la presión ejercida. La figura 4 muestra un ejemplo de impresión de capa, donde se identifica la estructura interdigitada, y de prototipos impresos obtenidos.

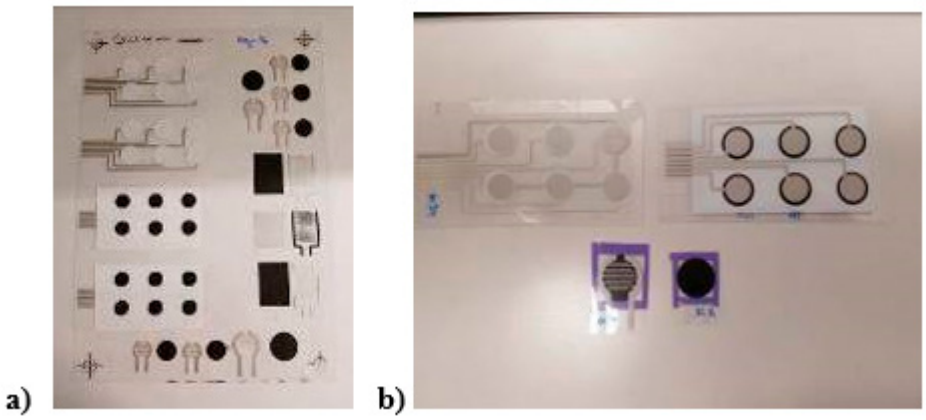


Figura 4. A) Capas impresas. B) Prototipo de sensores. Fuente: AIMPLAS.

2.4. Tarea 4. Caracterización de prototipos

Las propiedades y la aplicación de los materiales seleccionados deben ser analizadas. Sobre las capas impresas se ha ensayado la adherencia tinta-sustrato, identificando compatibilidad entre materiales, y la conductividad y espesor de capa desde el punto de vista funcional.

En el primer caso, se ha aplicado lo descrito en norma UNE-EN ISO16276-2 correspondiente a la evaluación y criterios de aceptación de adherencia. Para la medición de conductividad se ha hecho uso de un equipo de medición de resistividad superficial por 4 puntas en combinación con un equipo de ultrasonidos para la medición de espesor de capa depositada.

Para la caracterización de los prototipos de sensores obtenidos se debía medir la resistencia y capacidad frente a la presión ejercida respectivamente en sensores resistivos y capacitivos. En este caso la presión ha sido simulada mediante pesas calibradas y la resistencia y capacidad se han determinado con un multímetro digital y un capacímetro respectivamente. Los resultados se recogen el apartado 3.

3. Resultados y discusión

En el caso de los sensores resistivos desarrollados con superficie interdigitada la presión ejercida resulta ser inversamente proporcional a la resistencia medida. La figura 5 recoge los cambios en la resistencia ante las diferentes presiones ejercidas. Se pudo determinar que la menor presión detectable

es de 15,8 KPa llegando a detectar 77,3 KPa. Estas fuerzas, en base a la superficie del sensor, son equivalentes a 600 g y 3 kg de peso respectivamente. Esta capacidad de detectar presión se asocia a que una mayor presión permite un contacto en una mayor superficie del interdígito midiéndose una resistencia inferior.

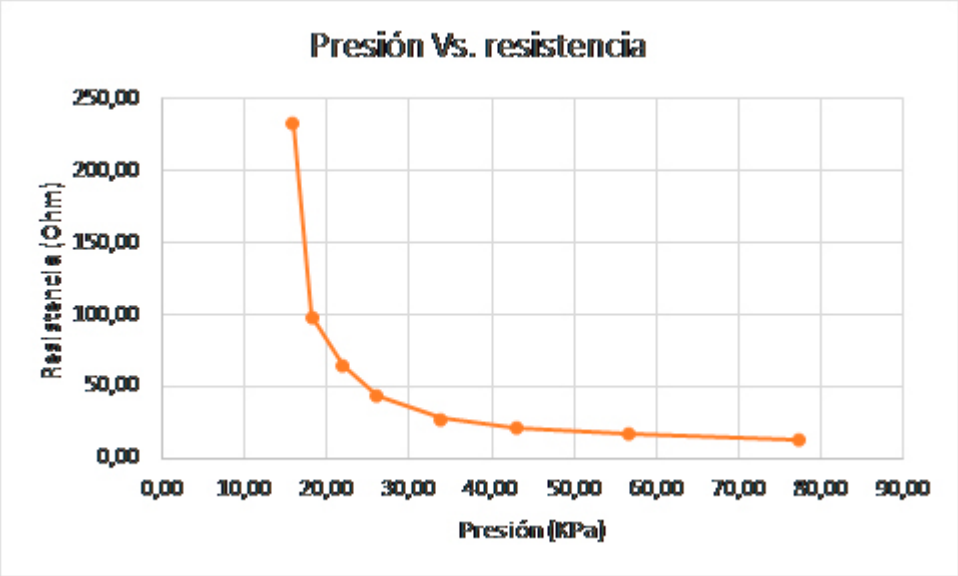


Figura 5. Comportamiento sensor resistivo.

Para los sensores capacitivos impresos, la capacidad medida en el sensor debe ser inversamente proporcional a la presión ejercida. La figura 6 muestra el comportamiento de los mismos a diferentes presiones.

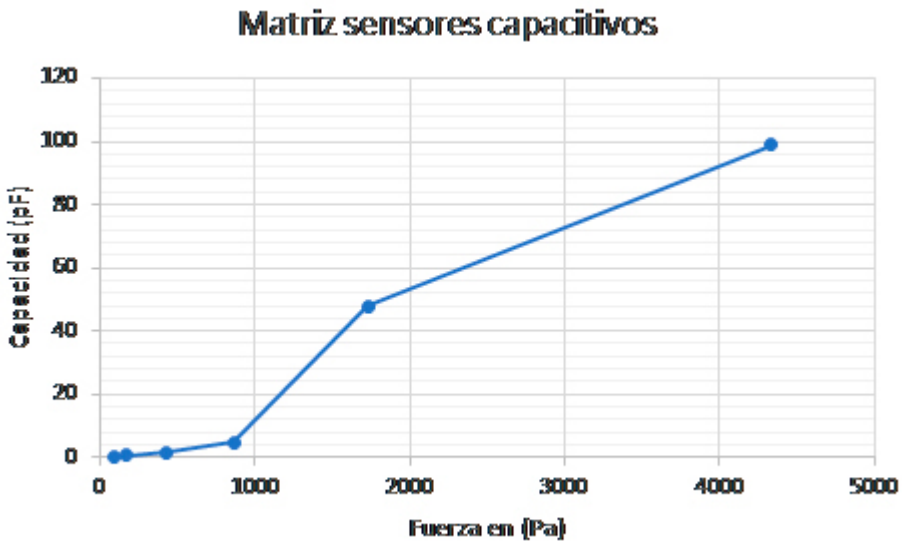


Figura 6. Comportamiento sensor capacitivo.

Es posible determinar que la presión mínima detectable por el sensor resulta ser de 0,09 KPa llegando a detectarse 4 KPa. Estas fuerzas, en base a la superficie del sensor equivale a 1 g. y 50 g. respectivamente. El comportamiento observado en la zona central del rango trabajado se justifica con el comportamiento elastomérico del material separador. Alcanzado ese punto, la deformación sufrida fue superior introduciendo ese efecto anómalo.

4. Conclusiones

Con el presente trabajo se ha podido demostrar la capacidad de la electrónica impresa como técnica de obtención de dispositivos electrónicos de cierta complejidad funcional. Concretamente se han obtenido dos tipos de sensores diferentes haciendo uso de la mencionada tecnología.

La impresión de los diferentes electrodos se ha llevado a cabo mediante serigrafía sobre un sustrato de PET termoestabilizado y flexible. En el caso concreto de los dispositivos capacitivos se ha hecho indispensable la aplicación de una capa dieléctrica realizada igualmente por serigrafía. Finalmente se han alcanzado sensores flexibles con un grosor total inferior a 1 mm.

La respuesta obtenida en los sensores resistivos abarca un importante rango de fuerzas detectables, desde 15 hasta 77 KPa. Este abanico de fuerzas medibles hace del mismo un sensor versátil aplicable en los sectores indicados al inicio, tales como medicina o defensa para monitorización de variables como pulsaciones y/o movimientos o impactos asociados a presiones.

En paralelo, el funcionamiento alcanzado en el sensor capacitivo muestra una capacidad de medir fuerzas de valores inferiores a las observadas en el caso de los sensores resistivos. Así, este nuevo tipo de sensores impresos resulta ser más sensible. Así mismo, los resultados evidencian una proporcionalidad en la respuesta.

Los buenos resultados alcanzados muestran el potencial de la impresión electrónica y en concreto de los sensores impresos para su aplicación en diferentes sectores de la sociedad que demandan una electrónica precisa, compacta y flexible para incorporarla en prendas de trabajo, instalaciones y vehículos dotándolos de nuevas funcionalidades.

Agradecimientos

Este proyecto, FLEXENS, es financiado con el apoyo de la Conselleria d'Economia Sostenible, Sectors Productius, Comerç i Treball de la Generalitat Valenciana a través del IVACE y cofinanciado por los fondos FEDER de la UE, dentro del Programa Operativo FEDER de la Comunitat Valenciana 2014-2020.

Referencias

1. *KS Chou, CY Ren. Synthesis of nanosized silver particles by chemical reduction method. Materials Chemistry and Physics. 2000;64(3):241-46.*
2. *J. Liu, J. P. Coleman. Nanostructured metal oxides for printed electrochromic display. Materials Science and Engineering: A. 2000;286(1):144-8.*
3. *Q.Huang W. Shen,W, Song. Synthesis of colourless silver precursor ink for printing conductive patterns on silicon nitride substrates. Applied Surface Science. 2012;258(19):7384-8.*
4. *W. Zhang, E. Bi; M. Li, L. Gao. Synthesis of Ag/RGO composite as effective conductive ink filler for flexible inkjet printing electronics. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects; 2016;490.*
5. *B. Su, J.E. Holmes, C. Meggs, T.W. Button. Dielectric and microwave properties of barium strontium titanate (BST) thick films on alumina substrates. Journal of the European Ceramic Society; 2003;23(14):2699-703.*
6. *C. Xiang, L. Li, S. Jin, B. Zhang, H. Qian, G. Tong. Expanded graphite/polyaniline electrical conducting composites: Synthesis, conductive and dielectric properties. Materials Letters; 2010;64(11):1313-15.*
7. *M. Sloma, D. Janczak, G. Wroblewski, A. Mlozniak, M. Jakubowska. Electroluminescent structures printed on paper and textile elastic substrates. Circuit World; 2014;40(1):13-16.*

8. *C. Sun, W. Cheng, T. Hsu, C. Chang, J. Chang, J. Zen. Ultrasensitive and highly stable nonenzymatic glucose sensor by a CuO/graphene-modified screen-printed carbon electrode integrated with flow-injection analysis. Electrochemistry Communications; 2013;30:91-94.*
9. *Y. Huang, L. Cui, Y. Xue, S. Zhang, N. Zhu, J. Liang, G. Li. Ultrasensitive cholesterol biosensor based on enzymatic silver deposition on gold nanoparticles modified screen-printed carbon electrode. Materials Science and Engineering: C; 2017;77:1-8.*
10. *Shimojo, M.; Namiki, A.; Ishikawa, M.; Makino, R.; Mabuchi, K. A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method. IEEE Sens. J. ;2004;(4):589-96.*
11. *B.B. Narakathu, A. Eshkeiti, A.S.G. Reddy, M. Rebros, E. Rebrosova, M K. Joyce, B.J. Bazuin, M.Z. Atashbar. A Novel Fully Printed and Flexible Capacitive Pressure Sensor. Sensors; 2012.*
12. *S. Abbot. How to be a great screen printer. Ed. MacDermid Autotype LTD. 2018.*

SAAC, Sistema electrónico integrado de ayuda para la prevención de accidentes de tráfico en adelantamientos a ciclistas

Rodríguez Mallorquín, Francisco[1,*], Guillamón Campos, Blas[2], Olías Ruíz, Emilio[3]

[1*] Centro Universitario de la Guardia Civil – Aranjuez. frmallorquin@fuardiacivil.es.

[2] Academia de Oficiales de la Guardia Civil – Aranjuez.

[3] Grupo de Sistemas Electrónicos de Potencia, GSEP – UC3M.

Resumen

La muerte de ciclistas es cada vez más preocupante. Se ha desarrollado un sistema de seguridad activa que dota a la bicicleta de unos elementos de seguridad que le permiten, tanto la comunicación con otros vehículos, como alertar al ciclista de posibles situaciones peligrosas; a través de una solución compacta, económica, segura y válida energéticamente, desarrollada sobre la plataforma Arduino. Cabe destacar el hecho de que se ha construido un prototipo funcional del sistema de seguridad (el cual ha sido denominado como SAAC, sistema de ayuda al adelantamiento a ciclistas) que ha permitido llevar a cabo pruebas en carretera que han conseguido demostrar su posible eficacia o éxito en la labor de reducir el número de adelantamientos peligrosos.

Palabras clave

Radar, arduino, microcontrolador, diodo láser, seguridad vial.

1. Introducción

Debido al creciente uso de la bicicleta como medio de transporte en numerosas ciudades de nuestro país, sobre todo en las más relevantes como podrían ser los casos de Barcelona, Sevilla o Madrid, se están planteado una serie de retos en materia de seguridad vial, ya que cada vez son más comunes los accidentes de tráfico en los que se ven involucradas las bicicletas. Para intentar dar respuesta a este creciente problema, diversos investigadores han venido desarrollando diferentes soluciones técnicas [1]-[2]. En nuestro caso, se ha desarrollado un sistema electrónico de seguridad para la protección de ciclistas en carretera. Se ha llevado a cabo el diseño y montaje de un completo sistema electrónico, integrando diferentes herramientas tecnológicas, destacando, que se ha empleado la plataforma de *hardware* y *software* libre Arduino [3] como base del prototipo.

Tras haber realizado un análisis de las principales causas de los accidentes de tráfico que implican a ciclistas, se descubrió que una mayoría notable se producen porque el conductor del vehículo a motor que está adelantando al ciclista no respeta la separación lateral de seguridad, marcada en metro y medio según el Reglamento General de Circulación (R.D. 428/2003).

El dispositivo que se ha desarrollado recibe la denominación de sistema de ayuda en el adelantamiento a ciclistas (SAAC). Puesto que, la función que desempeña es asistir durante el adelantamiento al conductor del vehículo que pretende adelantar a la bicicleta. Para realizar dicha función se emplean una serie de luces para captar la atención del conductor y se dibuja una marca sobre la calzada que delimita la distancia de seguridad. Además, el sistema alertará al ciclista de que se va a producir un adelantamiento, es decir, el sistema le comunicará al ciclista las potenciales situaciones de peligro que este haya detectado.

2. Motivación

Como ya se ha mencionado, el número de usuarios de la bicicleta ya sea como medio de transporte o para la práctica deportiva, no para de crecer. De la misma manera, va en aumento el número de ciclistas víctimas en accidentes de tráfico, como se recoge en la figura 1.

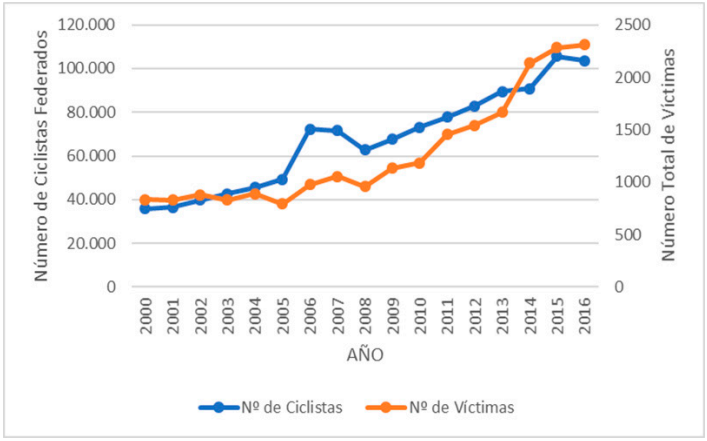


Figura 1. Relación entre el número total de ciclistas federados (licencias federativas de ciclismo más triatlón [4]) y el número de ciclistas víctimas (fallecidos y heridos) [5] en accidentes de tráfico.

Además, últimamente está creciendo la preocupación de la ciudadanía por la seguridad de la bicicleta. Hecho constatable en que diversos medios de comunicación de tirada nacional se están haciendo eco de la enorme vulnerabilidad de los ciclistas [6].

3. Sistema de ayuda en el adelantamiento a ciclistas, SAAC

El SAAC es un sistema de seguridad activa para bicicletas, ideado para mejorar la protección del ciclista en vías interurbanas, y más en concreto, durante la realización de la maniobra de adelantamiento ejecutada por otros vehículos sobre la bicicleta. Es necesario remarcar que, pese a que existen propuestas parecidas, el SAAC es un sistema original por su funcionamiento, el cual, a nivel de concepto, se explica en los siguientes párrafos.

Un sistema sensor detecta los vehículos que se aproximan por detrás de la bicicleta. Cuando un automóvil es detectado, el sistema interpreta que el mismo se dispone a iniciar el adelantamiento y realizará las siguientes acciones:

1) Con una señal acústica advierte al ciclista de que va a ser adelantado.
2) Al mismo tiempo, emite señales luminosas y dibuja una línea en la calzada que delimita la distancia mínima de seguridad de 1,5 metros para recordar y ayudar al conductor a realizar correctamente el adelantamiento.
3) Con un sensor situado en el lateral determinará el momento en el que la bicicleta ha sido rebasada por el vehículo que la estaba adelantando, así como la distancia lateral a la que se ha producido el adelantamiento.

3.1. Origen del concepto

La función, innovadora en el ámbito de la seguridad vial aplicada a bicicletas, de dibujar una línea que marque la distancia lateral de seguridad sobre la calzada, está inspirada en un sistema de seguridad para automóviles que se utiliza en algunos países asiáticos. Se trata de un pequeño aparato instalado en el espacio destinado a las luces de matrícula, que es activado en condiciones de mala visibilidad (niebla, lluvias intensas, contaminación del aire, etc.) para marcar sobre la calzada la distancia de seguridad. El sistema emplea un láser de la categoría III B [7] para producir el haz de luz y una lente divergente que proyecta la línea. Se puede apreciar una imagen del sistema en funcionamiento en la figura 2.

Figura 2. Sistema de protección basado en un láser que marca la distancia de seguridad.

Nuestro concepto intenta ir un paso más allá, puesto que aquí se incorpora un sistema para la detección de los vehículos que se aproximan a la bicicleta y un sistema de señales visuales, como la marca láser sobre la vía, para hacer más visible al ciclista y así ayudar al resto de usuarios de la carretera a respetar su espacio vital en la circulación.

3.2. Requisitos del sistema

Como se pretende integrar el SAAC en una bicicleta, el sistema debe cumplir unas condiciones mínimas para que su uso sea seguro y su instalación sencilla. Lo que se persigue en este proyecto es alcanzar una solución que, en líneas generales, sea práctica para su empleo en el día a día. Y, sobre todo, que se adapte a las necesidades particulares y gustos del ciclista. Es decir, no sería válido un diseño que logre cumplir solo el objetivo de mejorar la seguridad, sino que, además, se exige el plus de que debe ser atractiva para el ciclista. Este debe de sentirse cómodo y seguro haciendo uso del dispositivo.

Por todo ello, se han establecido los siguientes requisitos técnicos:

1. Debe poseer un grado de protección IP [8] igual o superior al nivel IP-44.
2. El sistema debe de integrarse en una única plataforma.
3. Debe poder instalarse en la bicicleta en la parte posterior de la misma, empleando menos de 3 tornillos que cumplan el estándar DIN 912.
4. El sistema, en su versión final, debe de ser lo más ligero y pequeño que sea posible (se entiende que el prototipo puede no adaptarse completamente a este requerimiento).
5. Además, con el objetivo de obtener una solución compacta, económica, segura y válida energéticamente, se disponen los siguientes objetivos prioritarios:
6. Primero, a ser posible, el sistema de alimentación empleará fuentes de energía renovables.
7. Segundo, se debe economizar en recursos, ya que, se espera obtener una opción de bajo coste.
8. Tercero, se debe asegurar que el dispositivo sea seguro. Por ejemplo, que no sobresalga ningún elemento que pueda dañar al ciclista en caso de accidente.

3.3. Planteamiento del proceso de diseño

El proceso de diseño del sistema se ha abordado a través del método «*Top-Down*». Se ha dividido el sistema en varios módulos y se ha desarrollado cada uno por separado. En concreto, el sistema se ha dividido en las partes que se muestran en la figura 3.

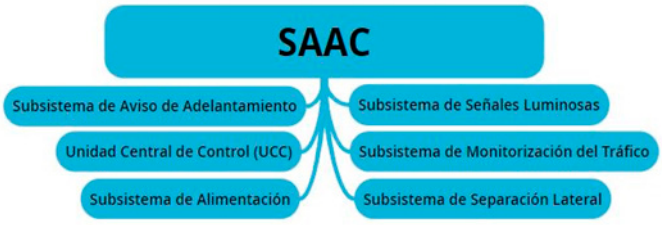


Figura 3. Los módulos de los que se compone el SAAC.

4. Descripción del diseño de los módulos

4.1. Unidad central de control

Habiendo definido la arquitectura de control del dispositivo como centralizada en un solo microcontrolador, se ha optado por implementar una placa Arduino Nano v3 [9] para desempeñar el rol de UCC del SAAC.

4.2. Sistema de aviso de adelantamiento

La manera más sencilla de captar la atención del ciclista, mientras está concentrado en la conducción, es empleando un aviso sonoro. La señal debe ser fácilmente reconocible por el ciclista, así como de una intensidad sonora fuerte, ya que, las condiciones ambientales (espacio libre, ruido proveniente del tráfico,

viento debido a la velocidad, etc.) dificultan notablemente la recepción del mensaje por parte del mismo. De modo que, como solución a estos retos, se ha optado por la sencillez y se ha implementado un módulo zumbador que dispone de un piezoeléctrico para emitir sonidos. El nivel de sonoridad máximo del zumbador se sitúa alrededor de los 600 (Hz), por lo que, para lograr una percepción óptima es preferible emitir zumbidos cuyas componentes espectrales estén centradas en dicha frecuencia.

4.3. Sistema de señales luminosas

Este módulo se divide en tres partes bien diferenciadas: luces de posición (color rojo), luces dinámicas de orientación (color naranja) y las marcas laser sobre el asfalto (color rojo). Tanto las luces de posición como las de orientación se han construido con LED de 5 mm de diámetro de colores.

En las de orientación se han dispuesto 5 LED en línea. Para enviar, al conductor que está adelantando a la bicicleta, el mensaje de que se tiene que separar del ciclista, rápidamente, se van encendiendo uno a uno los 5 diodos, como si fuese una luz indicadora de dirección (un intermitente) dinámica. Cabe decir, que se han seguido parte de los requisitos que recoge la norma UNE-EN 12352 [10].

Por otro lado, las luces de posición se han adaptado a los requerimientos del Reglamento General de Vehículos (R.D. 2822/1998), que establece que, por lo menos, se dispondrá de una luz de color rojo cuya intensidad luminosa debe ser de 4-12 cd. De modo que, se han dispuesto 2 LED rojos posicionándolos uno en cada lado de la plataforma orientados hacia atrás.

Por último, para dibujar la línea de seguridad sobre la vía, se ha procedido a instalar dos diodos láser de 5 mW de potencia óptica, de clase II según la norma UNE-EN 60825-1 [7]. Los láseres cuentan con una lente divergente que transforma el haz de luz emitido en una línea recta. Para poder controlar el encendido y apagado de los diodos se ha diseñado un circuito MOSFET [11] como interruptor que es a su vez controlado directamente por la UCC.

4.4. Sistema de monitorización del tráfico

Se valoró la opción de emplear un radar de efecto Doppler que, finalmente, sería la solución implementada en el prototipo. En particular, se ha optado por el modelo HB100 un pequeño módulo transceptor Doppler que trabaja en la banda X [8–12 GHz] del espectro de frecuencias de las microondas. Destaca por su precio, muy competitivo, así como por ser compatible con la plataforma Arduino [12]. Con el HB100 se han desarrollado desde dispositivos detectores de intrusos, dispuestos como barrera de microondas, hasta para la medición de la velocidad de automóviles. El módulo radar puede funcionar en modo onda pulsada u onda continua (CW), en nuestro caso hemos optado por la segunda opción, de modo que, solamente podremos detectar la presencia de objetos en movimiento que se encuentren dentro del alcance, así como conocer su velocidad.

4.5. Sistema de separación lateral

Para monitorizar el espacio situado en el lateral izquierdo de la bicicleta, es decir, por donde debe circular el vehículo que adelanta a la misma, se ha tomado la decisión de instalar un sistema sensor de ultrasonidos, en concreto, el módulo HC-SR04, que es comúnmente empleado para medir distancias en proyectos Arduino. El sensor basa su funcionamiento en la medición del tiempo de vuelo de un pulso de ultrasonidos, desde que se dispara hasta que rebota y es recibido por el sensor.

4.6. Sistema de alimentación

El sistema de alimentación del dispositivo se ha diseñado sobre una única batería de litio del tipo pila nueve voltios, 9 V. Es decir, una *secondary battery* del modelo 6LR61 cuyas especificaciones técnicas vienen recogidas en la norma UNE-EN 60086-2 [13]. Además, ha sido necesario disponer un circuito regulador de tensión, integrado, para adaptar el voltaje de la batería, 9 V, a la tensión de funcionamiento del sistema, 5 V, así como de un interruptor general. La batería se recarga mediante un pequeño sistema

de energía fotovoltaica de 30 mW que se ha incorporado al dispositivo. Con esta medida se persigue que el prototipo sea energéticamente autosuficiente y ecológico.

Por último, dado que el SAAC va a ser incorporado a un vehículo ligero, y a pesar de que, para el caso de las bicicletas, legalmente, no está estipulada la obligación de certificar la conformidad con la norma UNE-EN 50604-1:2016 [14] que recoge requisitos generales de seguridad y métodos de ensayo para baterías de litio en aplicaciones de vehículo eléctrico ligero, se ha llevado a cabo un estudio de esta y de su aplicabilidad para la mejora de la seguridad del dispositivo.

4.7. Funcionamiento del SAAC

El programa que controla el SAAC realiza la rutina que a continuación será explicada y que se muestra en la figura 4:

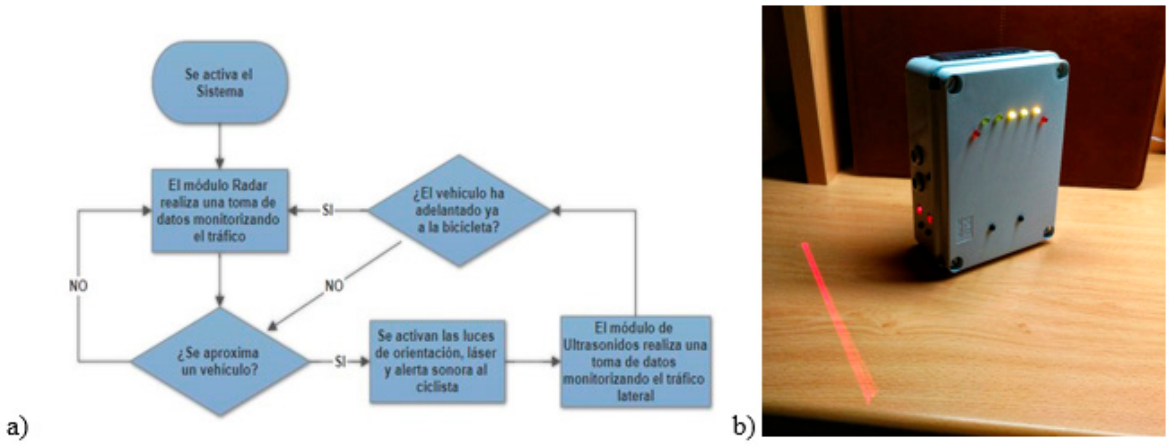


Figura 4. A) Diagrama de bloques del programa informático que controla el SAAC. B) primer prototipo del SAAC en funcionamiento. Se aprecia que la marca de seguridad no se encuentra a 1,5 m del dispositivo como se podría esperar, esto se debe a que el ángulo de inclinación de los láseres se ha dispuesto para que la línea se sitúe a 1,5 m al emplazar el SAAC sobre la tija de la bicicleta (la estructura que soporta el sillín) a unos 0,80 m sobre el suelo. No obstante, la inclinación es ajustable.

En primer lugar, efectúa una lectura de la señal del radar, procesa estos datos y los compara con una referencia; si se cumplen las condiciones fijadas para la detección de un adelantamiento (que un objeto a mayor velocidad que la bicicleta haya sido localizado) continúa la secuencia, en caso contrario, se repite este módulo hasta que se detecte un posible adelantamiento.

En segundo lugar, se inicia un bucle en el cual se activan las luces dinámicas de orientación, el láser que marca la distancia de seguridad y el sistema de aviso al ciclista. También, se activa el sensor de ultrasonidos para que inicie la tarea de monitorizar el lateral de la bicicleta. Esta secuencia se repite hasta que el sensor lateral detecta la presencia de un vehículo o que hayan transcurrido 15 segundos desde que se entró en el bucle. En la figura 7 se puede observar una instantánea del dispositivo mientras este módulo del programa se ejecuta.

En tercer lugar, se desactiva la secuencia detallada en el párrafo anteri or y se repite el primer módulo del programa. El dispositivo ejecutará el programa desde que el mismo es puesto en funcionamiento, mediante el interruptor general, hasta que es apagado.

5. Resultados y discusión

Se realizaron unas pruebas de campo [15] consistentes en recorrer unas rutas por carreteras abiertas al tráfico con y sin el dispositivo SAAC acoplado a la bicicleta, contabilizando el número de adelantamientos antirreglamentarios que se producían en cada caso. De este sencillo experimento se extrajeron

los siguientes datos: la tasa de adelantamientos peligrosos sin SAAC se sitúa en torno al 19 %, mientras que empleando el SAAC fue de un 11,8 %. Esto supondría una reducción del 38 % de las maniobras de adelantamiento peligrosas.

En primer lugar, tras realizar pruebas de detección se estimó el alcance del sistema en 5 m, lo cual no es suficiente como para anticiparse adecuadamente a los adelantamientos. Esto se debe a que la antena del radar es muy poco directiva. Por lo que, se ha puesto en marcha el desarrollo de mejoras en las antenas del módulo radar. En concreto, se ha planteado el diseño de una antena de bocina e incorporarla al radar, ya que, lo sencillo de su estructura facilita su construcción e integración en el prototipo, así como, porque, la ganancia típica de estas antenas de apertura sería la suficiente como para obtener un alcance de 30 a 50 m, el necesario para que nuestro sistema funcione adecuadamente.

En segundo lugar, la percepción de la línea de seguridad sobre el asfalto es muy baja cuando las condiciones de iluminación del ambiente son buenas. Como, por ejemplo, a medio día con un tiempo soleado. Para dar respuesta a este contratiempo se ha reconfigurado el programa para que el encendido de los láseres sea intermitente. De esta manera, se mejora, subjetivamente, la percepción de la señal, puesto que, el ojo humano distingue mejor las figuras en movimiento (que en este caso es cambiante). No obstante, aun habiendo realizado esta mejora, la sensación es que esta funcionalidad no termina de ser del todo útil en esas condiciones de buena visibilidad que hemos mencionado. En este caso, la comunicación entre el automóvil y la bicicleta se reduce a las luces orientadoras y a las de posición.

En tercer lugar, cuando la bicicleta sobrepasa determinados objetos inmóviles situados en la calzada, como vehículos parados o señales de tráfico de tamaño considerable, el sistema interpreta a estos objetos como si fuesen vehículos adelantando a la bicicleta. Esto se debe a que el radar le asocia a su frecuencia la velocidad de la bicicleta, ya que, el punto de observación y de referencia, el radar, está en movimiento. Esto se podría solucionar añadiendo un módulo extra que calculase la velocidad de la bicicleta y le enviase el dato al microcontrolador. De manera que la UCC rechazaría todos los objetos detectados que posean menos velocidad que la bicicleta.

6. Conclusiones

Según la opinión de los ciclistas y datos sobre siniestralidad publicados por la DGT, aproximadamente 1 de cada 5 conductores no respetan la separación lateral de seguridad en los adelantamientos a bicicletas, concentrándose la mayoría de los accidentes que involucran a ciclistas en esta maniobra de adelantamiento. El desarrollo de un dispositivo que ayuda al conductor a respetar el espacio vital de la bicicleta supone un paso adelante en la reducción del número de víctimas de accidentes de tráfico.

A pesar de las limitaciones del prototipo construido, las primeras pruebas de circulación que se han llevado a cabo demuestran que el dispositivo es capaz de reducir el número de adelantamientos antirreglamentarios [15]. No obstante, queda un largo camino por recorrer y diversas líneas de mejora por abordar, hasta alcanzar una solución lo suficientemente sólida, como para proceder a la generalización de su uso, comercializando un producto atractivo para el ciclista o bien, desarrollando una norma que obligue a su integración en las bicicletas.

Referencias

1. *A. ARLUCEA ALMEIDA. «Sistema electrónico textil para señalización ciclista mediante reconocimiento de gestos», Trabajo fin de grado, Dpto. Ingeniería Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2016.*
2. *J. PÉREZ-OSUNA MORALES, «Sistema de seguridad vial para ciclistas basado en redes de sensores». Trabajo de fin de grado, ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España, 2014.*
3. *L. TAHYER OJEDA, «¿Qué es Arduino?», Arduino.cl. [En línea]. Disponible en: http://arduino.cl/que-es-arduino/.*

4. *CONSEJO SUPERIOR DE DEPORTES. «Histórico de licencias». Federaciones Deportivas Españolas, 2017. [En línea]. Disponible en: http://www.csd.gob.es/csd/estaticos/asoc-fed/historico-de-licencias.pdf.*
5. *DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO, «Tablas estadísticas de accidentes con víctimas, fallecidos, heridos». Seguridad Vial, 28-02-2018. [En línea]. Disponible en: http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/accidentes-30dias/tablas-estadisticas/*
6. *JÍMENEZ. «Fin de semana trágico para los ciclistas: cinco muertos y cinco heridos». ABC sociedad, 11/06/2017. [En línea]. Disponible en: http://www.abc.es/sociedad/abci-semana-tragico-para-ciclistas-cinco-muertos-y-cinco-heridos-201706112225_noticia.html*
7. *Seguridad de los equipos láser – Parte 1. Clasificación de los equipos y requisitos. Asociación Española de Normalización UNE-EN IEC 60825-1:2015.*
8. *Grados de protección proporcionados por las envolventes (Código IP). Comisión Electrotécnica Internacional IEC 60529:1989/A2:2013.*
9. *J. BLUM and I. Books24x7, Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry. (1st ed.) 2013.*
10. *Equipamiento de regulación del tráfico – dispositivos electrónicos de advertencia de peligro y balizamiento. Asociación Española de Normalización UNE-EN 12352:2007.*
11. *B. J. BALIGA and I. Books24x7, Advanced Power MOSFET Concepts. 2010.*
12. *A. C. CRISTÓBAL GONZÁLEZ. «Utilización de un radar Jtron HB100 y un microcontrolador Arduino para la medida de velocidad de blancos móviles». Trabajo fin de grado, Centro Universitario en la Defensa de la Escuela Naval Militar, Universidad de Vigo, Marín, España, 2015.*
13. *Pilas eléctricas – Parte 1. Generalidades. Asociación Española de Normalización UNE-EN IEC 60086-1:2011.*
14. *Baterías de litio para aplicaciones de vehículo eléctrico ligero - Parte 1. Requisitos generales de seguridad y métodos de ensayo. Asociación Española de Normalización UNE-EN 50604-1:2016.*
15. *F. RODRÍGUEZ MALLORQUÍN. «Diseño y montaje de un sistema electrónico de seguridad para la protección de ciclistas en carretera». Trabajo de fin de grado, Centro Universitario de la Guardia Civil, Universidad Carlos III de Madrid, Aranjuez, España, 2018. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/1barQqbTnBazxvGExtkuvSSMWXlqSYnb-/view?usp=sharing*

Beamforming en comunicaciones tácticas

Dehesa Golding, Juan Pablo[1], Graña Varela, María[2,*] y Díaz Sánchez, Miguel Ángel[3]

[1] INSTER Tecnología y Comunicaciones. jdehesa@inster.es: (JPDG)

[2] mgrana@inster.es: (MGV)

[3] mdiaz@inster.es (MADS)

* Autor principal y responsable del trabajo; mgrana@inster: (MGV).

Resumen

Los sistemas de *array* de antenas permiten la implementación de métodos de *beamforming* (BF) para obtener diagramas de radiación dinámicos controlados por *software* (Software Defined Antenna SDA). Los elementos individuales del *array* son antenas con diagramas de radiación generalmente poco directivos alimentados con señales previamente calculadas para generar el diagrama de radiación deseado.

La utilización de antenas poco directivas como elementos individuales del *array* permite minimizar su tamaño y construir antenas planas con características similares a las parabólicas añadiendo la ventaja de su dinamismo. El mayor número de antenas implica una disminución estadística del ruido térmico, aumentando la relación señal/ruido y la distancia de conexión entre usuarios.

El sistema es capaz de discriminar señales espacialmente, lo cual permite la detección de la dirección de llegada de información y también la dirección de llegada de señales interferentes o *jammers* con el correspondiente posicionamiento físico de posibles enemigos, otorgando una ventaja táctica.

Al aumentar la diversidad espacial se pueden habilitar múltiples conexiones en paralelo sin sacrificar velocidad de transmisión en cada una. Este mismo procesado paralelo permite, además, una cancelación mucho más efectiva de *jammers* (*antijamming*).

La posibilidad de controlar la forma del diagrama de radiación conlleva la cancelación de emisiones en direcciones no deseadas, disminuyendo la huella electromagnética del sistema en el entorno. La consecuencia de esta disminución es una menor posibilidad de ser detectado por el enemigo a causa de las comunicaciones por radio.

Este tipo de tecnología se puede aplicar en el sector de la defensa a las comunicaciones tácticas y comunicaciones por satélite; presentando una mayor diferenciación tecnológica y ventaja operativa en zona de operaciones en todas las comunicaciones embarcadas en vehículos.

Otro caso de aplicación de esta tecnología se presenta en los nuevos satélites militares, en los cuales se está utilizando el concepto de *beamforming* para aumentar la capacidad, agilidad y robustez ante interferencias, permitiendo configurar diferentes parámetros del satélite dependiendo del tipo de misión (*Software Definition Satellites*).

Palabras clave

Beamforming, MIMO, SDMA.

1. Introducción

El *beamforming* (BF) consiste en la generación de diagramas de radiación complejos y variables en el tiempo y controlables de forma electrónica. Típicamente se lleva a cabo en *arrays* de antenas mediante la variación de amplitud y fase de la señal de cada uno de los elementos del *array*. La utilidad práctica del BF aparece en áreas tan diversas como: radar, radioastronomía, sónar, comunicaciones, sismología y diagnóstico y tratamiento médico [1] entre otras.

El concepto de antena con haz variable mediante métodos electrónicos se conoce desde antes de la segunda guerra mundial con el desarrollo de las primeras tecnologías de radar [2]. La falta de capacidad computacional de la época así como sus limitaciones de *hardware* forzaban a cualquier sistema de radio a usar frecuencias muy bajas [2] y antenas de gran tamaño.

El rápido desarrollo de la electrónica junto con la definición de los diferentes algoritmos para la síntesis de *arrays*, dieron lugar a un gran avance de esta tecnología durante las décadas 70-80 [2].

En los últimos años han ganado relevancia nuevas técnicas aplicadas al campo de las comunicaciones, dentro de estándares como WiFi o el nuevo 5G. Una de estas técnicas es el MIMO o massive MIMO [3], que permite aumentar considerablemente el tráfico de datos mediante la optimización de la distribución de potencia transmitida tanto en el espacio como en el tiempo aprovechando la multiplexación espacial. Estas tecnologías permiten asimismo el servicio simultáneo a múltiples usuarios reutilizando la frecuencia en diferentes haces dedicados y adaptados a las características del entorno.

Hasta la década pasada, el *beamforming* para *arrays* de antenas se implementaba de forma analógica e incluso mecánica. El concepto de *beamforming* digital ha sido posible gracias al desarrollo de conversores analógico/digitales con alto ancho de banda y a los avances en los sistemas de procesado digital de señal, que han adquirido potencia suficiente para aplicar los desfases a las diferentes señales en tiempo real de manera totalmente digital.

A lo largo del artículo se presentan los cálculos básicos de *beamforming*, se analizan las ventajas de realizar el procesado de manera digital frente a la analógica y, finalmente, se enumeran las principales aplicaciones de este tipo de sistemas al campo de las comunicaciones tácticas.

2. Fundamentos teóricos

En este apartado se explican las bases teóricas del *beamforming* [4] y se justifica de forma analítica los beneficios de utilizar técnicas de procesado digital en banda base frente a las actuales técnicas analógicas.

Por simplicidad, se considerará a modo de ejemplo un *array* lineal con elementos equiespaciados (ULA por sus siglas en inglés):

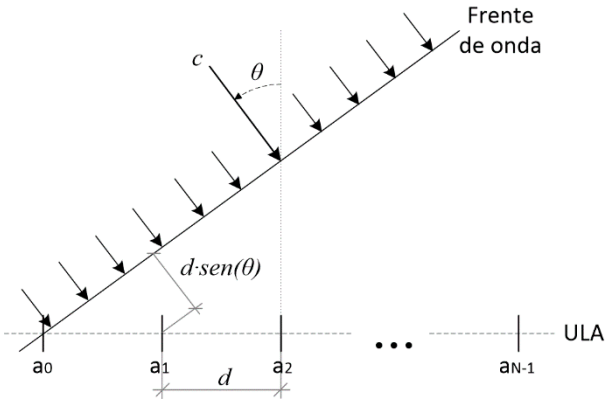


Figura 1. Array lineal uniforme.

En la figura 1 se muestra un esquema de un ULA donde a_0 ... a_{N-1} son los elementos radiantes separados entre ellos una distancia d. Sobre ellos incide una onda plana con velocidad de propagación c y un ángulo θ. La distancia que debe recorrer dicha onda desde que alcanza un elemento hasta que llega al siguiente es $d \cdot sen(\theta)$.

En la situación descrita, los desfases temporales $\Delta t_{i\to i+1}$ y angulares $\Delta\varphi_{i\to i+1}$ entre elementos del *array* para la señal incidente se expresan como:

$$t_{i+1} - t_i = \Delta t_{i\to i+1} = \frac{d \cdot sen\,(\theta)}{c} \;\rightarrow\; \Delta t_{i\to i+n} = n \cdot \frac{d \cdot sen\,(\theta)}{c} \tag{1}$$

$$\varphi_{i+1} - \varphi_i = \Delta\varphi_{i\to i+1} = 2\pi f(\Delta t_{i\to i+1}) = 2\pi \frac{d}{\lambda} sen(\theta) \;\rightarrow\; \Delta\varphi_{i\to i+n} = n \cdot 2\pi \frac{d}{\lambda} sen(\theta) \tag{2}$$

Con f = frecuencia, λ = longitud de onda, θ = ángulo incidente, i = n.º de elemento, j = n.º de señal incidente, Δt = desfase temporal y Δφ = desfase angular.

La suma de las contribuciones de cada una de las señales desfasadas da lugar al denominado factor de *array* (AF). El diagrama de radiación de la antena es resultado de multiplicar el diagrama de radiación individual de los elementos radiantes por AF. Cuando se alimentan todos los elementos de manera uniforme, el AF de un ULA viene dado por la ecuación (3), donde se aprecia su periodicidad. En este caso el haz principal del diagrama es perpendicular al eje del *array*, figura 2a:

$$AF(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} e^{j\Delta\varphi_{0\to i}} = \sum_{i=0}^{N-1} e^{j\cdot\left(i\cdot 2\pi\cdot\frac{d}{\lambda}\cdot sin(\theta)\right)} = \frac{sen\left(N\cdot\pi\cdot\frac{d}{\lambda}\cdot sen(\theta)\right)}{sen\left(\pi\cdot\frac{d}{\lambda}\cdot sen(\theta)\right)} e^{j\cdot\left((N-1)\cdot\pi\cdot\frac{d}{\lambda}\cdot sin(\theta)\right)} \tag{3}$$

Para aplicar *beamforming* se modifica artificialmente tanto la fase (ϕ) como el módulo (m) de las señales de cada elemento mediante pesos ($\omega = m\cdot e^{j\phi}$) que se incluyen dentro del sumatorio del factor de *array* permitiendo un control programable del mismo (4):

$$AF(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} e^{j\Delta\varphi_{0\to i}} = \sum_{i=0}^{N-1} e^{j\cdot\left(i\cdot 2\pi\cdot\frac{d}{\lambda}\cdot sin(\theta)\right)} = \frac{sen\left(N\cdot\pi\cdot\frac{d}{\lambda}\cdot sen(\theta)\right)}{sen\left(\pi\cdot\frac{d}{\lambda}\cdot sen(\theta)\right)} e^{j\cdot\left((N-1)\cdot\pi\cdot\frac{d}{\lambda}\cdot sin(\theta)\right)} \tag{4}$$

Utilizando los pesos adecuados se modifica la dirección del máximo del diagrama de radiación. Por ejemplo, en la figura 2b el AF ha sido modificado para apuntar a la dirección de 50º.

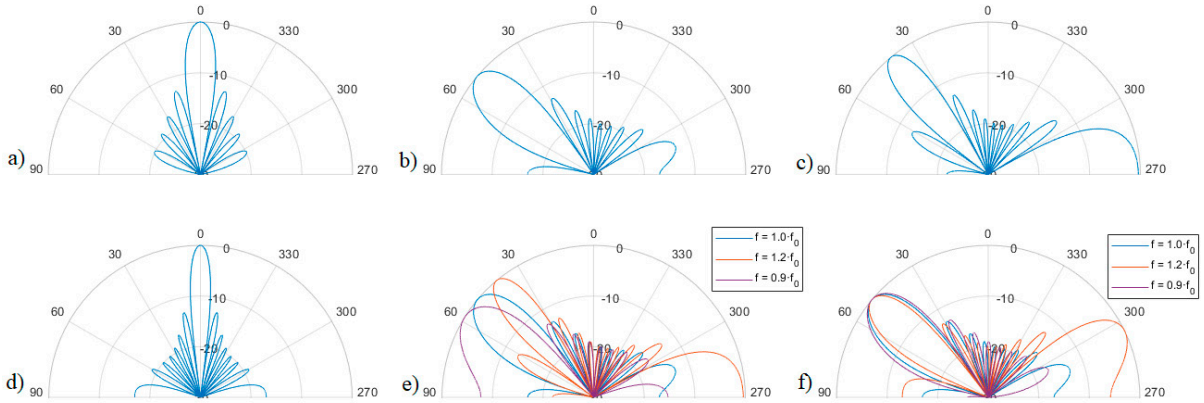


Figura 2. a) Array Factor (dB) θ=0º, N=10, d=λ0/2, f=f0. b) AF θ=50º, N=10, d= λ0/2, f=f0. c) AF θ=50º, N=10, d= λ0/2, f=1.2·f0. d) AF θ=0º, N=10, d= λ0/2, f=1.2·f0. e) Superposición de AF a diferentes frecuencias con pesos iguales. f) Corrección del desenfoque aplicando distintos pesos a cada frecuencia.

El carácter periódico del AF da lugar a los denominados *grating lobes* (figura 2f). Su aparición en el AF está regida por la inecuación (5), que relaciona la distancia entre elementos (d), la longitud de onda (λ) y el ángulo máximo (θ_{max}) al que se puede orientar el haz sin que aparezcan *grating lobes*. Sin embargo, al utilizar distancias pequeñas entre elementos ($d < \lambda/2$) aparecen problemas de acoplamiento. Por otro lado, el ancho del haz decrece a medida que aumenta d/λ, ver figura 2. Este último efecto se explota haciendo crecer d/λ a un valor cercano a 1 para la fabricación de antenas directivas planas en las que no se va a modificar el AF.

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + sen(\theta_{max})} \qquad (5)$$

Finalmente existe el problema del desenfoque del *array*. Los desfases calculados para una dirección de apuntamiento y una frecuencia concreta, cuando se aplican a frecuencias contiguas originan un desvío del haz (figura 2c y 2e). A este efecto de desenfoque que aparece en señales de banda ancha se le denomina *beam squint*. Este problema es característico de las arquitecturas analógicas de BF y su corrección es posible (figura 2f) utilizando técnicas de *beamforming* digital en banda base (BB).

2.1.Beamforming analógico vs beamforming digital en banda base

En la figura 3 se observa la diferencia entre las arquitecturas genéricas de BF analógico y digital:

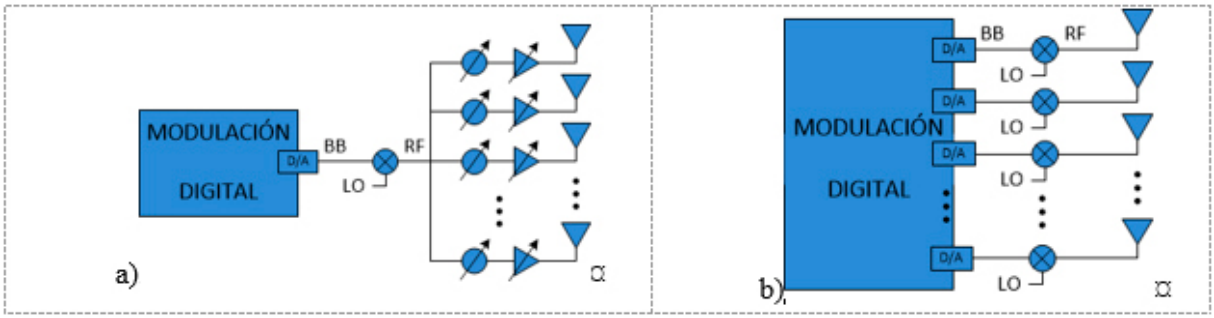


Figura 3. Estructuras de hardware para BF. a) Aplicación de desfases y ganancias de forma analógica en RF. b) Aplicación de desfases y ganancias de forma digital en banda base (BB).

En el *beamforming* analógico, los pesos se aplican mediante desfasadores analógicos y amplificadores conectados directamente a cada elemento radiante, ver figura 3a. Las señales analógicas individuales se combinan para producir el AF deseado y la señal resultante es una única señal que se modula en frecuencia y se procesa. El diagrama generado contiene un único símbolo, por tanto no es posible transmitir más

de un rayo con distinta información al mismo tiempo. El BF analógico muestra pues una limitación en el número de canales o haces que puede generar: necesita todo el conjunto de desfasadores y amplificadores analógicos por cada canal diferente que se quiera procesar.

En el BF completamente digital, figura 3b, se procesan digitalmente por separado las señales individuales de cada uno de los elementos radiantes del *array*. Los pesos se configuran y aplican a nivel digital, pudiendo analizar simultáneamente tantos rayos o direcciones como permita la capacidad computacional del procesador, así como generar haces con distinta información para ser transmitidos simultáneamente (MIMO). El número de haces controlables pasa a ser especificado por *software* y se pueden recibir y procesar tantas direcciones simultáneas como elementos haya en el *array* [5][6].

El *beamforming* digital (DBF) procesa las señales en todo su ancho de banda utilizando una transformada discreta de Fourier (DFT) (6), lo que permite aplicar desfases individuales a cada frecuencia ortogonal. Mientras que el BF analógico generalmente aplica el mismo desfase y ganancia a todo el ancho de banda de la señal, en el DBF es posible generar un haz específico para cada frecuencia, permitiendo corregir efectos como el *beam squint,* figura 2f o establecer canales de comunicación de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) combinado con las ventajas del BF.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i \cdot 2\pi \frac{kn}{N}} \qquad (6)$$

2.2. Síntesis de diagrama y calibración de los pesos en DBF

Se han desarrollado infinidad de métodos diferentes para realizar la síntesis de los diagramas de radiación de *arrays*.

1. **Métodos analíticos** como pueden ser: la técnica de transformación por *steering vector*, el método de Dolph-Tschebyscheff (minimiza el ancho de haz sin sobrepasar un máximo de lóbulo secundario) o la aplicación de pesos binomiales (eliminan lóbulos secundarios a costa de ensanchar el haz principal) [4][7].
2. **Métodos adaptativos**, que permiten su autocalibración y adaptación a cambios o deformaciones del *array* aprovechando incluso reflexiones del terreno en situaciones de no línea de vista (*non line-of-sight* NLOS). Algunos de estos algoritmos son: *Minimum Output Energy* (MOE), *Maximum Output Signal to Interference plus Noise Ratio* (Max SINR), *Minimum Mean Squared Error* (MMSE), *Constant Modulus Algorithm* (CMA) que no requiere datos de entrenamiento si la señal a recibir es de amplitud constante, es decir, limita su uso a modulaciones como PSK y FSK evitando por ejemplo QAM y otras constelaciones con amplitud variable [8][9][10].

La gran ventaja del DBF es que todos estos métodos pueden implementarse a velocidades mayores que el periodo de muestra en unidades de procesamiento potentes (FPGA o ASICS). Mientras que en BF analógico estos algoritmos se van actualizando a medida que se leen nuevas muestras para adaptar un *array* de geometría arbitraria al entorno, en DBF es posible ejecutar diferentes algoritmos en paralelo sobre cada muestra, por lo que convergerán más rápidamente. Los pesos se aplican de forma inmediata evitando retardos dinámicos naturales consecuencia de utilizar elementos analógicos, permitiendo un establecimiento más rápido de la conexión con el usuario.

Finalmente, la flexibilidad del DBF se puede observar en la figura 4, donde con el mismo *array* de 10 elementos se han generado diagramas que cumplen funciones diferentes. En la figura 4a se sintetizan dos haces simultáneos en las direcciones de 30º y -45º que portan distinta información. Además, se eliminan las interferencias entre los propios haces situando un nulo en la dirección principal del otro haz. En la figura 4b se genera un haz sectorial. En la figura 4c se generan nulos de radiación y sensibilidad en las direcciones de 36º y -62º (*zeroforcing*).

Todos estos diagramas se han sintetizado en paralelo dentro de un único periodo de muestreo, lo que posibilita la generación de diagramas diferentes para transmisión y para recepción. También es posible

emitir información diferente en cada dirección, permitiendo la reutilización de frecuencia en diferentes direcciones del espacio.

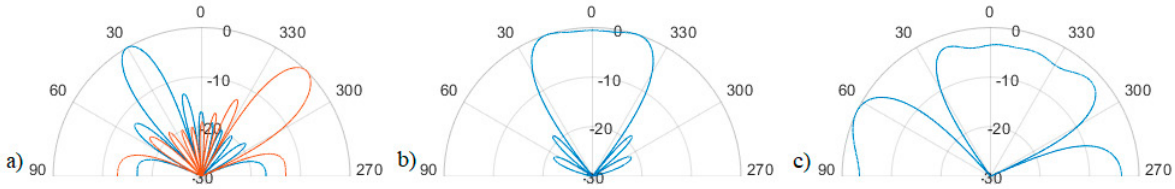


Figura 4. a) Haces simultáneos portando distinta información en la misma frecuencia. b) Iluminación de sector de -30º a 30º. c) Zeroforcing a 36º y -62º.

3. Ventajas tácticas

De los conceptos tratados en el apartado anterior se extraen las siguientes ventajas tácticas.

3.1. Aumento de la relación señal/ruido (SNR), aumento de la distancia de cobertura

Cada elemento del *array* recibirá la señal con un SNR asociado. La parte de la señal que lleva información está correlada con las del resto de elementos. Al combinar las SNR de todos los elementos, debido a esta correlación, la porción de la S dentro de la SNR total aumenta tantas veces como elementos hay en el array (N), de modo que su potencia aumenta en un factor de N^2. Sin embargo, el ruido no está correlado, por tanto su potencia combinada aumenta en un factor de N. Esto conlleva un aumento del SNR del array igual a N respecto a un sistema equivalente con una única antena. El aumento del SNR implica una disminución del *bit error rate* (BER), y por tanto, el incremento de la distancia máxima a la que puede establecerse la comunicación y la disminución de la potencia total radiada necesaria para una comunicación eficiente.

3.2. Detección de la dirección de llegada de señales (DOA)

Al disponer de medidas por separado de las señales provenientes de cada elemento del *array* se pueden implementar algoritmos DOA que permiten identificar la posición relativa de las diversas fuentes de señales recibidas. Algunos ejemplos de estos algoritmos son: *Correlation, Maximum Likelihood Estimator* (MLE), *Multiple Signal Classification* (MUSIC), *Root-MUSIC, Smooth-MUSIC, ESPRIT y Matrix Pencil* [11][12][13][14].

La localización en tiempo real de las fuentes de señal permite realizar el seguimiento de señales amigas (*tracking*). También permite obtener una estimación precisa de la posición de las fuentes de señal no deseadas (localización enemiga e interferencias) así como la cancelación de dichas señales (*antijamming*) para mejorar la relación señal/interferente (C/I) y la calidad de recepción.

3.3. Minimización de huella electromagnética

Utilizando algoritmos de optimización de pesos, puede conformarse el haz para disminuir la potencia total emitida y concentrarla en las direcciones deseadas. Esto no solo reduce el riesgo de interferencias y disminuye la posibilidad de ser detectado por fuerzas enemigas, también es un factor a tener en cuenta de cara a la seguridad del operario, pues se minimiza y acota la radiación en el área de trabajo. Además, en caso de conocer la posición del enemigo, permite cancelar la emisión en la dirección correspondiente (*zeroforcing*).

3.4. Multiplexación y diversidad espacial

Como se comentó anteriormente, es posible establecer una comunicación de múltiples canales paralelos, multiplicando la capacidad del sistema. En un sistema en modo MIMO, el *throughput* puede llegar a multiplicarse por un factor similar al número de elementos del *array*, aunque a costa de disminuir la

distancia de cobertura. Esta característica permite establecer sistemas de acceso múltiple por división espacial (SDMA).

Por otro lado, también es posible transmitir esta misma capacidad aumentada en una única dirección siempre que el sistema del receptor implemente la misma tecnología y con el mismo número de elementos del *array*.

3.5. Diversidad espacial en entornos sin línea de vista: NLOS

El uso de algoritmos adaptativos permite la adaptación al entorno, aprovechando las reflexiones en el terreno para conseguir establecer la comunicación en condiciones de No Línea de Vista [15][16]. Mediante técnicas de diversidad espacial se orientan los haces en las direcciones adecuadas para conseguir interferencia constructiva de la señal en el receptor.

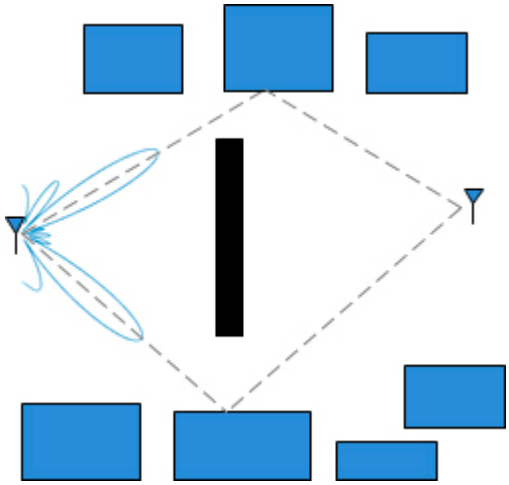


Figura 5. Comunicación en entorno sin línea de vista (NLOS).

4. Conclusiones

El procesado digital individual de cada una de las señales procedentes de los elementos del *array* permite ejecutar diferentes algoritmos de *beamforming* de forma simultánea a velocidad de símbolo, además de generar múltiples haces en diferentes direcciones del espacio, con posibilidad de enviar información diferente en cada uno de ellos. Todo ello implica una alta optimización de los recursos radioeléctricos.

Las antenas con *beamforming* digital desarrolladas por INSTER para comunicaciones militares, proporcionan importantes ventajas tácticas tales como el aumento de la distancia de cobertura y disminución de la potencia total radiada, la posibilidad de detección de la dirección de llegada de señales enemigas, la detección y cancelación de señales interferentes (*antijamming*), la minimización de la huella electromagnética, el aumento de la capacidad mediante multiplexación espacial y el establecimiento de la comunicación en condiciones sin línea de vista.

Referencias

1. *Van Trees H. Optimum array processing. New York: Wiley-Interscience; 2002.*
2. *Visser H. Array and phased array antenna basics. Chichester: Wiley; 2006.*
3. *Choi L, Murch R. A Transmit Preprocessing Technique for Multiuser MIMO Systems Using a Decomposition Approach. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2004;3(1):20-24.*
4. *Balanis C. Antenna theory. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience; 2005.*

5. *Foschini G, Gans M. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas. Wireless Personal Communications. 1998;6(3):311-335.*
6. *Goldsmith A, Jafar S, Jindal N, Vishwanath S. Capacity limits of MIMO channels. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2003;21(5):684-702.*
7. *Jordan E, Balmain K. Electromagnetic waves and radiating systems. New Delhi: Prentice-Hall of India; 2008.*
8. *Rao A, Sarma N. Adaptive Beamforming Algorithms for Smart Antenna Systems. WSEAS Transactions and Communications. 2014;13(5):44-50.*
9. *Steinhardt A, Van Veen B. Adaptive beamforming. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 1989;3(3):253-281.*
10. *Adve R. Optimal Beamforming [Internet]. Comm.utoronto.ca. 2018 [cited 11 Sep 2018]. Available from: https://www.comm.utoronto.ca/~rsadve/Notes/BeamForming*
11. *Adve R. Direction of Arrival Estimation [Internet]. Comm.utoronto.ca. 2018 [cited 11 Sep 2018]. Available from: https://www.comm.utoronto.ca/~rsadve/Notes/DOA.pdf*
12. *Li F, Vaccaro R. Unified analysis for DOA estimation algorithms in array signal processing. Signal Processing. 1991;25(2):147-169.*
13. *Abeida H, Zhang Q, Li J, Merabtine N. Iterative Sparse Asymptotic Minimum Variance Based Approaches for Array Processing. IEEE Transactions on Signal Processing. 2013;61(4):933-944.*
14. *Gupta P, Verma V. Optimization of MUSIC and Improved MUSIC Algorithm to Estimate Direction of Arrival. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing. 2016;8(12):30-37.*
15. *Cardoso J, Souloumiac A. Blind beamforming for non-gaussian signals. IEE Proceedings F Radar and Signal Processing. 1993;140(6):362.*
16. *Larsson E, Edfors O, Tufvesson F, Marzetta T. Massive MIMO for next generation wireless systems. IEEE Communications Magazine. 2014;52(2):186-195.*

Sistema de navegación ISNAV para el VCR 8x8

Sillero Herrero, Eugenio[1,*]

[1] Jefe del proyecto 8X8NAVDISP, División de Sistemas de Aviónica, GMV Aerospace and Defence. C/ Isaac Newton 11, PTM, Tres Cantos, 28760 Madrid.

* esillero@gmv.es: ESH.

Resumen

En el marco de los programas tecnológicos del VCR8x8, GMV ha desarrollado un navegador vehicular (ISNAV) basado en una arquitectura híbrida de navegación inercial y por satélite. Dicho navegador integra una unidad de navegación inercial y un receptor GNSS compatible con el futuro receptor de señal regulada (PRS) Galileo, en cuyo desarrollo también participa GMV.

ISNAV, que es la solución avanzada de navegación y referencia de tiempo de GMV para el VCR 8x8, se ha desarrollado siguiendo un innovador diseño modular para aislar el sistema de misión de la configuración del navegador. Este diseño modular le permite ser compatible con diferentes tipos de unidades inerciales y de tecnologías de navegación GNSS. ISNAV incorpora la siguiente tecnología que convierte a este navegador en una solución robusta y versátil en el estado del arte:

- Navegación por satélite multiconstelación que permite mejorar la disponibilidad y robustez de los datos GNSS mediante nuevos algoritmos de selección y monitorización de satélites.
- Capacidad de recepción de señales Galileo PRS. GMV forma parte del único consorcio español con autorización de la GSA para la fabricación y comercialización de receptores Galileo PRS.
- Compatibilidad con unidades de navegación inercial (INS) externas para permitir una navegación robusta en zonas cubiertas o con navegación por satélite denegada (presencia de *jamming*). El INS seleccionado cuenta con giróscopos de fibra óptica de última generación que permiten comenzar la navegación incluso en ausencia de señales GNSS externas.

ISNAV funciona además como fuente de tiempo para la red vehicular. Con este fin incorpora un servidor de tiempo para la sincronización de los equipos embarcados y una fuente pulsada sincronizada con el tiempo UTC, para aquellos equipos que requieran una mayor precisión en la señal temporal.

Palabras clave

VCR 8x8, navegación, multiconstelación, PRS, INS.

1. Introducción

1.1. Contexto

GMV ha desarrollado bajo contrato con INDRA el sistema de navegación vehicular ISNAV, a integrar en los futuros blindados VCR 8x8. El proyecto se desarrolla en el marco de los «programas tecnológicos asociados al futuro vehículo de combate sobre ruedas (VCR 8x8)» y tiene como objetivo fabricar un sistema nacional de navegación y distribución de tiempo para el VCR 8x8.

En este sentido se aprovecha la dilatada experiencia de GMV en el desarrollo de algoritmos y equipos de navegación, donde se pueden citar como ejemplos destacados: las aplicaciones PPP propietarias de GMV; el algoritmo IBPL patentado por GMV; el receptor GNSS SW desarrollado por GMV, base del detector de *jamming* SRX-10i de GMV y del receptor Galileo PRS en desarrollo actualmente por GMV; el navegador del RPA ATLANTE, que desarrolla una hibridación *tightly-coupled* GNSS-inercial, ofreciendo además capacidad ATOL al RPA; o el sistema de navegación SENDA, actualmente en desarrollo por GMV para el programa F-110.

1.2. Objetivos del sistema de navegación vehicular del VCR 8x8

ISNAV tiene como funciones principales:

- Generar la solución de navegación del vehículo y proporcionarla al sistema de misión. Para ello usa datos provenientes de receptores GNSS, integrados en el sistema, para obtener un posicionamiento multiconstelación e hibridarlos con los datos de posicionamiento y orientación calculados por una unidad de navegación inercial (INS) externa. El sistema está preparado para incorporar un receptor Galileo PRS para conferir mayor robustez y disponibilidad a la solución de navegación.
- Generar la referencia temporal del vehículo en distintos formatos, suministrando la señal y datos de tiempos, sincronizada al tiempo GPS, a todos los elementos que la precisen.

La solución de navegación y las señales de tiempo son suministradas a los distintos sistemas del vehículo mediante interfaces de datos o señales físicas, por lo que el sistema habilita e implementa varios tipos de interfaces HW y SW de forma modular. De este modo se proporciona un sistema fácilmente adaptable a las diferentes configuraciones que están previstas para el VCR 8x8.

1.3. Alcance del artículo

Este artículo no pretende dar una explicación detallada del sistema, teniendo en cuenta que aún está en fase de aceptación, que hay elementos confidenciales, y que dicha explicación está muy ligada a la particular arquitectura del vehículo para la que se desarrolla el sistema.

Por el contrario, el objetivo principal es incidir en las principales innovaciones tecnológicas que aporta el sistema ISNAV, en particular en el uso de navegación GNSS multiconstelación, el uso de señales Galileo PRS y la integración con una unidad inercial externa.

2. Navegación GNSS multiconstelación

El sistema ISNAV debe proporcionar la solución de posicionamiento basada en la fusión de los datos provenientes de varias constelaciones (GPS, Galileo y GLONASS), lo que abre una problemática no existente anteriormente: la necesidad de realizar una fusión de los datos de estas constelaciones para proporcionar la solución de navegación. Además, en determinadas situaciones puede darse un exceso en la disponibilidad de satélites, lo que puede llevar a sobrecargar el procesador de navegación sin aportar una ventaja significativa. En consecuencia, se han estudiado las siguientes mejoras para facilitar la integración de las señales de múltiples constelaciones:

1. Optimización de la fusión de las medidas de pseudodistancias a cada satélite.
2. Optimización de la selección del conjunto de satélites usados en la solución de navegación.
3. Mejoras de la integridad de la solución mediante el uso de sistemas de aumentación por satélite (SBAS).

2.1. Fusión de observables

El sistema de navegación ISNAV está preparado para trabajar en una frecuencia o en varias bandas para cada constelación. El procesado multifrecuencia permite construir para cada satélite, independientemente de la constelación a la que pertenezca, un único observable suavizado y corregido para tener un residuo de error pequeño.

Sobre estos observables suavizados y corregidos se aplican las técnicas óptimas de fusión:

1. Se selecciona el conjunto óptimo de satélites para calcular la posición, velocidad y tiempo del receptor. Esta selección se realiza optimizando la geometría de observación de los satélites desde la posición del receptor.
2. Se realiza un algoritmo de exclusión de satélites FDE (*Fault Detection and Exclusion*) que elimina satélites en base a una comprobación estadística de los residuos de error, lo que permite detectar datos que se desvíen de la solución global. Este algoritmo aprovecha las distintas fuentes para valorar simultáneamente los datos de todos los satélites utilizados.
3. Finalmente, con los observables que permanezcan, de las distintas constelaciones, se obtiene mediante filtrado la solución de navegación:

$$\begin{bmatrix} \frac{\tilde{x}-x^{s1}}{r^{s1}} & \frac{\tilde{y}-y^{s1}}{r^{s1}} & \frac{\tilde{z}-z^{s1}}{r^{s1}} & 1 & k & l \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\tilde{x}-x^{sn}}{r^{sn}} & \frac{\tilde{y}-y^{sn}}{r^{sn}} & \frac{\tilde{z}-z^{sn}}{r^{sn}} & 1 & k & l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ c\Delta t_{GPS} \\ c\Delta t_{GPS-Galileo} \\ c\Delta t_{GPS-GLONASS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}^{s1} - r^{s1} \\ \vdots \\ \hat{\rho}^{sn} - r^{sn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

- $\hat{\rho}^s$: Pseudodistancia corregida y suavizada del satélite *s*.
- r^s: Distancia entre la posición estimada a priori del receptor $(\tilde{x},\tilde{y},\tilde{z})$ y la del satélite *s* (x^s,y^s,z^s), obtenida de las efemérides descargadas del mismo.
- Δt_{GPS}: Desviación del reloj del receptor de la base de tiempos GPS.
- $\Delta t_{GPS\text{-}Galileo}$: Diferencia entre la base de tiempos GPS y Galileo.
- $\Delta t_{GPS\text{-}GLONASS}$: Diferencia entre la base de tiempos GPS y GLONASS.
- *k*: Término escalar que vale 0 si el satélite *s* es de la constelación GPS o GLONASS y 1 si es de la constelación Galileo.

· l: Término escalar que vale 0 si el satélite s es de la constelación GPS o Galileo y 1 si es de la constelación GLONASS.

· c: Velocidad de la luz.

· $\Delta x,\Delta y,\Delta z$ :: Desplazamiento entre la posición estimada a priori del receptor (x^s,y^s,z^s), y la posición que minimiza los residuos de los datos de los receptores (la salida del proceso).

Este proceso proporciona la posición del centro de fases de la antena GNSS conectada al receptor, ($\tilde{x}+\Delta x,\tilde{y}+\Delta y,\tilde{z}+\Delta z$) el desfase entre el tiempo GPS y el tiempo del reloj del receptor y la diferencia de los tiempos de referencia de las distintas constelaciones.

Es decir, como resultado final se obtiene una única posición que tiene en cuenta los mejores datos disponibles (observables) de todas las constelaciones, así como los desfases temporales entre el receptor GPS y el tiempo GPS y entre las referencias de tiempos de las constelaciones.

2.2. Selección de satélites

El aumento en la disponibilidad de satélites por usar varias constelaciones hace que el número de canales de seguimiento tenga que aumentarse. No obstante, el uso de todos los satélites en vista ofrece pocas ventajas ya que la mejora en las prestaciones de la solución tiene un comportamiento asintótico y la mejora marginal es muy pequeña a partir de aproximadamente 12 satélites. En consecuencia, es necesario seleccionar un juego de satélites que permita optimizar la geometría de la solución sin sobrecargar al receptor o al procesador de navegación [1].

Para ello, GMV ha desarrollado un algoritmo propietario: la selección por estimación ponderada por reducción (EPR). En este algoritmo se usa una combinación de selección óptima de tetraedros de satélites para cada constelación. Esta selección resulta óptima para cuatro satélites si se maximiza el volumen de los tetraedros [2]. En una segunda fase se sanea la selección asignando satélites de máxima elevación. Además se divide el cielo en sectores y se asegura seleccionar satélites dentro de cada uno de ellos, para equilibrar la geometría [3]. Finalmente, el resto de posiciones en los canales de procesado se seleccionan mediante búsqueda exhaustiva para optimizar la dilución de precisión.

El algoritmo de GMV (PER) se ha comparado con otros algoritmos de selección [2, 3], con el algoritmo de selección por búsqueda exhaustiva (OSSA) [4] que garantiza la selección óptima y con el caso de uso de todos los satélites disponibles. Los resultados obtenidos para el algoritmo PER muestran que se aproxima al caso óptimo de forma más eficiente que otros algoritmos reportados en la literatura y que la sobrecarga computacional no es elevada:

Algoritmo	PDOP [m]	Tiempo de computación [a. u]	Error medio [m]	Desviación del error (s) [m]	Número de cambios de satélites
Sin selección	1,082	-	2,11	0,87	-
OSSA [4]	1,2112	1	2,46	1,17	312
MVA [2]	19,2116	$5\cdot10^{-5}$	18,12	19,15	227
Dartboard [3]	2,272	$1\cdot10^{-4}$	3,41	1,85	296
PER (GMV)	1,5436	$2\cdot10^{-4}$	2,72	1,24	444

Tabla 1. Comparativa del desempeño de varios algoritmos de selección para un caso de observación de 24 horas de datos GPS/Galileo

En la tabla comparativa se puede ver que el algoritmo PER se aproxima en cuanto a prestaciones al algoritmo óptimo (OSSA) pero consiguiendo una gran reducción del tiempo de computación. El dato que penaliza al PER es que es más susceptible a cambiar el conjunto de satélites utilizados. No obstante, esta propensión al cambio se puede reducir (obteniendo valores de 251 cambios en 24 horas) si se añade una histéresis, con efectos despreciables en el resto de características.

2.3. Uso de SBAS

Para permitir tener una fuente externa de integridad sobre las señales GNSS se pueden usar los sistemas de aumentación por satélite (SBAS). En concreto, ISNAV está preparado para usar tanto el sistema EGNOS como WAAS.

Estos sistemas permiten incorporar correcciones sobre las posiciones calculadas para los satélites a partir de las efemérides distribuidas en los mensajes de navegación. De este modo, se mejora la precisión de la posición y se eliminan sesgos en los datos, mejorando las características del posterior filtro de hibridación GNSS/INS. Además proporcionan alertas para descartar satélites que envían datos defectuosos, permitiendo descartar satélites fallidos o interferidos.

3. Compatibilidad con Galileo PRS

Los sistemas de navegación más extendidos en las FFAA están basados en el uso de señales de GPS. Esto se debe a que, por una parte, el uso de señales encriptadas de GPS está permitido al Ejército español y, por otra parte, el estado de las señales del sistema GNSS europeo (Galileo) ha entrado en fase inicial de operación recientemente [5].

No obstante, para los sistemas de navegación de nuevo desarrollo resulta posible incorporar receptores Galileo de señal regulada, por cuanto el calendario previsto para la operación de la constelación Galileo encaja con el calendario de puesta en servicio de los sistemas modernizados. La hoja de ruta del desarrollo de las capacidades de Galileo prevé pasar a la fase de capacidades operacionales completas (FOC) en 2019, con previsión de tener satélites Galileo operativos en todas las posiciones orbitales para 2020, completando el número de 24 satélites activos. En consecuencia, el VCR 8x8 podrá contar con la disponibilidad completa del sistema Galileo cuando entre en servicio. En la actualidad el servicio cuenta con 17 satélites activos y 5 en fase de pruebas en órbita, que pasarán a estar activos en los próximos meses. Por ello ya es posible utilizar el sistema Galileo para obtener navegación con suficientes garantías de precisión, disponibilidad y cobertura.

El uso de señales encriptadas tiene ciertas características de mejora de precisión, debido a la mejor resolución temporal de la señal de código, de resistencia a *jamming*, debido al diseño de distribución espectral, y de protección frente a *spoofing*, debido a la longitud de los códigos y al uso de cifrado con claves restringidas. Los receptores GPS militares usados por las FFAA están dotados de estas características en virtud de un módulo (SAASM) que les permite descifrar la señal militar GPS (mediante el descifrado y seguimiento del código P(Y)).

De forma análoga, los receptores Galileo a utilizar en el VCR 8x8 deben ser de nivel gubernamental, lo que en el caso de Galileo se obtiene utilizando receptores PRS (*Public Regulated Service*), que ofrecen características análogas a los receptores militares GPS de mejor recepción en entornos de *jamming* y protección frente a *spoofing* por usar una señal encriptada.

La explotación de la señal Galileo PRS estará reservada a usuarios gubernamentales autorizados [6]. El diseño de la señal PRS está clasificado pero la GSA ha declarado que sus características permiten la protección frente a interferencias externas. El diseño del servicio se ha centrado en proporcionar una mayor robustez y disponibilidad que el servicio GPS P(Y). El servicio Galileo PRS está disponible en dos frecuencias, para permitir la corrección de errores dispersivos en la señal, y sitúa los lóbulos principales de las señales en zonas del espectro con menor ocupación. Por otra parte, se ha buscado implementar un sistema de distribución de claves mediante canales seguros para permitir facilitar la gestión de las actualizaciones sin una merma en la seguridad del sistema.

GMV forma parte del único consorcio español con autorización de la GSA para la fabricación y comercialización de receptores Galileo PRS, por lo que se plantea la incorporación de dicho receptor PRS (PRESENCE) dentro de ISNAV. Esto permite además trasladar al equipo de desarrollo de PRS algunas necesidades específicas del VCR 8x8, tanto a nivel técnico como operativo. Además, permite al equipo de desarrollo de ISNAV conocer las características de PRESENSE para facilitar su integración.

4. Navegación INS

La unidad de navegación inercial seleccionada para el navegador vehicular del VCR 8x8 se basa en unos giróscopos de fibra óptica (FOG) y unos acelerómetros micro-mecánicos (MEMS). El elemento crítico es el giróscopo, ya que de sus datos se determina el apuntamiento del vehículo y de eso depende en gran medida la precisión del posicionamiento obtenido mediante los algoritmos de navegación inercial.

Los giróscopos de fibra óptica se basan en comparar la fase de dos pulsos de luz que viajan en sentidos contrarios a lo largo de una bobina circular de fibra óptica. Los dos haces se recogen a la salida y se combinan en un detector de interferometría. Para evitar tener problemas de precisión debido a deformaciones o vibraciones se usa un esquema de tipo *lock-in*, que modula el pulso de luz inyectado en la bobina y activa el detector de forma coherente a la modulación. Mediante este esquema y aprovechando las medidas de los acelerómetros se pueden compensar las incertidumbres a bajas velocidades de rotación y mitigar los efectos de las vibraciones [7]. También, mediante el uso de esquemas de procesado más avanzados y sensores de temperatura se consigue la estabilización térmica de la medida [8].

La medida de la velocidad angular se basa en el desfase que sufren ambos haces por efecto Sagnac. Si se aplica una velocidad de rotación normal al plano de la bobina las ondas reconstruidas muestran una diferencia de fase que puede ser medida mediante un detector de interferometría e inferir la velocidad de rotación mediante [9]:

$$\varphi_c \approx \frac{8\pi NA\omega}{c\lambda_0} \qquad (2)$$

Para el VCR 8x8 la Oficina de Programa ha seleccionado como INS una unidad con tres giróscopos de fibra óptica y tres acelerómetros MEMS. Esta unidad es capaz de calcular la actitud tridimensional del vehículo y propagar la posición en caso de pérdida de señal GNSS con un error inferior al 1 % de la distancia recorrida. Además, los giróscopos tienen unas características de estabilidad excelentes (0,1º/h de reproducibilidad y 0,05º/h de estabilidad), lo que le permite calcular su actitud inicial de forma autónoma, sin necesidad de aportar datos desde sensores externos. Esta unidad incorpora los mecanismos de compensación antes mencionados y permite su uso en los entornos previstos. De hecho, unidades similares están entrando en servicio en piezas de artillería de 105mm o 155mm, donde los requisitos de choque son altamente exigentes.

5. Fusión GNSS/INS

El sistema de navegación ISNAV utiliza la información proporcionada por los dos sensores para crear una única solución fusionada de posición, velocidad, actitud y tiempo. En la combinación de ambas fuentes se pretende explotar las características beneficiosas de cada sensor a la vez que se mitigan sus limitaciones.

El receptor GNSS proporciona una medida de la posición a partir de una fuente externa que permite obtener una solución con un error acotado a largo plazo aunque los errores a corto plazo pueden ser de varios metros. Por otra parte, los sensores inerciales proporcionan una fuente interna para propagar una solución. La propagación de la solución de navegación que realiza el sistema inercial se basa únicamente en las medidas realizadas, mediante los giróscopos y acelerómetros, sobre el propio vehículo, lo que proporciona una gran precisión a corto plazo pero que puede ser inestable a largo plazo. Al usar una arquitectura fusionada GNSS/INS se obtiene una solución de navegación con un error acotado a largo plazo (estabilizado por los datos GNSS) y con una buena precisión a corto plazo (aprovechando la sensibilidad del sistema INS). Además, el uso combinado de ambos sensores permite la detección de desviaciones debidas a fallos del sistema o a interferencias intencionadas en las señales GNSS [10].

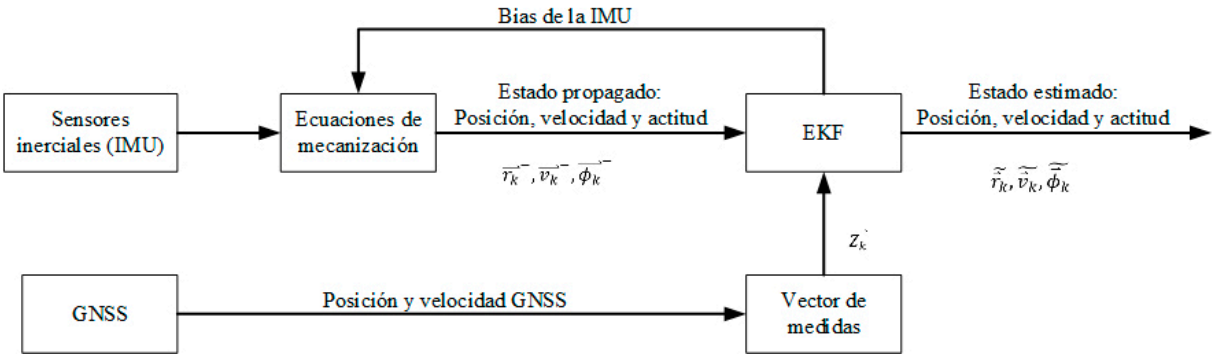


Figura 2. Esquema de hibridación de los datos GNSS/INS.

En ISNAV se usa un esquema de hibridación por filtro Kalman extendido (EKF) para hibridar la solución de posición, velocidad y tiempo obtenida por el receptor GNSS con los datos de posición, velocidad y apuntamiento calculados por el navegador inercial. Este esquema se conoce como *loose-coupling* y es compatible con cualquier INS de grado de navegación que se pueda encontrar en el mercado, ya que no requiere del acceso a los datos internos de los sensores inerciales. Se usa el algoritmo EKF ya que este permite mantener datos válidos de navegación en caso de pérdida o desvanecimiento de señal GNSS. Además, el EKF resulta un estimador óptimo, siempre que se pueda asegurar que el error residual de las medidas de los sensores se pueda modelar mediante variables aleatorias independientes de media nula [11].

Finalmente, para poder tener una medida adicional, que permita tener una mayor estabilización del filtro, se añaden al filtro de navegación los datos de la señal de pulsos de la transmisión. De este modo se puede tener una medida real de la velocidad del vehículo, que permite añadir al filtro una medida extra de la velocidad de avance. Además, el uso de esta tercera fuente de información permite discriminar los casos de fallo, mediante chequeos de coherencia, para determinar si los datos espurios provienen del INS o del receptor GNSS.

6. Conclusiones

En este artículo se han expuesto las principales innovaciones incorporadas en el sistema ISNAV, detallando nuevos algoritmos y subsistemas que incorpora para mejorar la precisión de la solución de navegación.

Se han descrito las mejoras introducidas en la navegación GNSS mediante el uso de datos de varias constelaciones. Para ello se han desarrollado nuevos algoritmos para la optimización de la fusión de datos. Además se han descrito las novedades que introducirá el uso del nuevo receptor de Galileo PRS que se está desarrollando por parte de la industria nacional, y que permitirá el uso de señales restringidas europeas de navegación por parte de las FFAA.

Además se ha descrito la arquitectura modular del sistema de navegación, que hace uso de una unidad de navegación inercial externa para aumentar la robustez de los datos proporcionados al sistema de misión. Se ha descrito el esquema de hibridación con la señal GNSS para construir un único juego combinado de datos de posición, velocidad, actitud y tiempo.

Estas innovaciones, unidas al diseño específico del sistema ISNAV para las necesidades de las FFAA y a su diseño modular, que permite la incorporación de nuevos algoritmos para mejorar la precisión, la integridad, o modificar aspectos particulares de implementación, y añadir interfaces a medida, convierten a ISNAV en un sistema de navegación en el estado del arte a nivel mundial.

Agradecimientos

El autor quisiera mostrar su agradecimiento a la oficina de programa del VCR8x8, especialmente al coronel Manuel Jesús de Hoyos Sánchez, por su confianza y apoyo en el desarrollo de ISNAV, al capitán Fernando Moral Jiménez y al capitán Carlos Alberto Álvarez García.

Igualmente quisiera agradecer a nuestro cliente directo, INDRA, en particular a Vicente Martín Villanueva, Esperanza Rubio Hortells, Aitor Vigara Zaera, Gregorio González Manchado, Manuel González Ortega y Rosa Ana Muñoz Tejedor, por su hábil supervisión y colaboración en el proyecto.

Finalmente, tengo que agradecer a Ricardo Sáenz Amandi, director de Programas de GMV, Daniel Montero Yéboles, jefe de la División de Aviónica de GMV y en general a todo el equipo de desarrollo de sistemas de navegación en GMV por su espléndido trabajo y dedicación durante años en el desarrollo de equipos embarcados de navegación.

El desarrollo de ISNAV se ha llevado a cabo dentro del marco de los «programas tecnológicos asociados al futuro vehículo de combate sobre ruedas (VCR 8x8)». (Expediente DGAM número 1003215006500).

Referencias

1. *Nie Z, Gao Y, Wang Z, Ji S. A new Method for Satellite Selection with Controllable PDOP Threshold. Surv. Rev. 2016; 49(355):285-293.*
2. *Kong J H, Mao X, Li S. BDS/GPS Satellite Selection Algorithm based on Polyhedron Volumetric Method. IEEE/SICE International Symposium on System Integration. 2014.*
3. *Fernández A, D' Angello P, Diez J, Marradi L, Gabaglio V. Navigation Algorithm Optimisation for Combined Galieleo/GPS Receivers with GRANADA Environment and Navigation Simulator. Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. 2005.*
4. *Roongpiboonsopit D, Karimi H A. A Multi-Constellations Satellite Selection Algorithm for Integrated Global Navigation Satellite Systems. J. Intell. Trans. Sys. 2009; 13(3):127-141.*
5. *Galileo Initial Open Service (OS) Declaration (NAGU 2016063) [2016 Dec 15]. Disponible en: https://www.gsc-europa.eu/notice-advisory-to-galileo-users-nagu-2016063*
6. *Galileo: Secure satellite navigation for emergency and security services (IP/10/1301). European Comission; 2010.*
7. *Lin J-D, Kung-Hung K, Jin-Ching Y. Optimal Design of a Second-Order Fibre-Optic Gyroscope Dynamic System. Meas. Sci. Technol. 1994; 5(8):954-959.*
8. *Venkata Anuhya A, Venkatram N. Suppression of Thermal Effect on Closed Loop Fiber Optic Gyroscope. Ind. J. Sci. Technol. 2015; 8(15).*
9. *Lefèvre H. The Fiber-Optic Gyroscope. Artech House; 1993.*
10. Montero D. Sistema SENDA para la fragata F110. V Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad. 2017.
11. *Crassidis J. L, Junkins J. L. Optimal Estimation of Dynamic Systems. CRC Press; 2012.*

DESi+d

Implementación en FPGA del algoritmo SIFT para la extracción de puntos característicos de imágenes VGA en tiempo real

Díaz Madrid, José Ángel[1,*], Doménech Asensi, Ginés[2], Rubio Ibáñez, Pablo[2], Martínez Álvarez, José Javier[2], Ruiz Merino, Ramón[2], Zapata Pérez, Juan[2], López Alcantud, José Alejandro[2] , García Peñalver, Manuel[3] y Rodríguez Bermúdez, Germán[1].

[1] Dpto. de Ingeniería y Técnicas Aplicadas. Centro Universitario de la Defensa del Ejercito del Aire, C/Coronel López Peña s/n, Base Aérea de San Javier, 30720. Santiago de la Ribera, Murcia (España). Correo electrónico: jose.diaz@cud.upct.es

[2] Dpto. de Electrónica, Tec. Computadoras y Proyectos. Universidad Politécnica de Cartagena, Plaza del Hospital, 1 Cartagena 30202 (Murcia). Correo electrónico: gines.domenech@upct.es

[3] Sistemas Navantia, Navantia, Carretera La Algameca s/n. Correo electrónico: mgpenalver@navantia.es

Email:

* Díaz Madrid, José Ángel; jose.diaz@cud.upct.es

Resumen

Este trabajo describe una implementación en tiempo real del algoritmo *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT). Este algoritmo es uno de los detectores de características más populares en el campo del procesamiento de imágenes. El algoritmo consta de dos etapas: una primera etapa en la que se identifican puntos característicos de la imagen y una segunda etapa en la que se genera un vector de características o vector descriptor para cada uno de estos puntos. La utilidad de este algoritmo es la de poder identificar, en una etapa posterior de procesamiento, correspondencias o coincidencias entre objetos en imágenes captadas con diferentes ángulos y a diferentes distancias, aunque también presenta cierta flexibilidad para cambios en iluminación. Una aplicación característica de este algoritmo es la de hacer seguimiento de objetos en secuencias de vídeo.

El principal reto que plantea este algoritmo es que, debido a su gran coste computacional, se ha de ejecutar sobre microprocesadores de gran potencia, lo que supone un gran consumo eléctrico y una reducción en su capacidad para ser empleado en sistemas portátiles ligeros. En este sentido, la implementación del algoritmo sobre un *hardware* específico, de tipo digital programable o incluso integrado, en vez de en una computadora de propósito general, contribuiría sin duda a una gran mejora en este aspecto.

Para poder alcanzar el requisito de tiempo real (más de 30 imágenes por segundo), en este trabajo se han probado diferentes simplificaciones del algoritmo, que además han sido necesarias para poder realizar su implementación en *hardware*. La arquitectura propuesta se ha implementado sobre una FPGA Xilinx Virtex 5 a una frecuencia de reloj de 100 MHz. El sistema desarrollado es capaz de generar un máximo de 3.072 vectores descriptores para imágenes de tamaño VGA en escala de grises a una velocidad de 99 imágenes por segundo.

Palabras clave

SIFT, FPGA, Visión por computador, tiempo real.

1. Introducción

La correspondencia entre imágenes captadas desde diferentes perspectivas es fundamental para realizar el seguimiento de objetos. En este ámbito, el algoritmo denominado *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT) es uno de los detectores de características más populares en la actualidad [1]. Consta de dos etapas principales: la etapa de extracción de puntos característicos (*keypoints* o KPs) y la etapa de generación de los vectores descriptores asociados a cada uno de esos puntos. Mientras que la primera etapa requiere la mayor carga de trabajo del algoritmo, la segunda emplea complejas operaciones aritméticas. La complejidad del algoritmo ha propiciado la aparición de diferentes arquitecturas *hardware* que, progresivamente, han ido alcanzando velocidades de procesamiento en tiempo real. La mayoría de estas implementaciones se han realizado sobre dispositivos programables de tipo FPGA, debido a la naturaleza inherentemente paralela del algoritmo. Así, en [2] y [3] se describen sendas propuestas de implementaciones mixtas *hardware/software* que utilizan procesadores embebidos. Estos diseños pueden procesar imágenes de tamaño QVGA y VGA respectivamente y generar sus vectores descriptores a una velocidad de 30 imágenes por segundo- esta es la velocidad que se considera como tiempo real en el campo de la visión por computador. El trabajo descrito en [4] presenta un desarrollo puramente *hardware* que funciona a la misma velocidad para imágenes VGA. Por último, en [7-9] se describen arquitecturas aún más rápidas. En este artículo se presenta una implementación de este algoritmo que hace uso extensivo de técnicas de *pipeline* para procesar imágenes VGA y obtener sus correspondientes vectores descriptores a tasas superiores al tiempo real, suponiendo un máximo de un 1 % de puntos característicos por imagen.

2. Generalidades sobre el algoritmo SIFT

Tal como se ha mencionado, este algoritmo consta de dos etapas principales. La primera de ellas se encarga de extraer puntos característicos, tal como se resume en la figura 1. Para ello, la imagen a procesar, denominada G_0, es filtrada sucesivamente mediante filtros gaussianos (K_i) de varianza σ_i^2 para crear un espacio de escalas gaussiano (GSS por sus siglas en inglés). A partir de aquí se crea el espacio de diferencias de gaussianas (DoG) restando cada imagen gaussiana adyacente. Cada pixel en estos espacios estará identificado mediante sus coordenadas espaciales, (x, y) y su valor de varianza σ. A partir de aquí, cada píxel en el espacio DoG se compara con sus 28 vecinos (8 píxeles en la misma DoG, y 9 en la superior e inferior, tal como muestra la figura 1.c).

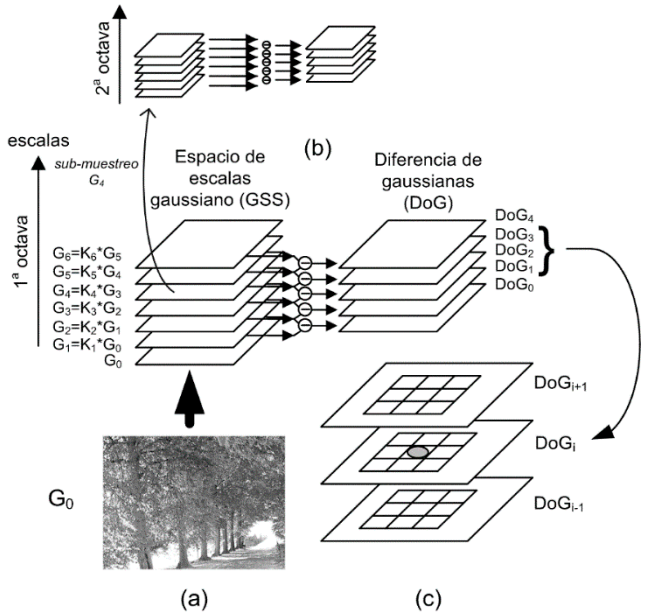


Figura 1. Extracción de puntos característicos en el algoritmo SIFT: a) imagen original; b) espacio gaussiano y de diferencia de gaussianas; c) identificación de puntos extremos.

Si el valor de este pixel es mayor o menor que el de sus vecinos, entonces es un extremo y pasa a ser un candidato a punto característico o *keypoint* (KP). Este proceso se repite para la siguiente octava, que se crea tomando como imagen inicial aquella obtenida mediante submuestreo de la gaussiana G4. Así, para una imagen de entrada de 640 x 480 pixels, la segunda octava será de 320 x 240 pixels. La etapa de extracción de KP consta de dos procesos adicionales. En primer lugar, aquellos puntos candidatos que tengan bajo contraste frente a sus vecinos son eliminados, y en segundo lugar la posición de los candidatos es refinada para obtener sus coordenadas exactas sub-pixel.

El segundo paso del algoritmo consiste en la generación del descriptor. Para ello, en primer lugar, se obtiene la orientación principal del KP, analizando un entorno de vecindad de la imagen, que es típicamente un cuadrado de 16x16 pixeles centrado en dicho KP. Se calcula la magnitud $m(x,y)$ y orientación $\theta(x,y)$ o<de cada uno de los píxeles de dicho entorno aplicando las siguientes expresiones, en las que $L(x,y)$ es el valor de intensidad del pixel (x,y).

$$\Delta x = L(x+1, y) - L(x-1, y) \quad (2)$$
$$\Delta y = L(x, y+1) - L(x, y-1)$$

$$m(x, y) = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (3)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (4)$$

Los valores de magnitud se almacenan en un histograma de 36 variables, cada una de ellas correspondiente a un intervalo de ángulos de 10º. Cada valor acumulado en el histograma es a su vez multiplicado por un coeficiente de suavizado que depende del valor de σ. La orientación principal del KP corresponderá a la variable que acumule el mayor valor. Las variables del histograma cuyo valor supere el 80 % del valor máximo darán lugar a un nuevo KP con las mismas coordenadas, pero con una nueva orientación. Cuando se ha calculado la orientación principal se puede construir el vector descriptor. Tal como se muestra en la figura. 2, el entorno de vecindad se divide en 16 subregiones de 4x4 pixeles. Para cada una de estas regiones se calcula la orientación principal siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, pero empleando histogramas de 8 variables, y rotando la imagen para alinearla con la orientación principal del KP.

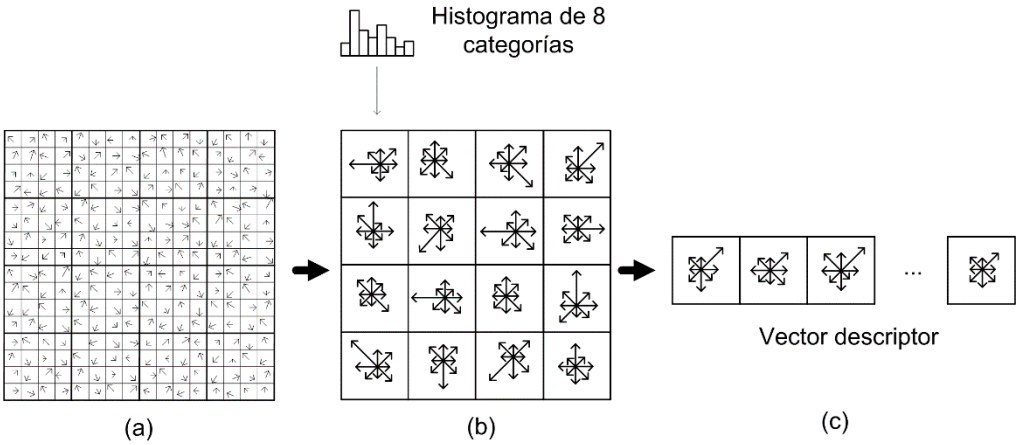


Figura 2. Generación del vector descriptor.

Finalmente, los valores de las 8 variables de estos 16 histogramas se concatenan para formar un vector de 128 elementos. Este vector es posteriormente normalizado para mejorar la estabilidad frente a cambios de iluminación.

3. Arquitectura hardware propuesta

En la figura 3 se muestra el esquema de la arquitectura propuesta para una solo octava. Tomando como referencia la anatomía del algoritmo, consta de dos módulos principales que operan en paralelo: el módulo de extracción de puntos característicos y el módulo generador de los vectores descriptores. Ambos están conectados a una memoria en la que se almacena la dirección de cada punto característico en la imagen. El primer módulo escribe las direcciones en esta memoria, que en realidad consta de dos memorias operando en modo ping-pong para almacenar los puntos extraídos de las imágenes pares e impares en tiempo real. El módulo de generación de vectores lee las direcciones de los KP de una de estas memorias una vez que el proceso de extracción de KP de la imagen ha finalizado. Para cada KP, su vecindario se lee de la memoria de imagen y es procesado para construir el vector descriptor. Dado que el proceso de generación de vectores descriptores es independiente del proceso de extracción de KP, ambos procesos se ejecutan en modo *pipeline*. De este modo, mientras que los descriptores de una determinada imagen se están construyendo, se puede procesar simultáneamente la siguiente imagen para extraer sus KP. En los siguientes párrafos se detallan estas operaciones.

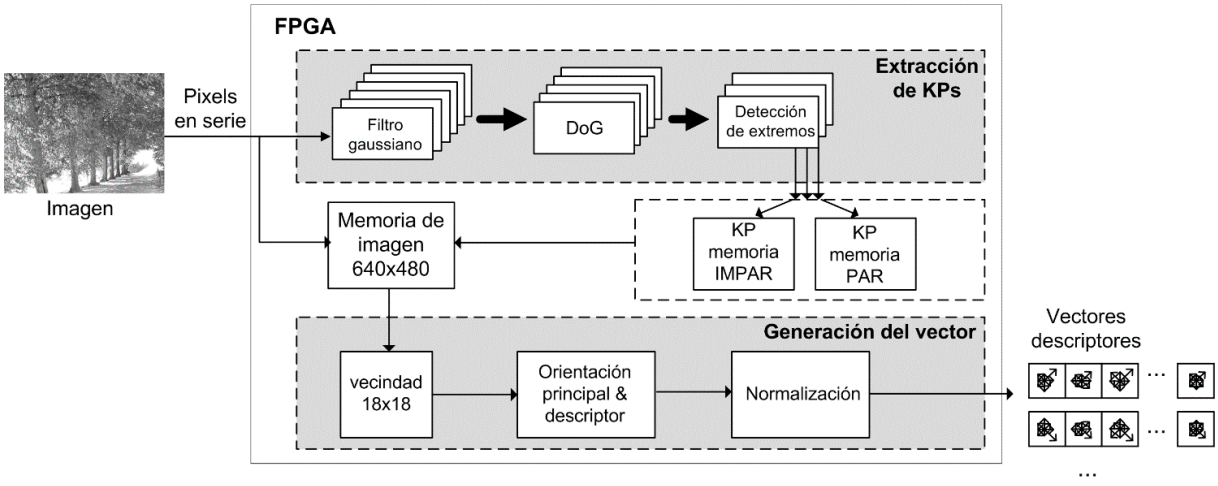


Figura 3. Arquitectura del algoritmo SIFT implementada sobre la FPGA.

El módulo de extracción de KP se ha diseñado para procesar un pixel de imagen por ciclo de reloj. De forma simultánea a su procesamiento en el módulo de extracción de KP, cada pixel se almacena en la memoria de imagen (figura 3). En el caso de que el pixel procesado resulte ser un KP, sus coordenadas

se almacenan en la «KP memoria». Para lograr esta velocidad de procesamiento se ha empleado un esquema de ventana deslizante que construye los espacios GSS y DoG y detecta los puntos extremos (figura 4). En esta implementación se construye una octava de seis escalas y cinco DoG. La operación de filtrado gaussiano se ha descompuesto empleando la propiedad de separabilidad [10] que permite descomponer un filtro bidimensional NxN en dos filtros concatenados de una dimensión. Esto permite reducir el número de multiplicadores hardware de N^2 a 2N.

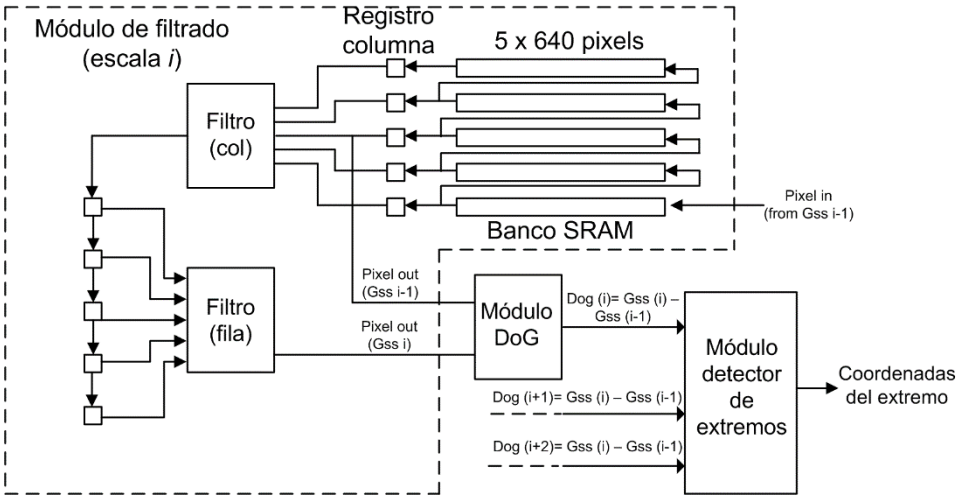


Figura 4. Estructura de la arquitectura empleada para la extracción de KP.

Al banco SRAM entran pixeles de la gaussiana previa, o de la cámara si se trata de la primera gaussiana. Cada fila alimenta a la fila adyacente y a un registro previo al filtro de columna. A la salida de este filtro se conecta un registro en serie que alimenta al filtro de fila. La imagen filtrada que se va obteniendo se lleva al módulo DoG para realizar la resta con la imagen previa. Por último, la salida de este módulo alimenta al módulo detector de extremos donde se realiza la comparación con los 26 píxeles vecinos. La figura 5 muestra el cronograma de la estructura *pipeline* diseñada para explotar el paralelismo entre las diferentes etapas del algoritmo. Centrándonos en la primera etapa, cada operación consecutiva de filtrado (desde *Gauss* 2 a *Gauss* 6) comienza con un cierto retraso. Este se debe a que para poder realizar el filtrado de la segunda imagen (Gauss2), al menos las primeras filas de la primera imagen deben haber sido filtradas (*Gauss* 1). Una vez que comienza *Gauss* 2, se puede empezar a calcular la diferencia entre las dos primeras gaussianas (DoG1). Este proceso es idéntico para el resto de gaussianas. Cuando comienza la diferencia DoG3, pueden empezar a evaluarse los puntos extremos de las DoG 1, 2 y 3. El proceso completo de extracción de KPS requiere 329.699 ciclos de reloj. El procesamiento de la segunda imagen comienza 1.922 ciclos tras la finalización de la primera gaussiana de la imagen anterior, aunque debido al paralelismo implementado mediante arquitecturas del tipo *pipeline*, el *throughput* alcanzado no se ve penalizado. Para rechazar los puntos extremos que no presentan suficiente contraste, se ha fijado un umbral de 0,03, de acuerdo con [1].

La generación del vector descriptor precisa cálculos más complejos que los realizados en la etapa anterior. La arquitectura propuesta para esta etapa equilibra los requisitos de procesamiento en tiempo real y los recursos computacionales de la FPGA.

Para ello ha sido necesario introducir una serie de simplificaciones. Las tres primeras se describen en [11]. Por una parte, se ha eliminado el coeficiente de suavizado del módulo de orientación principal y por otra se ha considerado que a cada KP corresponde una sola orientación principal. Además, se ha empleado el denominado *Shifting-Based Orientation Calculation* para el cálculo de los valores trigonométricos del histograma. Este procedimiento proporciona un error de tan solo el 1,1 %. Por último, para el cálculo de magnitud se ha sustituido [3] la distancia euclídea por la distancia Manhattan. En términos computacionales, el cálculo de la orientación principal precisa 354 ciclos de reloj, a los que hay que añadir 8 ciclos más para rotar los histogramas de las subregiones. Estos histogramas son concatenados para formar el vector descriptor que es transferido al módulo de normalización (figura. 3). Esta transferencia finaliza en el ciclo

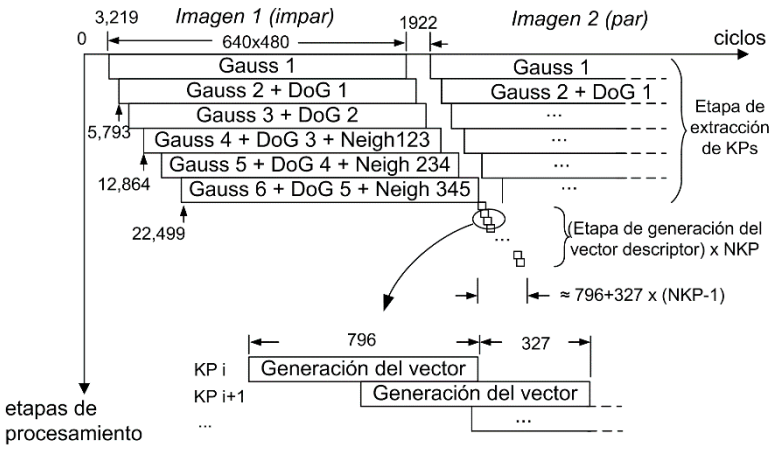


Figura 5. Cronograma de la arquitectura implementada para una imagen VGA (640x480).

492. Una vez que se ha generado el vector descriptor, este ha de ser normalizado. Tras esta operación, los valores superiores a 0,2 son truncados a este valor para posteriormente normalizar de nuevo el vector. Para realizar estas operaciones se ha diseñado un módulo específico que en primer lugar calcula la suma de los cuadrados de los 128 componentes del vector. Tras esto, calcula la inversa de este valor, cuya raíz cuadrada se multiplica posteriormente por cada uno de esos 128 componentes. Este conjunto de operaciones necesita 796 ciclos de reloj. Sin embargo, debido al diseño en *pipeline* del sistema, se puede comenzar a procesar un nuevo KP tras 327 ciclos. A 100 MHz, se pueden procesar 3.072 KP (el 1 % de los píxeles de una imagen VGA) en 10,045 ms, es decir, a una velocidad de 99,5 imágenes por segundo.

4. Resultados y discusión

La arquitectura propuesta se ha sintetizado sobre una FPGA Virtex 5. Se ha empleado un formato de datos de coma fija: 8 bits para la parte entera y 8 bits para la parte decimal. Estos valores se han escogido tras evaluar los rangos de datos en cada una de las partes del algoritmo (parte entera) y los errores cometidos por truncamiento (parte decimal). Las prestaciones de la arquitectura propuesta se han evaluado empleando pares de imágenes de la base de datos de imágenes de Oxford [12]. La figura 6 compara la correspondencia obtenida entre puntos característicos de parejas de imágenes empleando tanto el código en coma flotante de Vedaldi [13] como la implementación VHDL. La pareja de imágenes a) y b) presentan 573 y 195 correspondencias usando el código de Vedaldi y la implementación en FPGA respectivamente. El porcentaje de corresponden-

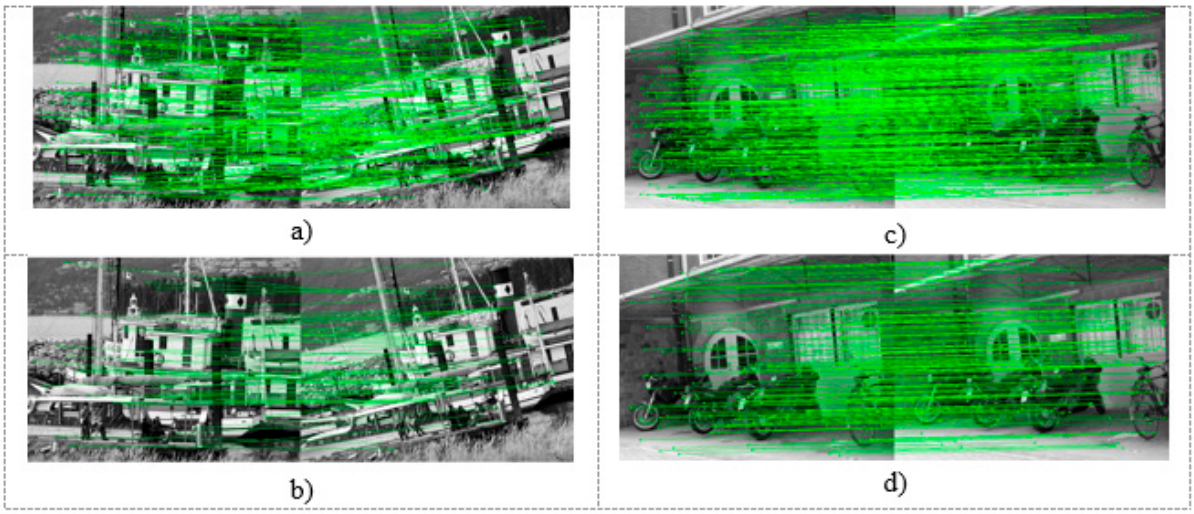


Figura 6. Resultados de la correspondencia entre imágenes rotadas usando a) el código de Vedaldi; b) la implementación VHDL. Imágenes con diferente grado de difusión usando a) el código de Vedaldi; b) la implementación VHDL.

cias obtenidas con la FPGA es del 34 %. Para la pareja de imágenes c) y d) se han obtenido 332 y 66 correspondencias (19 %) empleando el código de Vedaldi y la FPGA respectivamente.

Estos resultados muestran que la implementación en FPGA es capaz de realizar las operaciones de correspondencia entre parejas de imágenes. Aunque el número de correspondencias es reducido comparado con el algoritmo *software* de Vedaldi, debido al número de simplificaciones introducidas en la implementación propuesta y también a los errores de discretización por emplear coma fija, sigue habiendo un número considerable de correspondencias entre cada pareja de imágenes. La tabla 1 recoge los detalles de la implementación y prestaciones de la arquitectura propuesta en comparación con otras arquitecturas diseñadas para ejecutar el algoritmo SIFT sobre imágenes de 640 x 480 pixeles.

	[3]	[4]	[5]	[7]	[8]	This work
Tecnología	Virtex 5 + MicroBlaze	Virtex 5	TSMC 0,18 um CMOS	Cyclone II (1)	Virtex 6(1)	Virtex 5
Número de KPs	ND	1.270	890	ND	2.200	3.072
Velocidad (fps)	32	30	30	56	60	99
Registros	23,247	7,974	-	23,247	29,453	12,065
LUTs	32,592	16,138	-	32,592	64,701	14,335
RAM (MB)	0,67	0,576	5,73	0,87	3,84	8,2
DSP	97	53	-	258	107	150
Reloj (MHz)	100	50	100	50	100	100

ND: no disponible. (1): No incluye extracción de KP; solo la generación del vector descriptor.

Tabla 1. Prestaciones y uso de recursos de diferentes arquitecturas diseñadas para imágenes VGA

De las dos etapas del algoritmo, en esta implementación la segunda es la más lenta y la que limita la velocidad del conjunto. Esta arquitectura ofrece una latencia de 796 ciclos y un *throughput* de 327 ciclos. Por lo tanto, para obtener 3.072 vectores descriptores (el 1 % de una imagen VGA) el número de ciclos de reloj requeridos es de 796+(3071*327) = 1,005,013 (10,05 ms para una FPGA con un reloj de 100 MHz, o 99 imágenes por segundo). Este valor es superior al de otras arquitecturas diseñadas para el procesamiento de imágenes VGA (tabla 1), y para un uso de recursos similar.

5. Conclusiones

En este artículo se ha descrito una propuesta de arquitectura para la síntesis del algoritmo SIFT sobre una FPGA, capaz de procesar imágenes de tamaño VGA a una velocidad de 99 imágenes/segundo. Para lograr esa velocidad de procesamiento ha sido necesario realizar diferentes simplificaciones sobre el algoritmo que han sido cuidadosamente evaluadas para lograr un equilibrio entre precisión y velocidad. Se ha supuesto un máximo del 1 % de puntos de la imagen como puntos característicos. Los ensayos sobre una conocida base de datos han ofrecido resultados satisfactorios.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno de España a través del proyecto TEC2015-66878-C3-2-R (MINECO/FEDER, UE).

Referencias

1. *Lowe, D. Distintive image features from scale-invariant key-points. Int. J. Compt. Vis. 2004; 60:91-110.*
2. *Bonato V., Marques, E., Constantinides, A. A Parallel Hardware Architecture for Scale and Rotation Invariant Feature Detection. IEEE Trans. on Circ. and Syst. for Video Techn. 2008;18:1703-1712.*
3. *Yao, L., Feng, H., Zhu, Y., Jiang, Z., Zhao, D., Feng, W. An architecture of optimised SIFT feature detection for an FPGA implementation of an image matcher. Proceedings of the Intl. Conf. on Field-Programmable Technology. 2009:30-37.*
4. *Qasaimeh, M., Sagahyroon, A., Shanableh, T. FPGA-Based Parallel Hardware Architecture for Real-Time Image Classification. IEEE Trans. on Computational Imaging 1, 56-70, (2015).*
5. *Huang, F. C., Huang, S. Y., Ker, J., W., Chen, Y., C., High-Performance SIFT Hardware Accelerator for Real-Time Image Feature Extraction. IEEE Trans. on Circ. and Syst. for Video Tech. 2012;22:340-351.*
6. *Chiu, L. C., Chang, T. S., Chen, J. Y., Chang, N. Y. C. Fast SIFT Design for Real-Time Visual Feature Extraction. IEEE Trans. on Image Processing. 2013;22:3158-3167.*
7. *Mizuno, K., Noguchi, H., Guangji, G., Terachi, Y., Kamino, T., Kawaguchi, H., Yoshimoto, M. Fast and low-memory-bandwidth architecture of SIFT descriptor generation with scalability on speed and accuracy for VGA video. Conf. on Field Progr. Logic and Appl. 2010:608–611.*
8. *Deng, W., Zhu, Y., Feng, H. Jiang, Z. An efficient hardware architecture of the optimised SIFT descriptor generation. Intl. Conf. on Field Programmable Logic and Appl. 2012:345-352.*
9. *Jiang, J., Li, X., Zhang, G. SIFT Hardware Implementation for Real-Time Image Feature Extraction. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology 2014:24;1209-1220.*
10. *Jain, R., Kasturi, R., Schunck, B. G.: Machine Vision. McGraw-Hill, Inc., 1995.*
11. *Qiu, J., Lu, Y., Huang, T., Ikenaga, T. An FPGA-based real-time hardware accelerator for orientation calculation part in SIFT. Proc. Fifth Intl. Conf. on Intelligent Inf. Hiding and Multi. Signal Proc. 2009:1334–1337.*
12. *http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/data/data-aff.html*
13. *http://vision.ucla.edu/~vedaldi/code/sift.html*

Sistema de detección, clasificación, seguimiento y neutralización de UAS (Counter-UAS)

Gómez Alonso, Iago[1,*], Rodríguez Artolazabal, Jose Antonio[1], González Fernández, Pablo[1], El Malek Vázquez, Jorge Munir[1] y González Jiménez, Daniel[1]

[1] Gradiant, Edificio Citexvi Local 14 Campus Universitario de Vigo, Vigo. igomez@gradiant.org: (IGA), jarodriguez@gradiant.org: (JARA), pgonzalez@gradiant.org: (PGF), dgonzalez@gradiant.org: (DGJ).

Email:

* Iago Gómez Alonso; igomez@gradiant.org: (IGA).

Resumen

En este artículo, después de realizar una revisión de las tecnologías disponibles para la detección y neutralización de UAS, se presentará el sistema Counter-UAS de Gradiant. La solución propuesta aborda la detección, clasificación y seguimiento basada en dos sensores complementarios: análisis inteligente de vídeo y detección espectral. Por otra parte, el sistema también cuenta con un módulo específico de neutralización. Para concluir, se expondrán las pruebas realizadas con el sistema y los resultados obtenidos.

Palabras clave

UAS, UAV, dron, detección espectral y análisis de vídeo.

1. Introducción

Los sistemas aéreos no tripulados (UAS) o drones se han usado casi en exclusiva en el sector militar durante los últimos 20 años, sin embargo, esta situación ha cambiado recientemente, convirtiéndose en bienes de consumo [1], con tamaños reducidos, costes moderados y altas capacidades técnicas. El mercado militar se ha beneficiado de estos avances provocados por la incursión de los UAS en entornos civiles; tanto es así que algunos ejércitos están empleando drones comerciales para sus actividades [2]. Por contrapartida, la facilidad de acceso a estos equipos ha provocado que últimamente los incidentes asociados con UAS se hayan disparado, algunos de los cuales han puesto de manifiesto la vulnerabilidad de las infraestructuras críticas (aeropuertos [3], cárceles [4], bases militares [5], etc.) Por otra parte, aunque la mayoría de los incidentes denunciados hasta ahora han sido causados por negligencias o errores técnicos, el uso de los UAS también ha sido identificado como una amenaza potencial cuando está al alcance del crimen organizado y organizaciones terroristas [6]. En este escenario, no es de extrañar que la detección y neutralización de UAS se esté convirtiendo en una alta prioridad en la agenda de las fuerzas armadas y cuerpos de seguridad de los estados [7].

Esta amenaza también ha sido identificada y estudiada por el SG-170 de la OTAN «*The Engagement of Low, Slow ad Small Aerial targets by GBAD (ground based aerial defense)*» [8]. Este documento es el resultado de un estudio de 10 años que incluye el análisis del comportamiento de los sistemas terrestres de defensa aérea contra los UAS. Este estudio ha sido continuado por los grupos SG-188 y SG-200. La principal conclusión de estos informes es que ningún tipo de sensor por sí solo puede proporcionar suficientes capacidades de seguimiento e identificación para ofrecer una defensa fiable y eficaz contra las amenazas con UAS.

El resto de este documento está estructurado de la siguiente manera: en la siguiente sección se hace una revisión de la tecnología aplicable para la detección y neutralización UAS. A continuación, se presenta la propuesta Counter-UAS de Gradiant y por último, se presentan los resultados obtenidos con este sistema. Este artículo es una continuación al artículo presentado a la edición del 2017 del DESEI+D [9].

2. Revisión de tecnología

2.1. Fases para combatir la amenaza

A pesar de la diversidad de amenazas y escenarios, existe un marco común bajo el cual se ajustan la mayoría de los enfoques para enfrentarse a esta amenaza y que considera que el problema se define ampliamente en cuatro fases: **detección, clasificación, seguimiento y neutralización**. Para una descripción de estas fases, se remite al lector al artículo presentado en el año 2017 [9].

2.2. Tecnologías de detección, clasificación y seguimiento

Existen varios fenómenos físicos que pueden utilizarse para tratar de detectar e identificar drones. Estos incluyen sus firmas en diferentes rangos del espectro óptico, su reflectancia radar, emisiones acústicas,

emisiones electromagnéticas, campos magnéticos inducidos [10], etc. En la tabla 1, actualización de la presentada en [9] se comparan las tecnologías más comunes para las fases de detección, seguimiento e identificación.

Tabla 1. Resumen de las tecnologías de detección, clasificación y seguimiento.

Tecnología	Coste	Alcance	Fiabilidad	Activo	¿Presenta evidencias?	¿Requiere Línea de vista?
Radar [11]	Alto	Alto	Media	Sí	No	Sí
Acústica [12]	Bajo	Corto	Baja	No	No	No
Imagen visible y térmica [13]	Medio	Medio	Media	No	Sí	Sí
Lidar [14]	Alto	Medio	Media	Sí	No	Sí
Detección espectral [15]	Medio	Medio-alto	Buena	No	No	No
Inteligencia humana	Alto	Medio	Baja	No	No	Sí

2.3. Estrategias de mitigación

Los dispositivos para realizar la neutralización se conocen en la literatura como efectores (*effectors*). Las técnicas de neutralización suelen llevar asociadas daños colaterales (interferencias, denegación de servicios o incluso daños físicos), que es importante conocer y valorar convenientemente dentro del escenario operativo que se plantea. Algunas de las técnicas de neutralización no destructivas más comunes son **sistemas láser**, ***jammers* [16], suplantación de las señales GNSS (*Spoofing*) [17], *hacking* [18] o microondas de alta potencia (HPM) [19]**.

Estas técnicas se describen en el artículo presentado en la edición anterior del congreso [9]. Tal y como se concluía en dicho artículo, ningún sensor o tecnología por sí sola es capaz de proporcionar suficientes capacidades de detección, seguimiento e identificación para ofrecer una defensa fiable y efectiva contra todos los drones. Esto es debido a la diversidad de entornos y casos de uso, a la existencia de un mercado siempre cambiante de modelos y marcas y a las restricciones legales y de compatibilidad electromagnética que presentan algunas técnicas de intervención.

3. Sistema propuesto

Las conclusiones anteriores se han utilizado como punto de partida para definir los requisitos de diseño de alto nivel y la arquitectura para el sistema de Counter-UAS propuesto en este artículo. Estos requisitos y la arquitectura resultante se presentan en las siguientes subsecciones. La arquitectura presentada es una evolución de la presentada en [9].

3.1. Requisitos de diseño

Según las conclusiones recogidas en el apartado anterior, los requisitos deseados para un sistema de Counter-UAS eficaz y viable pueden resumirse en **fusión de distintos sensores, modularidad de la solución, escalabilidad, implementación de funcionalidades en *software*, adaptación a modelos y marcas específicas y capacidad de neutralización**. Estos criterios se explican en mayor detalle en [9].

3.2. Arquitectura

La figura 1 ilustra cómo la arquitectura proporciona soporte para un número arbitrario de sensores y efectores, cada uno con el potencial de proporcionar diferentes capacidades al sistema. Para permitir esto, las **API** definen una capa de abstracción para el intercambio de datos entre módulos. El módulo de **mando y control** es responsable de gestionar todas las comunicaciones del sistema y generar informa-

ción de alto nivel a partir de información de bajo nivel (submódulo de fusión) proporcionada por los sensores y efectores. Además, este módulo también cuenta con una base de datos con los eventos anteriores y la gestión de evidencias. Por último, es importante tener en cuenta la relevancia de la **interfaz gráfica de usuario** (*GUI*), que permite presentar los datos obtenidos por el sistema de una forma amigable para el operador del sistema.

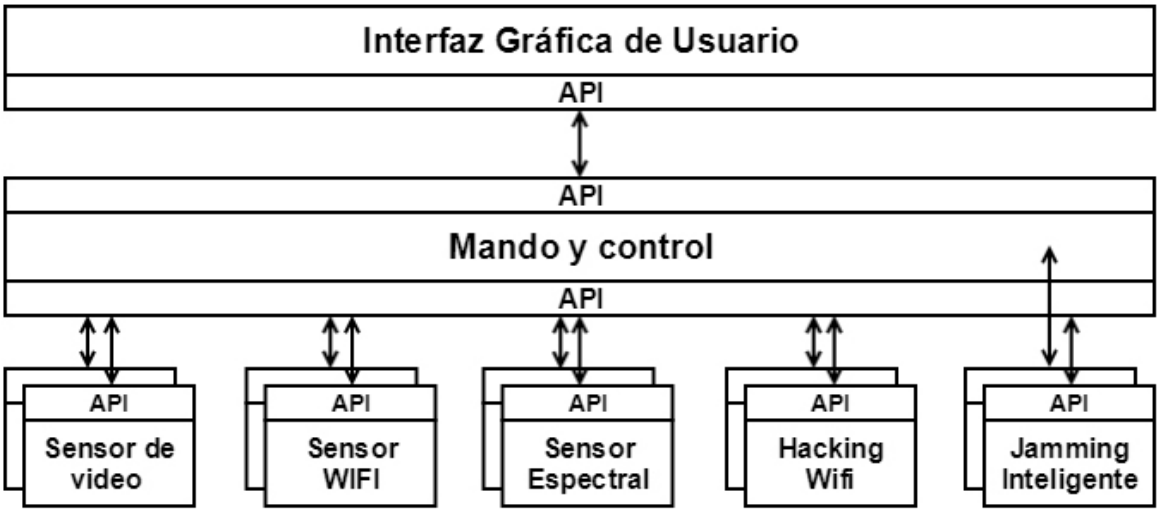


Figura 1. Arquitectura del sistema Counter-UAS.

3.3. Sensor espectral

La mayoría de los UAV existentes emplean al menos una forma de comunicación por radiofrecuencia con su operador. Si el objetivo de esta conexión es enviar vídeo, recibir comandos, compartir datos telemétricos o una combinación de ellos, el enlace puede ser detectado por un sensor espectral.

Sensor WIFI

Se ha comprobado que algunos de los actores más relevantes en el campo de los drones comerciales han elegido WIFI como el protocolo de comunicaciones. Este hecho permite el uso de receptores WIFI, combinados con lógica de control específica, para realizar la detección, clasificación y seguimiento de esos drones. Este sensor brinda buenas prestaciones contra drones que emplean WIFI, siendo además un sensor muy competitivo económicamente debido al *hardware* que emplea. Por último, este sensor permite diferenciar los distintos modelos con alta fiabilidad y proporciona información útil para la intervención del UAV.

Figura 2. Prototipo de sensor WIFI.

Sensor espectral genérico

Para los drones que no emplean WIFI, y por lo tanto no pueden ser detectados por el sensor anterior, el sistema cuenta con un sensor con un enfoque más general. En esta aproximación se emplean receptores configurables con un gran ancho de banda, capaces de explorar diferentes bandas de frecuencia y detectar señales de comunicaciones. Este tipo de sistemas, denominados SIGINT (*Signal Intelligence*), emplean técnicas avanzadas de procesado de señal para detectar y clasificar señales de comunicaciones.

Teniendo en cuenta los requisitos de adaptabilidad y que la solución debe de ser software se ha optado por emplear plataformas SDR (*Software Defined Radio*) para la implementación de este sensor. La algoritmia funciona de la siguiente forma: en primer lugar se detectan pulsos espectrales. Posteriormente, las regiones del espectro en las que se detecta energía se procesan empleando un conjunto de detectores específicos, para cada una de las tecnologías de comunicaciones de drones conocidas. En caso de que alguno de estos detectores arroje un resultado positivo, se confirma que se ha detectado un dron. Para el caso de este sensor, la identificación se realiza en términos de la tecnología de comunicación detectada (e.g: Lightbridge [20], Occusync).

3.4. Sensor de vídeo

El sistema propuesto considera el uso de sensores ópticos combinando cámaras electro-ópticas con *software* de análisis de vídeo inteligente, consiguiendo una detección automática. Este sensor adopta un enfoque multi-espectral (RGB+IR), donde toda la información visual disponible se combina y explora de forma coherente, para proporcionar las siguientes capacidades:

- Alerta temprana mediante la **detección** automática en tiempo real de blancos pequeños (nivel de píxeles) con vídeo multi-espectral, tanto con cámara fija como móvil.
- **Seguimiento** automático en tiempo real de múltiples objetivos a partir de vídeo multi-espectral.
- **Identificación** automática de objetivos en tiempo real. El sistema propuesto hará uso de técnicas avanzadas de *Deep Learning* para proporcionar una identificación multi-espectral de los objetivos.

Una característica adicional de los sensores ópticos es que permiten recolectar evidencias que soporten la persecución de los posibles delitos.

3.5. Módulo de neutralización

Hacking WIFI

Utilizando componentes comerciales (COTS), este módulo busca vulnerabilidades en los enlaces de comunicaciones de los drones que usan el estándar WIFI como enlaces de datos. Dependiendo de las brechas de seguridad y de los protocolos de comunicaciones, este módulo puede lograr diferentes efectos: quitar el control al operador, provocar un fallo, apagar el drone o incluso enviar órdenes falsas al drone, por ejemplo ir a una posición segura y aterrizar.

Jamming inteligente

Las fases de detección, clasificación y seguimiento proporcionan información precisa sobre el sistema de comunicaciones del dron como la banda de frecuencias o la forma de onda empleado. Esta información se emplea para diseñar, generar y transmitir una señal interferente adecuada para bloquear al dron detectado. La señal se transmite empleando una plataforma SDR y un amplificador de potencia para aumentar la zona de influencia de *jammer*.

4. Resultados

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos por los diferentes módulos del sistema.

4.1. Módulo basado en vídeo

Los resultados obtenidos con imágenes reales visibles e infrarrojas confirman la viabilidad del uso de sensores basados en la visión y el análisis de vídeo inteligente como elementos para la detección, identificación y segui-

miento de amenazas con UAS. En la figura 3 se muestra (tanto para el escenario visible como para el infrarrojo) el resultado a distancias entre 150 y 1.500 metros, empleando cámaras que se mueven en azimut a velocidades que van de 10 a 45 grados por segundo. Con este tipo de movimiento, el uso de estos sensores no es solo viable técnicamente, sino también desde el punto de vista operativa, ya que el ángulo cubierto con una sola cámara permite definir despliegues capaces de cubrir grandes áreas o perímetros con un número pequeño de estaciones.

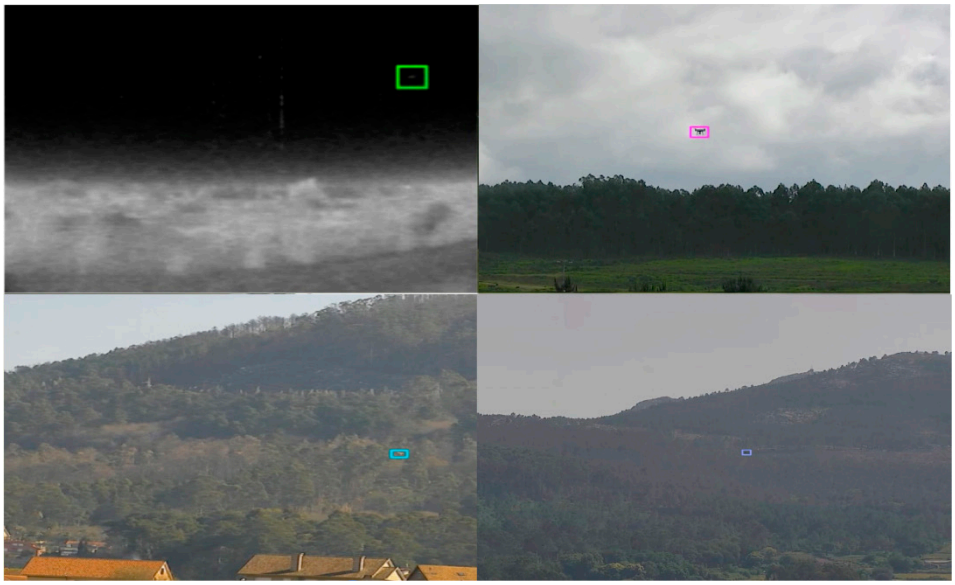


Figura 3. Superior-izquierda: detección de largo alcance en imágenes IR. Inferior: detección y seguimiento de corto alcance en el espectro visible con cámara en movimiento. Superior-derecha: uso de aprendizaje máquina para identificar y clasificar drones.

Los resultados también sugieren que el seguimiento puede servir para un doble propósito: proporcionar información sobre la ubicación actual de los blancos y mejorar el rendimiento de la fase de detección ayudando a descartar los falsos positivos que no son consistentes en el tiempo.

Como complemento a esto, por último, se está avanzando en la clasificación e identificación de drones. Este progreso se basa en la aplicación de técnicas avanzadas de aprendizaje máquina para discriminar entre drones y otros objetos (principalmente aves).

4.2. Detección, clasificación y seguimiento de drones basados en WIFI

El sistema propuesto puede detectar e identificar comunicaciones WIFI procedentes de un drone. Para la fase de seguimiento, este dispositivo permite estimar la distancia al drone y al controlador empleando una medida de la potencia incidente. Este dispositivo está formado por una placa de procesado de tamaño, peso, consumo y precio reducidos y una tarjeta de red WIFI. Las pruebas realizadas muestran que los drones de la familia Parrot se pueden detectar en menos de dos segundos hasta 1.800 metros de distancia. Para el caso del modelo DJI Phantom 3 Standard, la distancia de detección máxima ha sido de 1.500 metros. Este dispositivo proporciona el modelo del dron, la dirección MAC del dron y del controlador, la distancia al dron y al controlador.

4.3. Detección, clasificación y seguimiento de drones basados en otras tecnologías de radiofrecuencia

El sistema implementado se ha probado de forma exitosa con distintos modelos de la empresa DJI cuyo funcionamiento se basa en tecnologías *Lightbridge* (DJI Phantom 4 pro), *Lightbridge* 2 (DJI Matrice 100) y *Occulync* (DJI Mavic Pro). Estas tecnologías son empleadas por gran parte de los drones de la empresa DJI. Dicha empresa también los comercializa como módulos de comunicaciones para otros fabricantes.

Por ello, suman un alto porcentaje (junto con WIFI) de la cuota de mercado en drones comerciales. Las pruebas realizadas muestran distancias de detección superiores a 1.000 metros para este módulo.

4.4. Neutralización de drones basados en WIFI

Una vez detectados el dron y el controlador, el sistema desvincula al dron del controlador. El efecto que produce esto depende del tipo de dron. El *software* de neutralización también se ejecuta en la misma plataforma *hardware* que el módulo sensor WIFI.

- **Parrot**: Para esta familia de drones, una vez bloqueado el canal de comunicaciones, el piloto pierde el control del dron. En un plazo de tiempo dependiente de la altura del dron (15/20 segundos en el caso de 30 metros) el dron aterriza en el suelo. Finalmente, el módulo de intervención envía un comando de apagado con el que desconecta el dron. La distancia de neutralización máxima conseguida ha sido de 1.800 metros.
- **DJI Phantom 3 Standard**: La neutralización se basa únicamente en el bloqueo del canal de comunicaciones dron-controlador con la consiguiente caída del *streaming* de vídeo. Esto se debe a que este modelo incorpora un nivel de seguridad extra, el cual imposibilita cualquier tipo de iteración con el dron. La distancia de neutralización máxima conseguida ha sido de 1.100 metros.

4.5. Jammer inteligente

Empleando una plataforma SDR, se ha desarrollado un *jammer* inteligente de baja potencia y ha sido probado en varios drones comerciales con y sin GPS. La frecuencia y el ancho de banda de la señal interferente son configurables. En el caso del dron con GPS, cuando el dron alcanza la zona de influencia del *jammer*, comienza a levitar sin la influencia del controlador (figura 4). Desde el punto de vista del controlador, en la pantalla recibe un mensaje mostrando «Enlace de control no disponible» y la imagen se encuentra congelada. Por el contrario, cuando se realiza esta misma prueba con un dron con GPS, lo que ocurre es que el dron entra en el modo a prueba de fallos *Fail-Safe Mode* o modo de emergencia dependiente su comportamiento de su configuración. Las opciones disponibles son: volver al punto donde despegó, aterrizar en ese mismo punto o quedarse levitando.

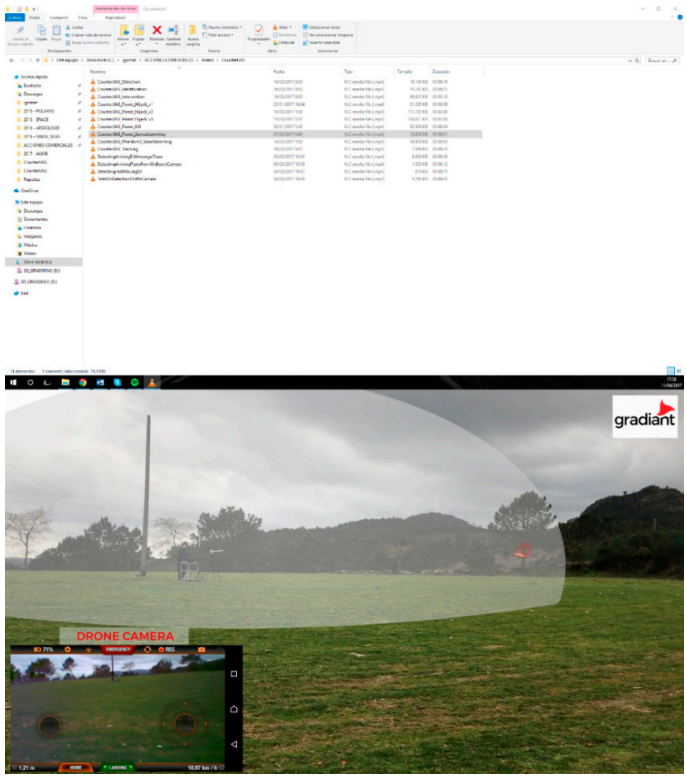


Figura 4. Escudo virtual usando un jammer inteligente.

5. Conclusiones

Los ataques con drones han sido identificados como una amenaza potencial en diferentes escenarios, infraestructuras críticas, prisiones o entornos militares. En este documento se ha presentado una revisión de las tecnologías disponibles para enfrentarse a este problema que concluye con que ningún sensor o tecnología es capaz de detectar e identificar esta amenaza con suficiente fiabilidad, por lo que se necesita seguir investigando en nuevas tecnologías e hibridaciones. En este sentido, se ha propuesto un sistema de Counter-UAS basado en la fusión de dos sensores complementarios: análisis espectral y análisis inteligente de vídeo utilizando espectro visible e infrarrojo. Además, el sistema propuesto también tiene la capacidad de neutralizar la amenaza: utilizando un módulo de *hacking* para las comunicaciones basadas en WIFI o un módulo de *jamming* inteligente.

Referencias

1. *National Purchase Diary (NPD) Group, «U.S. Drone Sales More Than Double Year-Over-Year With a Strong Start to 2017, Reports NPD», Apr. 10, 2017.*
2. *The Times, «Australian army to buy tiny drones for spying on the enemy», Aug. 2, 2016.*
3. *The Wall Street Journal, «Drone Buzzes Passenger Plane On Paris Approach», Mar. 4, 2016.*
4. *El País, «Un dron cuela un paquete en una cárcel francesa», Aug. 16, 2017.*
5. *BBC News, «Tiny drone lands on Queen Elizabeth aircraft carrier», Aug. 12, 2017.*
6. *El País, «Defensa busca cómo hacer frente a los drones del ISIS en Irak», Mar. 29, 2017.*
7. *Defensa.com, «Defensa adjudica el suministro del sistema anti UAVS para las fuerzas desplegadas en el exterior», Apr. 12, 2017.*
8. *North Atlantic Treaty Organization (NATO) Industrial Advisory Study SG-170 «The Engagement of Low, Slow and Small Aerial targets by GBAD (ground based aerial defense)».*
9. *Gómez Alonso, Iago; Rodríguez Artolazabal, Jose Antonio; González Fernández, Pablo; El Malek Vázquez, Jorge Munir; González Jiménez, Daniel. «Sistema de detección, clasificación, seguimiento y neutralización de UAS (Counter-UAS)», DESEI+D 2017.*
10. *G. C. Birch, J. C. Griffin, and M. K. Erdman, «UAS Detection, Classification, and Neutralization: Market Survey 2015», Sandia National Laboratories.*
11. *C. J. Li and H. Ling, «An Investigation on the Radar Signatures of Small Consumer Drones», in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, no., pp. 649-652, 2017.*
12. *J. Mezei and A. Molnár, «Drone sound detection by correlation», 2016 IEEE 11th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), Timisoara, 2016, pp. 509-518.*
13. *J. S. Lai, et al. «Field-of-view, detection range, and false alarm trade-offs in vision-based aircraft detection», In Int. Congress of the Aeronautical Sciences, 23-28 Sep. 2012, Brisba, QLD.*
14. *M. U. de Haag, C. G. Bartone and M. S. Braasch, «Flight-test evaluation of small form-factor LiDAR and radar sensors for sUAS detect-and-avoid applications», 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC), Sacramento, CA, 2016, pp. 1-11.*
15. *Rohde & Schwarz, «Automatic reliable detection and identification of radio-controlled microdrones», R&S ARDRONIS-I Product Brochure, Sep. 2016.*
16. *Battelle, Drone Defender TM.*
17. *J. Kens, D. P. Shepard, J. A. Bhatti and T. E. Humphreys, «Unmanned Aircraft Capture and Control via GPS Spoofing», Field Robotics, Special Issue on Low Altitude Flight of UAVs. Vol. 31, No. 4, 2014, pp. 617-636.*
18. *K. Hartmann and K. Giles, «UAV exploitation: A new domain for cyber power», 2016 8th International Conference on Cyber Conflict (CyCon), Tallinn, 2016, pp. 205-221.*
19. *D. Giri, High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications, Harvard University Press, 2004.*
20. *Especificaciones de DJI Lightbridge. https://www.dji.com/es/dji-lightbridge/info#specs*

2B. Radar

Validación del modelo de cuatro niveles en el acoplo entre antenas de radar para el estudio de compatibilidad electromagnética

Valles Castro, Antonio[1,*], Valles Cancela, José Ignacio[2] y Gómez Pérez, Paula[3]

1 Armada Española. Escuela Naval Militar, Marín. Correo electrónico: avallesc@fn.mde.es

2 Armada Española. Escuela Naval Militar, Marín. Correo electrónico: jvalc11@fn.mde.es

3 Centro Universitario de la Defensa. Escuela Naval Militar. Marín. Correo electrónico: paula@cud.uvigo.es

Email:

* Autor principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: avallesc@fn.mde.es

Resumen

Un buque de guerra es una plataforma que lleva instalada a bordo una gran cantidad de equipos transmisores con sus correspondientes antenas. En la actualidad, los buques de guerra navegan en agrupaciones navales con equipos transmisores trabajando en diferentes bandas de frecuencia, lo que incrementa en gran medida la densidad electromagnética ambiental. Es por lo tanto imprescindible conocer la compatibilidad electromagnética (EMC) entre los diferentes buques para intentar minimizar las interferencias que se puedan producir entre ellos.

En el caso de los sistemas radar, el análisis de la compatibilidad electromagnética es mucho más complejo que en un sistema de comunicaciones, debido, entre otros factores, a las antenas rotatorias propias de los sistemas radar. En este trabajo se pretende validar, con medidas reales en la mar, el modelo de cuatro niveles propuesto por Hou Zhang en el año 2010. Este modelo fue utilizado con éxito en una campaña de medidas reales en la mar al objeto de estudiar las condiciones en que se produce compatibilidad electromagnética de los radares de ambos buques.

Palabras clave

Radar, compatibilidad electromagnética (EMC), acoplo entre antenas, modelo de cuatro niveles.

1. Introducción

Un buque de guerra es una plataforma que lleva instalada a bordo una gran cantidad de equipos transmisores con sus correspondientes antenas. En una agrupación naval, es fundamental conocer la compatibilidad entre buques para intentar minimizar las interferencias que se puedan producir entre ellos.

En los sistemas de comunicaciones, el estudio de compatibilidad electromagnética (EMC) es relativamente sencillo debido a que las antenas son fijas y el lóbulo de radiación siempre está en la misma dirección, independientemente de si se trata de antenas omnidireccionales o direccionales.

Sin embargo, la gran mayoría de las antenas de los radares de exploración son giratorias y direccionales, por lo que es necesario tener en cuenta que el lóbulo de radiación se mueve constantemente en el plano horizontal. Por tanto, a la hora de realizar un estudio de EMC sobre sistemas radar, hay que tener en cuenta el tiempo de iluminación del haz sobre la antena que recibirá la radiación (víctima).

Conocido el diagrama de cobertura real, se puede realizar el estudio EMC con facilidad. Sin embargo, si no se conoce, es necesario acudir a técnicas estadísticas y de probabilidad para inferir el acoplo existente entre ambas antenas.

2. Predicción EMC

En la actualidad, el ambiente electromagnético es denso y complejo. Cuando dos o más equipos radar operan en los mismos márgenes de frecuencia y en la misma zona geográfica, pueden interferirse, lo que significa una pérdida de prestaciones que puede llegar a ser importante.

Para evaluar la compatibilidad entre dos equipos de radar se debe realizar una predicción de interferencias al objeto de calcular el nivel de interferencia que pueda degradar las características del equipo víctima.

El primer paso para evaluar la compatibilidad es la determinación del nivel de señal interferente, I_T, en el que empiezan a degradarse las prestaciones del receptor del radar víctima [1].

$$I_T = \frac{I}{N} + N \quad (1)$$

Donde:

$\frac{I}{N}$ (Relación interferencia-a-ruido a la entrada del receptor necesaria para mantener un nivel de calidad acep

table (dB).

$$N = -114\ dBm + 10\ log\ B_{IF} + NF \quad (2)$$

Donde:

B_{IF} Ancho de banda de frecuencia intermedia (FI) del receptor (MHz)**.**

NF: Figura de ruido del receptor.

Si no se conoce la relación I/N específica del radar víctima, se utilizará una relación I/N de -6 dB de acuerdo a lo establecido en [2].

Con el valor de I_T calculado en (1), mediante (3) se puede predecir si un sistema puede funcionar a una distancia determinada sin que produzca interferencias sobre otro que puedan degradar sus características.

$$I_T = P_T + G_T + G_R - L_T - L_R - L_P - FDR_{IF} \quad (3)$$

Donde:

I_T: Nivel de la señal interferente a la entrada del receptor víctima (dBm).

P_T: Potencia del transmisor interferente.

G_T: Ganancia de la antena del sistema interferente en la dirección del equipo víctima (dBi).

G_R: Ganancia de la antena receptora del sistema víctima en la dirección del equipo interferente (dBi).

L_T: Perdidas de inserción en el transmisor (dB).

L_r: Perdidas de inserción en el receptor (dB).

L_P: Perdidas por propagación.

FDR_{IF}(*Frequency dependent rejection*): Rechazo dependiente de la frecuencia producido por la curva de selectividad FI del receptor víctima en el espectro emitido por el transmisor interferente (dB).

En el caso de antenas giratorias no se aplicará la suma de la ganancia de las antenas, interferente y víctima sino que se aplicará el concepto, previamente calculado, de ganancia mutua G_m.

3. Ganancia mutua

Cuando las dos antenas (fuente y víctima) son giratorias, es necesario determinar el nivel de interferencia acoplada entre ambas. Para ello se determina la distribución estadística de la ganancia mutua de ambas antenas.

Puesto que la distribución de probabilidad de la antena fuente y la víctima son independientes, la ganancia mutua se puede obtener realizando la convolución de las distribuciones de los diagramas de radiación de ambas antenas [3].

La distribución de ganancia mutua G_m se obtiene de (4):

$$G_{m=} G_1 + G_2 \quad (4)$$

Siendo G_1 y G_2 las ganancias de cada una de las antenas. La probabilidad de un determinado nivel de ganancia mutua (G_m) se obtiene por la siguiente expresión:

$$P(G_{1i} + G_{2j}) = \sum a_i b_j \quad (5)$$

Donde

$\sum a_i b_j$ (es la suma de todos los eventos independientes

a_i) es la probabilidad de G_{1i}

b_j es la probabilidad de G_{2j}

Conocido el diagrama de radiación de las dos antenas, es relativamente fácil realizar el cálculo estadístico que permita conocer la ganancia mutua de ambas.

En el caso de que no se pueda medir el diagrama de radiación de las antenas, se utilizarán modelos. La ventaja de estos modelos es que solo se necesita conocer la ganancia máxima y el ancho del haz principal de la antena a -3 dB. Estos parámetros son fáciles de encontrar en las hojas de características del sistema radar bajo estudio.

Aunque existen varios tipos de modelos, en este trabajo de estudiará el modelo de cuatro niveles propuesto por Hou Zhang en [4]. Este modelo, hasta ahora solo comprobado con simulación, se validará con medidas efectuadas en radares a bordo de buques en la mar.

4. Modelo de cuatro niveles

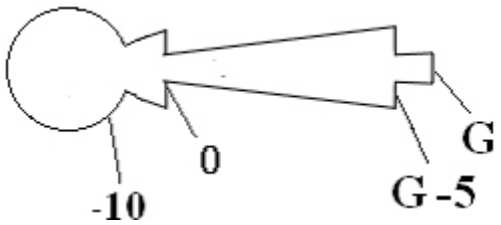


Figura 1. Modelo de cuatro niveles.

La figura 1 muestra el modelo propuesto, que solo se utilizará en caso de desconocer el diagrama de radiación.

Los diferentes niveles se definen de la siguiente manera:

- El primer nivel se representa por G y es el nivel nominal de ganancia máxima de la antena menos 3 dB. El ancho de este nivel es el del ancho del haz principal de la antena a -3 dB.
- El valor del segundo nivel es G-5 dB. El ancho de este nivel es el doble del ancho a 3 dB del haz principal de la antena.
- El valor del tercer nivel es 0 dB. El ancho de este nivel es seis veces del ancho del haz principal de la antena a -3 dB.
- El valor del cuarto nivel es -10 dB. El ancho de este nivel es el resto del ángulo.

De acuerdo con el modelo de cuatro niveles las propiedades de radiación de la antena se definen [4] según las ecuaciones (6) a (9)

$$G_t = [G_{tm} - 3 \quad G_{tm} - 8 \quad 0 \quad -10] \tag{6}$$

$$G_r = [G_{rm} - 3 \quad G_{rm} - 8 \quad 0 \quad -10] \tag{7}$$

$$P_t = \left[\frac{\theta_t}{360} \quad \frac{2\theta_t}{360} \quad \frac{6\theta_t}{360} \quad 1 - \frac{9\theta_t}{360}\right] \tag{8}$$

$$P_r = \left[\frac{\theta_r}{360} \quad \frac{2\theta_r}{360} \quad \frac{6\theta_r}{360} \quad 1 - \frac{9\theta_r}{360}\right] \tag{9}$$

Donde:

G_t= Matriz de ganancia de la antena transmisora.

G_r= Matriz de ganancia de la antena receptora (víctima).

G_{tm}= Máxima ganancia de la antena transmisora (dB).

G_{rm}= Máxima ganancia de la antena receptora (víctima) (dB).

P_t= Matriz de probabilidad de la antena transmisora apuntando a la antena receptora (víctima).

Pr= Matriz de probabilidad de la antena receptora (víctima) apuntando a la antena transmisora.

θ_t = Ancho del haz a -3 dB de la antena transmisora.

θ_r = Ancho del haz a -3 dB de la antena receptora (víctima).

Si se asume que las antenas transmisora y receptora son independientes, el acoplo mutuo se calcula con la siguiente expresión:

$$\left\{\begin{array}{l} G_{mc} = G_t(i) + G_r(j) \\ \\ P_{mc} = P_t(i) + P_t(j) \end{array}\right\} \quad 1 \leq i,j \leq 4 \quad (10)$$

Donde

G_{mc}= Matriz de ganancia mutua.

P_{mc}= Matriz de probabilidad de acoplo mutuo.

5. Estudio de validación

Para realizar el estudio de validación del modelo de cuatro niveles se realizaron los siguientes pasos:

- Cálculo de la ganancia mutua, nivel I_T y distancia a la que desaparece la interferencia, de acuerdo a las características de los equipos.
- Medidas reales en la mar.
- Comparación de resultados.

5.1. Características de los equipos

Las medidas se realizaron en la mar en una campaña de medidas de compatibilidad electromagnética entre buques. Para ello se utilizaron dos equipos de radar a bordo de cada uno de los buques.

Las características de los sistemas de radar son:

- Radar 1 (interferente):
  - Radar de onda continua y frecuencia modulada (FMCW).
  - Potencia de transmisión:
    - 7 W (38.45 dBm).
    - 60 W (47.78 dBm).
  - Frecuencia en banda X.
  - Ganancia de antena: 32 dB.
  - Ancho de haz en el plano horizontal a -3dB: 1,2º.
- Radar 2 (víctima):
  - Radar de pulsos.
  - Frecuencia en banda X.
  - Ganancia de antena: 35 dB.
  - Figura de ruido: 7,2.
  - Ancho de banda FI. : 3 MHz.
  - Ancho de haz en el plano horizontal a -3dB: 1,4º.

5.2. Cálculo de la distancia a la que desaparece la interferencia

En primer lugar se realiza el cálculo de la ganancia mutua de las antenas de acuerdo con el modelo de cuatro niveles [4].

El nivel de ganancia mutua con una probabilidad de 93,6 % es de -20 dB. Este valor es el que se va a utilizar para los cálculos de predicción de interferencias.

De acuerdo a lo establecido en [1] y utilizando las expresiones (1) y (2), se obtiene:

Aplicando la expresión (3) se pueden calcular las distancias a las que desaparecen las interferencias:

POTENCIA (vatios)	DISTANCIA (millas)
7 W	1,9
60 W	5,6

Tabla 1. Distancias calculadas

5.3. Proceso de medida

La prueba se diseñó para comprobar la máxima distancia a la que desaparecen las interferencias. En ella participan un buque con radar interferente y dos con radar víctima.

Se configuran ambos radares para que sus frecuencias de trabajo sean las mismas y con los buques a corta distancia se comprueba la existencia de la interferencia. Una vez comprobada la interferencia se comienza con la prueba de distancias.

La prueba se realizó en la mar con control del ambiente electromagnético en la zona monitorizando las emisiones en la banda de trabajo de los radares. El buque con el radar interferente a bordo ocupa una posición fija y los dos buques con radar víctima inician una trayectoria de alejamiento por el través, comenzando en las proximidades hasta la distancia a la que desaparezca la interferencia. Los sistemas de radar se configuran para transmitir en las mismas frecuencias.

Se realizarán dos trayectorias. La primera con el radar interferente transmitiendo con una potencia de 7

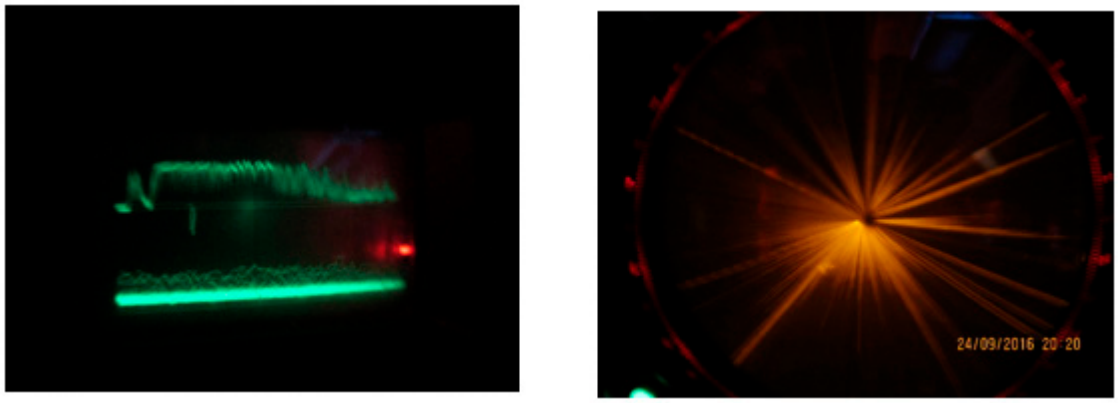


Figura 2. Interferencias en el radar víctima.

W y la segunda transmitiendo con 60 W.

6. Resultados de la medida

En primer lugar se comprueba la existencia de interferencia.

En la figura 2 se pueden ver las interferencias en las pantallas de las consolas del radar víctima. En la fotografía de la izquierda se puede observar el aumento del ruido en la pantalla tipo A, que llega a enmascarar los blancos, producido por la interferencia de onda continua del radar 1 (interferente).

En la fotografía de la derecha se observan los efectos de la interferencia en la pantalla PPI. Como se puede ver el nivel de la interferencia es elevado y puede llegar a enmascarar los blancos.

En la tabla 2 se pueden ver los resultados de las pruebas realizadas.

POTENCIA (vatios)	DISTANCIA BUQUE 1 (millas)	DISTANCIA BUQUE 2 (millas)
7 W	1,9	>1,5
60 W	5,5	-

Tabla 2. Resultados de las pruebas

Debido a condiciones meteorológicas adversas, el buque 2 no pudo separarse más de 1,5 millas del buque interferente, ni realizar un segundo alejamiento transmitiendo con su radar a 60W.

En el caso del primer alejamiento, en el momento de máxima separación (>1,5 millas), todavía no había desaparecido la interferencia. Por tanto, aunque la prueba no se ha podido realizar completa con las trayectorias del buque 2, los resultados parciales obtenidos en la misma se consideran coherentes con los obtenidos en el buque 1.

La deriva existente entre resultados obtenidos en la prueba en la mar con los resultados teóricos, muestra la existencia de una incertidumbre muy baja (<5 %). Se estima que esta incertidumbre puede ser debida a dos factores:

- La propia incertidumbre del proceso de medida.
- El nivel de la ganancia mutua calculado es de -20 dB con una probabilidad de 93,6 %. Esta probabilidad, aunque alta, no llega al 100 %, lo que produce una pequeña componente de incertidumbre.

7. Conclusiones

Este artículo pretende comprobar si el modelo de cuatro niveles es válido para el cálculo de la ganancia mutua, aplicable a la predicción de interferencias presentes en antenas giratorias de sistemas radar.

Para el caso bajo estudio, el modelo estima que la distancia a la que desaparecen las interferencias es de 1,9 millas y de 5,6 millas, para potencias de transmisión de 7W y 60 W, respectivamente. Se realiza una extensa campaña de medidas en la que se puede comprobar que, efectivamente, las distancias a las que se dejan de apreciar las interferencias se corresponden con 1,9 y 5,5 millas, para 7W y 60W, respectivamente, lo que conlleva un error de menos de 0,1 millas en el segundo caso.

Por tanto, a la vista de los resultados se puede concluir que el modelo de cuatro niveles para el cálculo de la ganancia mutua es perfectamente válido y puede ser utilizado para la predicción de interferencias.

Agradecimientos

Al Centro de Medidas Electromagnéticas de la Armada (CEMEDEM) sin cuya colaboración no sería posible realizar las medidas y por lo tanto este trabajo.

Referencias

1. *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recomendación UIT-R M.1461. 2000.*
2. *U.S. Departament of Commerce. NTIA Report 05-432 Interference Protection Criteria. 2005.*
3. *U.S. Departament of Commerce. OT Report 76-97 Spectrum Resource Assesment in the 2.7 to 2.9 GHz. Band. 1976.*
4. *Zhang H., Li G., Shu N. A new antenna coupling model for radar Electromagnetic Compatibility Prediction. IEEE. 2010.*

Sistemas radiantes en vehículos militares terrestres: caracterización y medidas electromagnéticas

Sánchez Álvarez, Luis Francisco[1*], Martínez Ruiz, Manuel Antonio[2], Valencia Cruz, Rafael Angel[3] , Calviño Dopazo, Francisco Jose[4], Antoranz Álvaro, Javier Eugenio[5] y Fernández Ibañez, Tomas[6]

1 Ministerio de Defensa. Armada Española. Escuela Naval Militar. Centro de Medidas Electromagnéticas (CEMEDEM). Email: lsanalv@fn.mde.es

2 Ministerio de Defensa. Armada Española. Subdirector de Ingeniería (ASUBDING) de la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL). Email: mmarr45@fn.mde.es

3 Ministerio de Defensa. Armada Española. Dirección de Construcciones Navales (DIC) de la JAL. Email: rvalcru@fn.md.es

4 Ministerio de Defensa. Armada Española. Escuela Naval Militar. Centro de Medidas Electromagnéticas (CEMEDEM). Email: fcaldop@fn.mde.es

5 Ministerio de Defensa. Armada Española. Dirección de Construcciones Navales (DIC) de la JAL. Email: jantalv@fn.md.es

6 Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria. Email: tomas.fernandez@unican.es

* Autor principal y responsable del trabajo: lsanalv@fn.mde.es

Resumen

Todo vehículo militar debe de ser capaz de establecer y mantener comunicación con el mando y otras unidades. De igual forma, en función de las misiones del vehículo además de sistemas de comunicaciones puede incorporar equipos de guerra electrónica, tanto pasivos como activos. Todos estos sistemas son capaces de interaccionar con el medio mediante antenas. El *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Std. 145-1983). Las funciones principales de una antena son transmitir y recibir, imponiendo una serie de características: direccionalidad (capacidad para transmitir y/o recibir en unas determinadas direcciones), rango de frecuencias de trabajo, niveles de potencia y eficiencia, acoplo. Este artículo analiza y desarrolla procedimientos de medida realizables para los sistemas radiantes en vehículos militares terrestres. Entre los que cabe destacar, en primer lugar la medida de la cobertura (diagrama de radiación) de las antenas con el fin de detectar posibles zonas ciegas de las mismas, identificando, asimismo, si la ubicación de dichas antenas es la más adecuada. Se analizarán los riesgos de la radiación peligrosa (RADHAZ) de los distintos sistemas que integran para el personal (HERP). Todo lo anteriormente expuesto, se realizará de forma práctica con ejemplos de medida reales.

Palabras clave

Antenas, sistemas radiantes, RADHAZ, diagramas de radiación.

1. Introducción

Un vehículo militar terrestre, siempre dispone de sistemas de comunicaciones, con la finalidad de interaccionar con el exterior. Son capaces de llevarlo a cabo mediante antenas y/o sensores. Dependiendo de la misión de la plataforma así como de sus funciones, además de los sistemas de comunicaciones puede incorporar radares, sistemas de guerra electrónica y contramedidas (activas y/o pasivas); englobaremos en los sistemas de contramedidas los inhibidores de frecuencia.

Todos los sistemas anteriormente indicados se interconectan mediante antenas, en este artículo se desarrollaran procedimientos para poder caracterizar el correcto funcionamiento de las mismas, independientemente de la función que estén desarrollando (comunicaciones, radares, contramedidas…).

2. Antenas

El IEEE define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas [1]. Hay una gran variedad de tipos y formas, pero todas tienen como común denominador el ser el nexo de unión entre una onda electromagnética guiada y el espacio libre, a la vez que distribuye la energía radiada en las distintas direcciones del espacio con un cierto carácter direccional, que dependerá de la aplicación concreta para la que se utilicen. Por ejemplo, en los inhibidores de frecuencia que instalan ciertos vehículos militares se querrá radiar sobre la zona de cobertura de forma omnidireccional con la finalidad de proteger todo el entorno del vehículo, mientras que por ejemplo en una dirección de tiro interesa que las antenas sean lo más directivas posibles. Si se estudia la antena en recepción, toda antena es capaz de captar energía del espacio, absorberla y entregarla al receptor. Los parámetros de una antena son los que permiten especificar el funcionamiento de las mismas, y por lo tanto son susceptibles de ser medidos.

2.1. Impedancia

En el sentido clásico de circuitos, la antena y el transmisor han de adaptarse para una máxima transferencia de potencia. Por regla general, el transmisor se encuentra alejado de la antena y la conexión se hace mediante una línea de transmisión, quien determina la adaptación (han de considerarse sus parámetros: impedancia característica, longitud y atenuación).

Una antena tiene un par de terminales de entrada (AB) [2], la impedancia de entrada (Z_{AB}) (1) es la impedancia presentada por la antena en bornes de sus terminales, o bien la relación tensión a corriente en un par de terminales, o la relación apropiada de los componentes adecuados de los campos eléctrico a magnético en un punto.

$$Z_{AB}=R_{AB}+jX_{AB} \qquad (1)$$

Donde Z_{AB} es la impedancia compleja de la antena en los terminales AB (en ohmios), R_{AB} es la resistencia y X_{AB} la reactancia (parámetro función de la frecuencia). La figura 1 representa una impedancia de carga, Z_{AB} (antena) conectada al final de una línea de transmisión de longitud L. Se asume que es una línea de transmisión sin pérdidas y con impedancia característica Z_S.

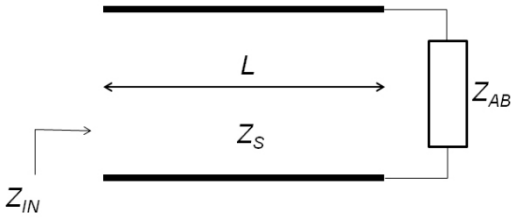


Figura 1. Impedancia de carga al final de una línea de transmisión.

Cuando una señal incide en la entrada de la línea de transmisión, otra señal reflejada aparece si la línea no está adaptada. El coeficiente de reflexión (Γ) es la relación entre la amplitud compleja de la onda reflejada y la amplitud compleja de la onda incidente, el cual en términos de impedancia se define mediante la Ec. (2) [3]:

$$\Gamma=\frac{Z_{AB}-Z_S}{Z_{AB}+Z_S} \quad (2)$$

La impedancia de entrada de la línea de transmisión, Z_{IN}, en la figura 1, se define mediante la Ec. (3) [3]:

$$Z_{IN}=Z_S\left(\frac{Z_{AB}+j\cdot Z_S\cdot \tan\frac{2\cdot\pi\cdot f\cdot L}{u}}{Z_S+j\cdot Z_{AB}\cdot \tan\frac{2\cdot\pi\cdot f\cdot L}{u}}\right) \quad (3)$$

Donde *f* es la frecuencia y *u* la velocidad de propagación a lo largo de la línea.

Para una mejor comprensión se define la VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), que es función del coeficiente de reflexión y describe la potencia reflejada desde la antena, Ec. (4).

$$VSWR=\frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (4)$$

El valor de la VSWR siempre es un número real y positivo mayor o igual que la unidad. La mínima VSWR (valor igual a la unidad) implica que no hay potencia reflejada por parte de la antena, que es la situación ideal.

Es necesario poder llevar a cabo la medida de la impedancia de entrada de una antena para determinar su ancho de banda, y por lo tanto, el margen de adaptación con el equipo asociado, ya bien sea un transmisor o un receptor. Los elementos que rodean a la antena afectan a su impedancia, sobre todo en frecuencias bajas, por lo que es necesario llevar a cabo la medida en la condición real de funcionamiento. No es por tanto suficiente con realizar las medidas en un entorno controlado, ya que la impedancia final será la que presente una vez que se ha instalado sobre el vehículo en el que se utilizará.

2.2. Diagrama de radiación

Son necesarios para poder identificar y localizar los posibles nulos o caídas de señal, así como la manera en que la estructura del vehículo afecta su comportamiento.

El diagrama de radiación de una antena es un dibujo del campo / potencia radiada en función del ángulo. Los diagramas más importantes para caracterizar una antena son los del plano E y el plano H. El plano E es el plano que contiene el vector campo eléctrico en la dirección de máxima radiación. El plano H es aquel que contiene el vector campo magnético en la dirección de máxima radiación [2] . Los diagramas de radiación del plano E (obtenidos a $\Phi = 0$ para polarización vertical) y del plano H (obtenido a $\theta = \pi/2$ para polarización vertical) de un elemento de corriente corto se muestran en la figura 2 [4]. Cuando se llevan a cabo las medidas de antenas en una plataforma, el plano H corresponde al plano horizontal (paralelo a la tierra) y el plano E es el vertical (plano perpendicular a la tierra).

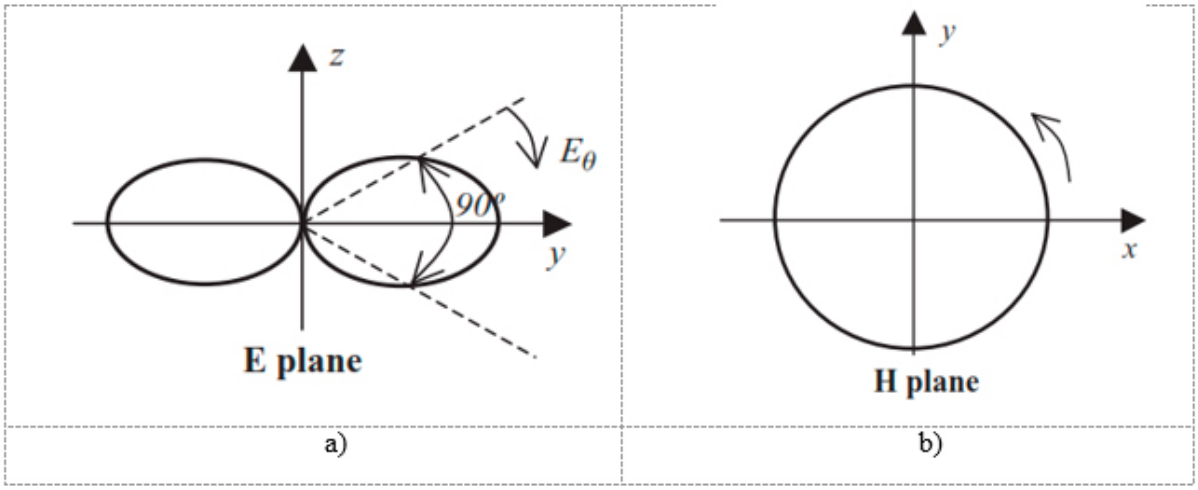


Figura 2. Diagramas de radiación de un elemento de corriente eléctricamente corto en los planos E y H.

Hay pocos métodos para la medida de diagramas de radiación de antenas: los basados en condiciones de campo lejano (*far-field condition* [2]), en *Open-Area Test Sites* (OATS) [5], en cámaras anecoicas [2], *Compact Antenna Test Ranges* (CATR) [6] y medidas en modelo a escala [5]. Sin embargo, ninguno de ellos es directamente aplicable al caso que nos interesa, antenas sobre un vehículo terrestre militar. En el presente artículo se propone un método para la medida de diagramas, basado en una modificación de método OATS, pero aplicado en este caso sobre un vehículo militar terrestre.

2.3. Riesgos de las radiaciones peligrosas («Radiation Hazards», RADHAZ)

Los diversos sistemas radiantes en los vehículos militares originan riesgos sobre: las personas (*Hazards of Electromagnetic Radiation to Personnel*, HERP), los combustibles (*Hazards of Electromagnetic Radiation to Fuel*, HERF), las municiones (*Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance*, HERO) que tengan dispositivos EED (*Electro Explosive Devices*) y sobre los sistemas electrónicos de seguridad crítica (por ejemplo interferencias con equipos y dispositivos médicos electrónicos).

De los riesgos anteriormente expuestos, nos centraremos en el que está siempre presente: HERP, para el personal que se encuentra dentro y/o en las inmediaciones del vehículo con los sistemas transmisores. Para la prevención de riesgos de las personas, RADHAZ HERP, gobiernos y organismos internacionales han establecido diversas legislaciones y estándares, todos ellos caracterizados por introducir un margen de seguridad para el personal.

En España son de aplicación: para trabajadores la directiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de junio de 2013 [7] transpuesta al ordenamiento jurídico español, mediante su publicación en el Real Decreto 299/2016 [8] . En el ámbito militar, el 22 de junio de 2015, por *Boletín Oficial de Defensa*, se implantó en España el STANAG 2345 MEDSTD (Edición 4). Para el público en general es el Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre, que a su vez se basa en la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación No Ionizante (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, ICNIRP) de 1998 [9] publicada en la Recomendación del Consejo de Ministros de Sanidad de la Unión Europea de 12 de julio de 1999 [10], adopta los mismos niveles.

3. Desarrollo

3.1. Medidas impedancia

Con la finalidad de averiguar si el sistema está funcionando correctamente, se llevan a cabo medidas de la impedancia de entrada a la salida de los sistemas transmisores, al conjunto línea de transmisión y antena. Para lo cual se emplea un analizador de redes debidamente calibrado y que cubra el rango de

frecuencias de interés [11]. Además de la VSWR se obtiene el ancho de banda de funcionamiento de la antena. Para poder transmitir y realizar las posteriores medidas de los diagramas de radiación y HERP, deberá de presentar el sistema una VSWR próxima a la unidad, y siempre menor de tres, ya que si no la potencia reflejada puede dañar el equipo transmisor [5].

3.2. Medidas diagramas de radiación

Antes de llevar a cabo las medidas de los diagramas, es necesario realizar las medidas de la impedancia, para asegurar que hay señal en el aire. Si el sistema a medir es en la banda de *High Frequency* (HF), 2 a 30 MHz, es necesario comprobar el acople en las frecuencias de interés, ya que incluyen un acoplador para el correcto funcionamiento del sistema.

Mediante la aplicación del OATS se pueden medir los diagramas tanto en plano E como en el H. No obstante, en este trabajo solo se aborda la medida del plano H. El hemisferio sobre la tierra, el plano E, podría ser medido mediante el uso de un helicóptero o un globo de aire caliente, pero cualquiera de estas dos opciones resultaría extremadamente cara. Por ello, el diagrama que se caracterizará es el correspondiente al plano H, siendo para ello necesario medir los 360º alrededor de la plataforma a caracterizar. A continuación se expone en detalle el método que se propone para la realización de esta medida.

Desde un punto fijo en tierra y con visión directa de la plataforma a caracterizar, se emplaza un sistema de medida dentro de una unidad móvil. Este sistema estará compuesto por antenas receptoras en la banda de trabajo de los sistemas a medir, varios analizadores de espectro (Agilent E4440A 3 Hz - 26.5 GHz PSA), un GPS y un ordenador conectado a los analizadores de espectro mediante el bus de datos de propósito general (*General Purpose Interface Bus* (GPIB) / IEEE Standard Digital *Interface for Programmable Instrumentation* (IEEE-488)) (figura 3). Además, es necesario un enlace de comunicaciones con la plataforma durante la medida, por lo que se emplea un sistema de comunicaciones de UHF para establecer contacto entre el vehículo y la unidad móvil, para que de esa forma la unidad bajo medida pueda transmitir su posición y rumbo en tiempo real.

Figura 3. Unidad móvil y levantamiento de diagramas de un vehículo militar.

Para poder efectuar las medidas, es necesario línea de visión directa entre la unidad que se está midiendo y la unidad móvil. Además, el vehículo debe de estar desplazándose en círculos en una zona de trabajo despejada. La distancia entre antena de recepción (unidad móvil) y transmisora (vehículo) debe estar a una distancia lo suficientemente lejana para poder garantizar condiciones de campo lejano en la transmisión [2], a menor frecuencia mayor distancia.

La unidad a medir comienza la transmisión en cada frecuencia de interés, siendo estas detectadas por la unidad móvil. Mediante el enlace de comunicaciones (ha de fijarse una frecuencia de operación y al menos una alternativa) proporciona su posición GPS al vehículo. La plataforma bajo medida comienza a moverse a velocidad constante haciendo círculos (diagramas plano H), se adapta la velocidad constante para que la plataforma sea capaz de completar cada evolución en aproximadamente cuatro minutos (con el fin de garantizar una buena cadencia de medidas). Cada cinco grados la plataforma transmite su posición, rumbo y distancia (de la plataforma a la unidad móvil). Con estos datos, se graba la señal recibida para cada frecuencia.

3.3. Medidas RADHAZ

Las medidas de RADHAZ se realizarán desde el riesgo para HERP, tanto dentro como fuera de los mismos. Para la medida se emplearán siempre medidores de campo y sondas de banda ancha. La elección del equipo irá condicionado a las características de la fuente de RF: para bajas frecuencias (principalmente HF) será necesario medir los niveles de E y H, ya que estaremos en campo cercano. El tipo de sensor de la sonda irá condicionado a si son señales continuas o pulsadas (radares).

4. Resultados y discusión

Se aplicará lo anteriormente expuesto a diversos vehículos militares terrestres (figura 4), con la finalidad de ver cómo es viable su aplicación en la realidad.

Las medidas de las impedancias (VSWR) se realizan con un analizador de redes Anritsu (*Site Master TM Cable & Antenna Analyzer + Spectrum Analyzer S332E*), para el caso de la antena de HF, es necesario para cada frecuencia de interés sintonizar el sistema para que el acoplador se adapte a la frecuencia de sintonía y medir a posteriori, en cambio en las antenas de VHF no es necesario.

Figura 4. Vehículos empleados para las medidas.

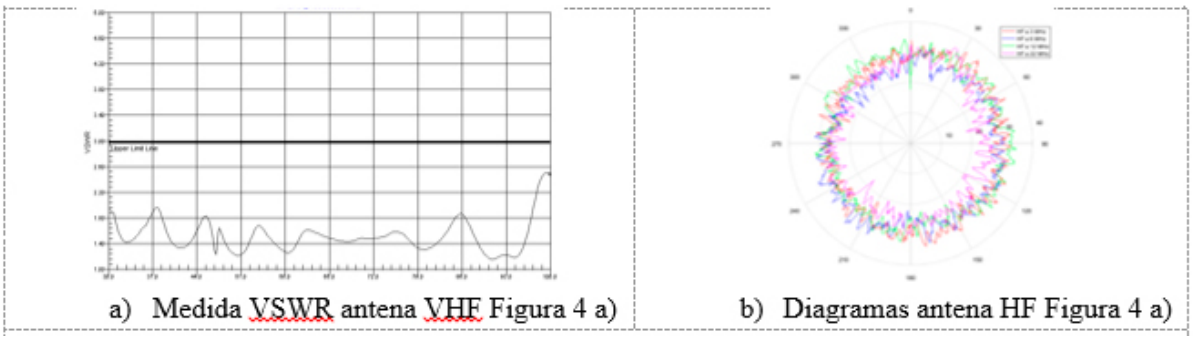


Figura 5. Medida VSWR de VHF y diagramas de HF.

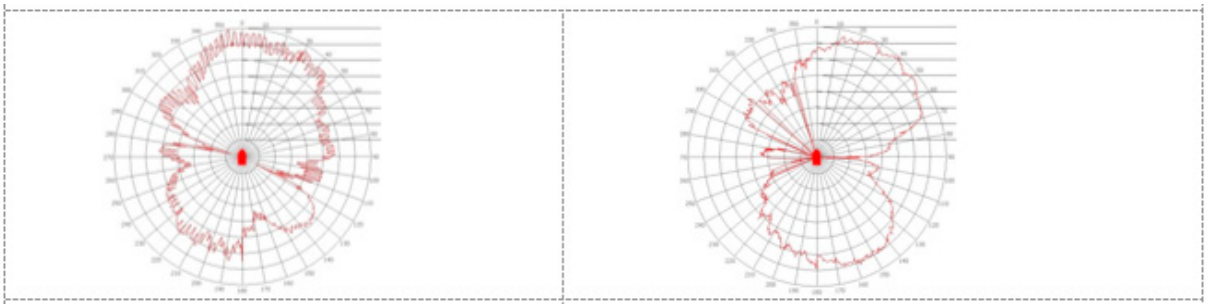


Figura 6. Medidas diagramas antenas vehículo. Figura 4 b).

Para las medidas de RADHAZ HERP, a modo de ejemplo, se lleva a cabo para el sistema de HF del vehículo de la figura 4 a) porque es el transmisor que más potencia transmite (100 vatios). Antes de empezar se lleva a cabo la medida de la VSWR, para ello sintonizamos de 2 MHz a 30 MHz todas las frecuencias con un paso de 1 MHz, siendo los resultados validos (VSWR<3) en todas las frecuencias, procedemos a la medida de RADHAZ HERP en dos puntos: dentro del propio vehículo, al lado del acoplador de la antena y en la escotilla de la torreta (punto más próximo de una persona a la antena). Los equipos que se emplean para la medida (medidores de campo y sondas banda ancha) son del fabricante «Narda Safety Test Solutions and L3 Communications Company» (para la medida del campo eléctrico el medidor EMR-300 con la sonda 8.2 y para el campo magnético el medidor NBM-550 con la sonda HF-3061).

Los niveles obtenidos dentro del vehículo, junto al transmisor y el acoplador de antena se encuentra por debajo de los umbrales de detección del instrumental de medida (0,6 V/m para el campo eléctrico y 0,012 A/m para el magnético). Los niveles en la escotilla de la torreta, están siempre por debajo de los niveles que recoge la normativa más restrictiva (niveles más bajos) para la presencia de personal, el R.D. 1066/2001.

5. Conclusiones

Las medidas de la VSWR son necesarias para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, en primer lugar nos dice el nivel de potencia real que está saliendo al aire, y nos fija el rango (ancho de banda) en el que podemos utilizar la antena asociada al equipo con máxima transmisión de potencia. Es necesario comprobarlo una vez instalada la antena, ya que el propio vehículo modifica su comportamiento e incluso, en función de la frecuencia actuar como antena (bajas frecuencias, HF).

La medida de los diagramas de radiación en bajas frecuencias no aporta mucha información, ya que a bajas frecuencias todo el vehículo actúa como antena y presentan un diagrama omnidireccional (figura 5 b). Por el contrario, a medida que se aumenta en frecuencia, la longitud de onda disminuye, y el diagrama de radiación se ve determinado por el entorno de la antena (figura 6). Sumamente importante cuando aumentamos la frecuencia de trabajo, ya que nos puede obligar a colocar más de una antena si queremos obtener un diagrama omnidireccional, como por ejemplo para la instalación de inhibidores de frecuencia.

Con la finalidad de asegurar la protección del personal y el cumplimiento de la legislación al respecto, se observa cómo los niveles de radiación electromagnética no ionizante a la que está expuesto el personal está por debajo de la más restrictiva de las normas. No obstante, es necesario efectuar medidas de los mismos para poder asegurarlo. Es necesario efectuar las medidas siempre que se instalen equipos nuevos y periódicamente por mantenimiento.

Agradecimientos

Al personal del CEMEDEM así como a todos los miembros del TEAR de la Infantería de Marina, sin cuya ayuda no habría sido posible la elaboración del presente artículo.

Referencias

1. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, «IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. IEEE Std 145-1993,» Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, 1993.*
2. *C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and design., New York: John Wiley & Sons, Inc, 1997 Second Edition.*
3. *R. E. Collin, Foundations for Microwave Engineering., New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2001.*
4. *Y. Huang y K. Boyle, Antennas from theory to practice, West Sussex: John Wiley and Sons Ltd, 2008.*
5. *P. E. J. Law, Shipboard Antennas, Norwood: Artech House, INC, 1986 Second Edition.*

6. *S. W. L. Y. T. Lo, Antenna handbook: Volume IV related topics, New York: Chapman & Hall, 1993.*
7. *Diario Oficial de la Unión Europea, Directiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de junio de, 2013.*
8. *Real Decreto 299/2016, de 22 de Julio, BOE núm. 182 de 29 de Julio de 2016.*
9. *Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre (RCL 2001\2415, 2597).*
10. *Consejo de la Unión Europea, Recomendación del Consejo, 1999/519/CEE, 1999.*
11. *Agilent Technologies, Agilent Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques 4th, New York: Agilent Technologies, Inc., 2013.*

RadioUAV: «beyond-the-visible» applications with UAV (aplicaciones «más allá de lo visible» con UAV)

García Fernández, María[1,*], Álvarez López, Yuri[1], González Valdés, Borja[2], Arboleya Arboleya, Ana[3], Rodríguez Vaqueiro, Yolanda [2], Las Heras Andrés, Fernando[1], y Pino García, Antonio[2]

1 Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Oviedo. Correo electrónico: garciafmaria@uniovi.es, alvarezyuri@uniovi.es, flasheras@uniovi.es

2 AtlantTIC Research Center, Universidad de Vigo. Correo electrónico: bgvaldes@com.uvigo.es, yrvaqueiro@com.uvigo.es, agpino@com.uvigo.es

3 Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Rey Juan Carlos. Correo electrónico: ana.arboleya@urjc.es.

* Autor principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: garciafmaria@uniovi.es

Resumen

En esta contribución se presentan dos sistemas para inspección no destructiva basados en el empleo de sensores de radiofrecuencia embarcados en vehículos aéreos no tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*). La tecnología desarrollada permite aprovechar las propiedades de las ondas electromagnéticas como, por ejemplo, la capacidad de penetración en ciertos materiales. Ello hace posible detectar fenómenos que no podríamos ver con nuestros propios ojos ni con las cámaras habitualmente embarcadas en UAV (de ahí el nombre de aplicaciones «más allá de lo visible»). Los sistemas presentados son: GEODRON, que cuenta con un georradar (o GPR, *Ground Penetrating Radar*) embarcado y permite obtener imágenes de alta resolución del subsuelo y de los objetos enterrados en él; y UASAM, que incorpora un detector de potencia de radiofrecuencia y posibilita la medida de antenas *in-situ* y la detección de fallos en las mismas. El sistema GEODRON es de especial interés en el ámbito de la seguridad y defensa (para detección de explosivos, como minas antipersona) y en tareas de búsqueda y rescate (para detectar personas atrapadas tras un desastre natural). Al estar el radar embarcado en un UAV, se evita el contacto físico con el suelo durante la exploración, garantizando la seguridad en la operación. Por otro lado, UASAM puede aplicarse también en el ámbito de defensa para, por ejemplo, inspeccionar antenas a bordo de embarcaciones militares. El empleo de UAV posibilita la inspección de zonas de difícil acceso de forma rápida, lo que supone una gran ventaja en este tipo de aplicaciones.

Palabras clave

UAV, detección de minas antipersona, medida de antenas.

1. Introducción

El gran desarrollo experimentado por los vehículos aéreos no tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles)* en los últimos años ha dado lugar a nuevas aplicaciones en diversos sectores, como obra civil, agricultura, seguridad y defensa, y comunicaciones. La reducción de coste de los UAV y de los sensores a embarcar ha contribuido de forma fundamental al rápido crecimiento de este tipo de aplicaciones basadas en UAV.

En el campo de los sistemas radar embarcados, se han desarrollado prototipos de sistemas SAR (*Synthetic Aperture Radar*) para observación terrestre o superficial [1]. Si bien existen prototipos de sistemas para detectar objetos ocultos enterrados [2], solamente el presentado en esta contribución, GEODRON, permite combinar coherentemente las medidas y, como consecuencia, obtener imágenes radar de alta resolución del subsuelo.

Los UAV se han utilizado también satisfactoriamente para medir antenas y emisiones electromagnéticas [3]. El sistema desarrollado, UASAM, destaca por trabajar en campo cercano (solventando las limitaciones de los sistemas que trabajan en campo lejano), lo que posibilita aplicaciones de diagnóstico de antenas (por ejemplo, detección de fallos).

En la figura 1 se representan los objetivos y resultados que se pretenden obtener con cada uno de los prototipos: imágenes electromagnéticas del subsuelo en el caso de GEODRON [4, 5] y el campo reconstruido en la apertura de la antena y su diagrama de radiación en el caso de UASAM [6].

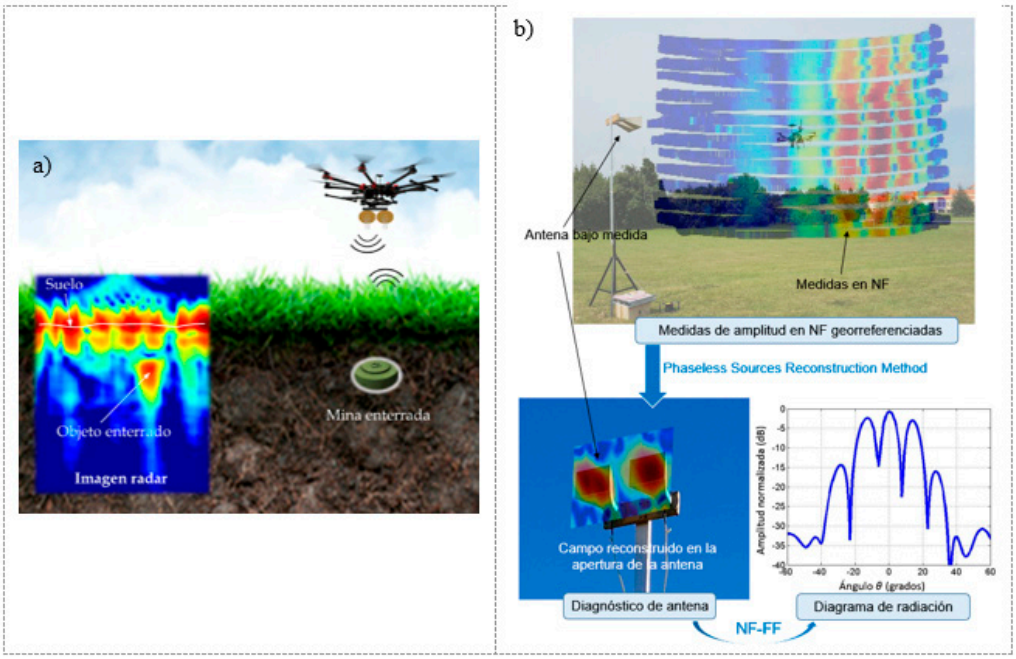


Figura 1. Esquema de las soluciones propuestas para la detección de minas antipersona (GEODRON) (a) y para diagnóstico y caracterización de antenas (UASAM) (b).

1.1. Detección de minas antipersona

Las técnicas de inspección no destructiva (NDT, *Non-Destructive Testing*) son de gran interés para la detección de objetos enterrados en un amplio abanico de aplicaciones, como seguridad y defensa (para detección de minas antipersona), obra civil, arqueología u operaciones de búsqueda y rescate. Entre estas técnicas, GPR (*Ground Penetrating Radar)* [7] es una de las más eficaces ya que permite detectar objetos tanto metálicos como plásticos y, además, es capaz de proporcionar imágenes electromagnéticas del subsuelo.

Fundamentalmente existen dos tipos de arquitecturas de sistemas GPR: *Forward-Looking GPR* (FL-GPR), en el que las antenas se colocan con una cierta inclinación con respecto al suelo manteniendo una distancia de seguridad, y *Downward-Looking GPR (DLGPR)*, en el que las antenas se encuentran perpendiculares al suelo. El primero permite aumentar la energía que penetra en el suelo (a costa de una peor resolución), mientras que el segundo permite mejorar la resolución (pero capta mayor energía procedente de la interfaz entre el aire y el suelo, que puede enmascarar a los blancos).

En algunas aplicaciones, como la mencionada de detección de minas, el sistema debe guardar una distancia de seguridad con respecto al área a inspeccionar, lo que es difícil de conseguir en sistemas DL-GPR. Una posible solución se basa en el empleo de robots terrestres, con un bajo riesgo de detonación accidental pero una baja velocidad de exploración. Para solventar estos problemas, es decir, minimizar el riesgo e incrementar la velocidad, la solución propuesta en esta contribución se basa en el empleo de un sistema GPR a bordo de un UAV. Además, al emplear un sistema de posicionamiento de precisión, las medidas tomadas con el prototipo pueden combinarse coherentemente con algoritmos de SAR. Ello hace que pequeños objetos próximos entre sí puedan distinguirse en la imagen electromagnética obtenida, mejorando la calidad de los resultados.

1.2. Medida de antenas

Los sistemas de medida de antenas basados en UAV permiten caracterizar el funcionamiento de las antenas en condiciones de operación (*in-situ*). Ello posibilita tener en cuenta la influencia del entorno (por ejemplo, reflexiones en el suelo), a costa de ser menos precisos que las medidas tomadas en instalaciones específicas de medida de antenas (como cámaras anecoicas). Además, estos sistemas basados en UAV son más baratos y fáciles de operar que otras soluciones similares que se basan en el empleo de aviones tripulados.

Los sistemas desarrollados pueden clasificarse en función de diversos criterios como: i) el tipo de sensores embarcados (un detector de potencia, un analizador de espectros, o un transmisor); y ii) la región de operación, bien sea campo cercano (NF, *Near-Field)* o campo lejano (FF, *Far-Field)*. La mayor parte de los prototipos existentes trabajan en campo lejano, el cual, para el caso de antenas que operan a baja frecuencia, puede encontrarse a cientos de metros de la antena. Ello conlleva ciertas limitaciones, debido tanto a restricciones de operación sobre ciertas áreas como a autonomía de vuelo. El prototipo desarrollado trata de solucionar esta problemática trabajando en campo cercano. Para ello se emplea un detector de potencia embarcado, cuyas medidas son procesadas para obtener los campos electromagnéticos en la apertura de la antena (que proporcionan información de diagnóstico), así como el diagrama de radiación.

2. Descripción del sistema: arquitectura y metodología

Los dos prototipos desarrollados presentan prácticamente la misma arquitectura, cambiando el tipo de sensor embarcado. En ambos casos, las medidas adquiridas en vuelo, georreferenciadas con alta precisión, se envían en tiempo real a una estación de control donde se procesan para obtener imágenes radar del subsuelo (sistema GEODRON) o información de la antena bajo medida (sistema UASAM). Los prototipos están compuestos por los siguientes subsistemas, tal y como se muestra en la figura 2:

- Subsistema de control de vuelo, que consta del controlador de vuelo y los sensores de posicionamiento habituales en un UAV. En concreto, estos sensores son: unidades de medida inercial, barómetro y receptor de GNSS *(Global Navigation Satellite System)*.
- Subsistema de comunicaciones, compuesto por módulos de radiocontrol a 433 MHz y una red inalámbrica a 2,4 GHz o 5,8 GHz (seleccionándose aquella que no interfiera con las frecuencias de trabajo del radar o de la antena bajo medida).
- Subsistema de posicionamiento de precisión centimétrica. Consta de un sistema de navegación cinética satelital en tiempo real (RTK, *Real Time Kinematic*) y de un altímetro láser. El sistema RTK está compuesto por dos receptores de GNSS: uno en el UAV y otro en tierra en una posición fija y conocida. Este último estima las correcciones a realizar a las señales de GNSS y se las envía al que está en el UAV, lo que hace posible conseguir precisión centimétrica.
- Subsistema sensorial. En el caso de GEODRON consta de un radar UWB (*Ultra-Wide-Band)* en banda C y dos antenas de hélice con polarización circular, mientras que en UASAM está compuesto por un detector de potencia y una antena que funcione en la banda de interés (sonda).
- Estación de control terrena, donde se controla la misión y se reciben las medidas georreferenciadas en tiempo real para ser procesadas posteriormente.

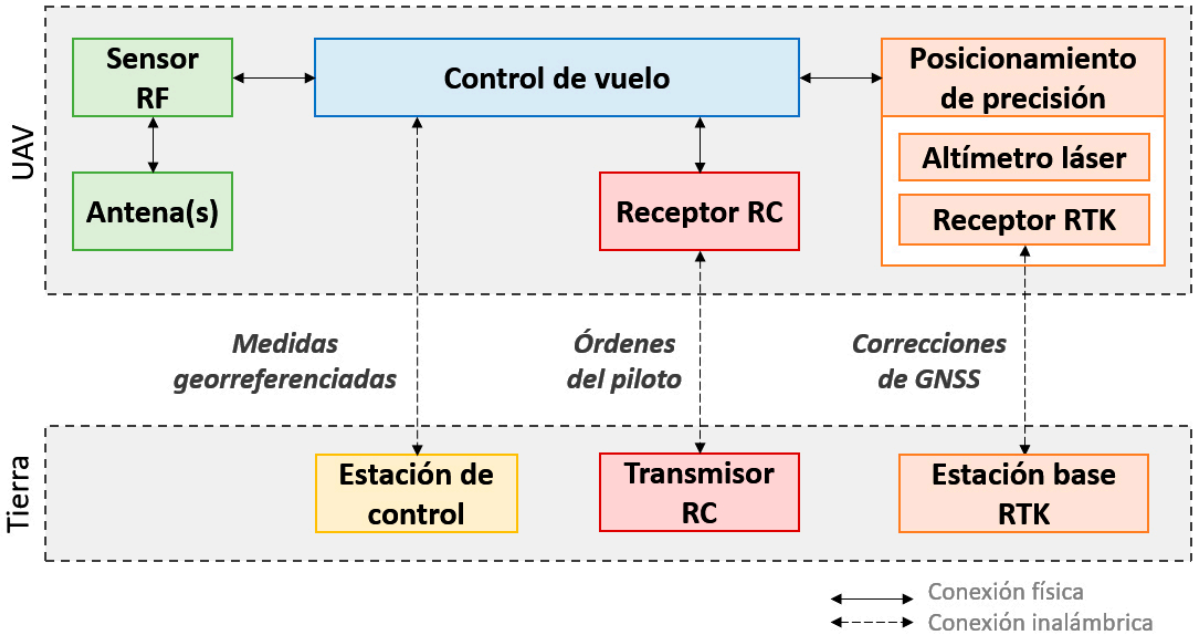


Figura 2. Esquema de los principales subsistemas que componen los prototipos y las conexiones entre los mismos.

En la figura 3 se muestra una imagen de cada uno de los prototipos, donde en naranja se han resaltado los componentes del subsistema de posicionamiento de precisión y en verde los componentes del subsistema sensorial.

2.1. Metodología del sistema GEODRON

En cuanto a la metodología empleada en GEODRON, las medidas tomadas por el radar se combinan coherentemente empleando un algoritmo basado en SAR. Asumiendo una configuración cuasi-monoestática donde el campo dispersado se mide en puntos de adquisición a frecuencias, la reflectividad en un punto viene dada por (1), donde es la posición de la medida m-ésima, es el número de onda a la frecuencia n-ésima y .

$$\rho(\boldsymbol{r}') = \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} E_{scatt}(f_n, \boldsymbol{r_m}) e^{j2k_{0,n}R} \quad (1)$$

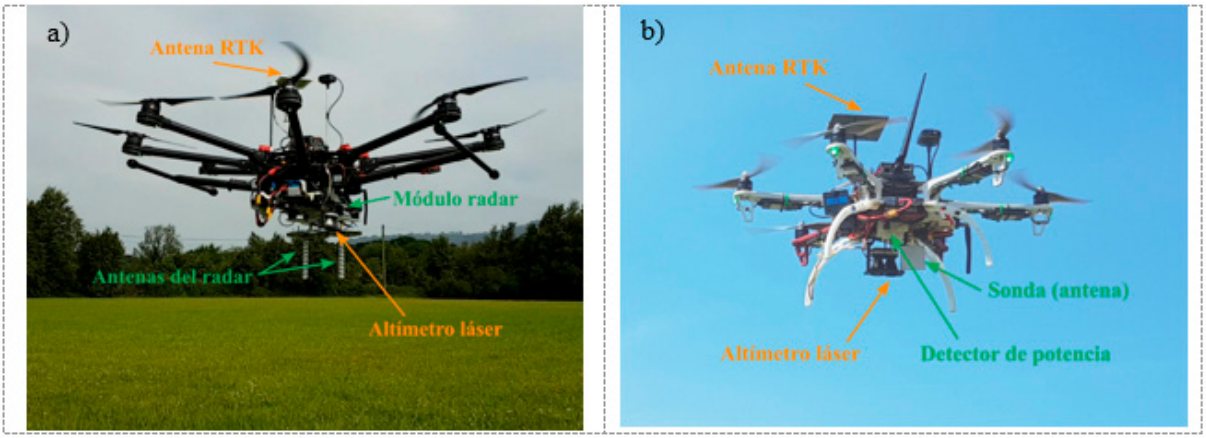


Figura 3. Prototipos desarrollados de GEODRON (a) y UASAM (b).

En caso de que las medidas se realicen en el dominio del tiempo (como es el caso), se debe realizar una transformada de Fourier antes de aplicar el procesado SAR. Además, con el objetivo de mitigar el *clutter* (causado por la desadaptación de impedancias en la interfaz aire-suelo), a cada medida se le resta la traza media de todas las medidas.

La gran ventaja del algoritmo de SAR empleado es que permite trabajar con medidas tomadas en superficies arbitrarias (en tanto en cuanto se tengan suficientes medidas para cumplir el criterio de Nyquist). Por ello, es especialmente adecuado para procesar medidas tomadas con un UAV.

2.2. Metodología del sistema UASAM

Como el prototipo de UASAM se basa en el empleo de un detector de potencia en lugar de un detector coherente, no se dispone de información de la fase del campo medido, que es necesaria para el post-procesado de las medidas. Para solventarlo, se emplea una técnica de reconstrucción de fase llamada *phaseless Sources Reconstruction Method* (pSRM) [8]. Esta técnica permite obtener una distribución de corrientes eléctrica y magnética equivalente en la apertura de la antena (lo que proporciona información de diagnóstico). A partir de esta distribución se obtiene posteriormente el diagrama de radiación aplicando una transformación de campo cercano a campo lejano (NF-FF).

El empleo de esta metodología permite simplificar el *hardware* (solamente se necesita un detector de potencia), si bien es necesario realizar las medidas en dos superficies diferentes (por ejemplo, dos superficies cilíndricas concéntricas). De nuevo, la principal ventaja de emplear pSRM es que los puntos de medida pueden estar distribuidos arbitrariamente (cumpliéndose el criterio de Nyquist).

3. Validación experimental

La validación experimental se ha llevado a cabo en varias etapas: en primer lugar, la carga útil de ambos prototipos se validó en un ambiente controlado (en el laboratorio); posteriormente, se procedió a su validación en exteriores y, finalmente, se realizaron diversas pruebas de vuelo. En esta sección se muestran algunos de los resultados obtenidos en vuelo.

3.1. Resultados del sistema GEODRON

Dado que no está permitido cavar en el campo de vuelo en el que se han realizado las pruebas, se ha utilizado una caja de plástico llena de arena (en la cual se han enterrado diversos objetos). La caja, de

dimensiones 56 x 78 x 43 cm, se colocó sobre la hierba y se cubrió con una lona, tal y como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Setup para las pruebas de vuelo de GEODRON.

En la figura 5 se muestra la imagen SAR obtenida cuando en la caja se encontraba, enterrado a 10 cm de profundidad, un cilindro de plástico (de 9 cm de radio y 9,5 cm de altura, relleno de espuma). Tanto el objeto como las interfaces entre los diferentes medios se distinguen claramente en la imagen resultante. El objeto y la interfaz entre la arena y el suelo debajo de la caja se reconstruyen a mayor profundidad de la real, ya que no se está teniendo en cuenta la permitividad de la arena (2,5). En la figura 5 también se observan las dos barras de PVC que soportan la lona (situadas a alrededor de 60 y 70 cm de los lados izquierdo y derecho de la caja, respectivamente).

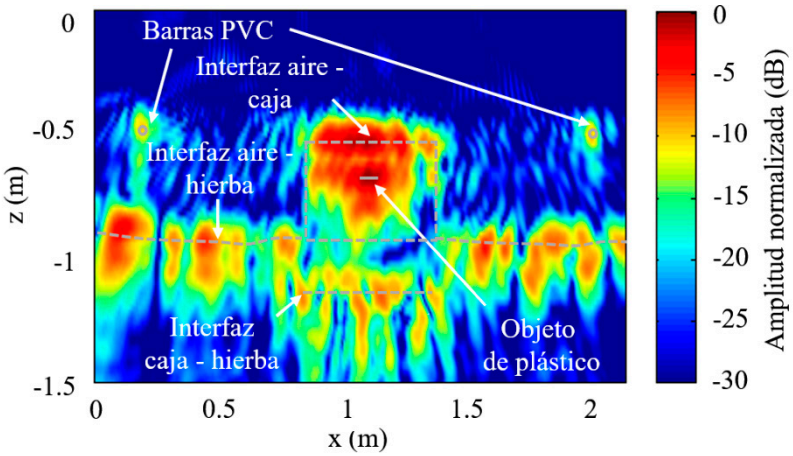


Figura 5. Imagen SAR de las medidas con un objeto de plástico enterrado en la caja de arena.

3.2. Resultados del sistema UASAM

UASAM ha sido utilizado para medir de forma satisfactoria antenas y *arrays* tanto con polarización lineal como circular, comparando sus resultados con medidas realizadas en una cámara anecoica. En el ejemplo mostrado en esta contribución, se ha medido la antena de una estación base de telefonía móvil a 2,35 GHz.

Tal y como se muestra en la figura 6, la antena se ha colocado en un mástil de 3,30 m de altura. Para tomar las medidas se ha programado el UAV para que describa dos superficies semicilíndricas concéntricas (de 2 a 4,5 m de altura) a 3,7 y 4,5 m de distancia de la antena. Si bien la sonda empleada es un monopolo (que cuenta con un diagrama de radiación prácticamente omnidireccional en el plano horizontal), la parte delantera del UAV siempre apunta hacia la antena bajo medida para minimizar posibles desalineamientos. Una vez adquiridas las medidas de amplitud en campo cercano (figura 7a), se ha aplicado pSRM para recuperar una distribución de corrientes equivalentes en la apertura de la antena (figura 7b).

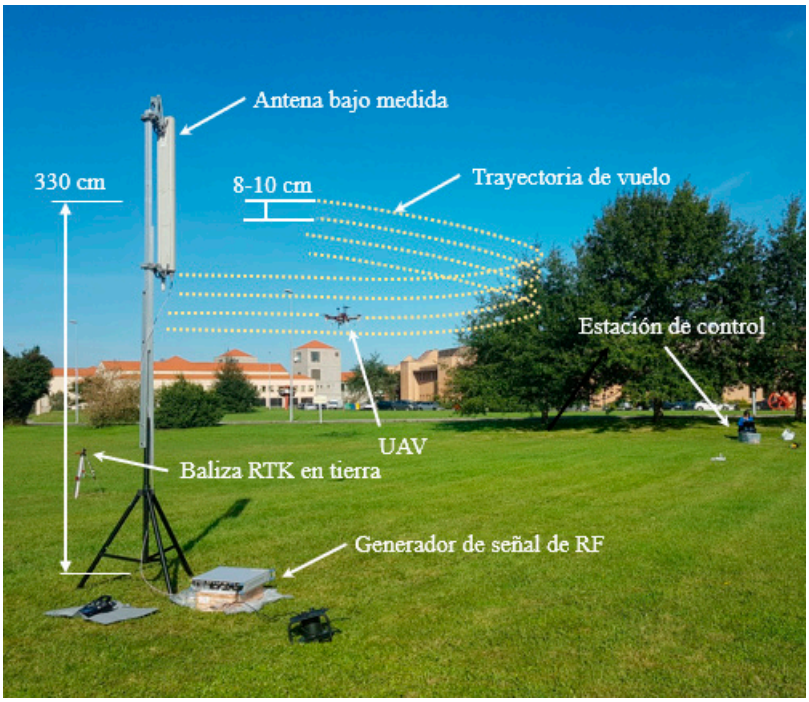


Figura 6. Setup para las pruebas de vuelo de UASAM.

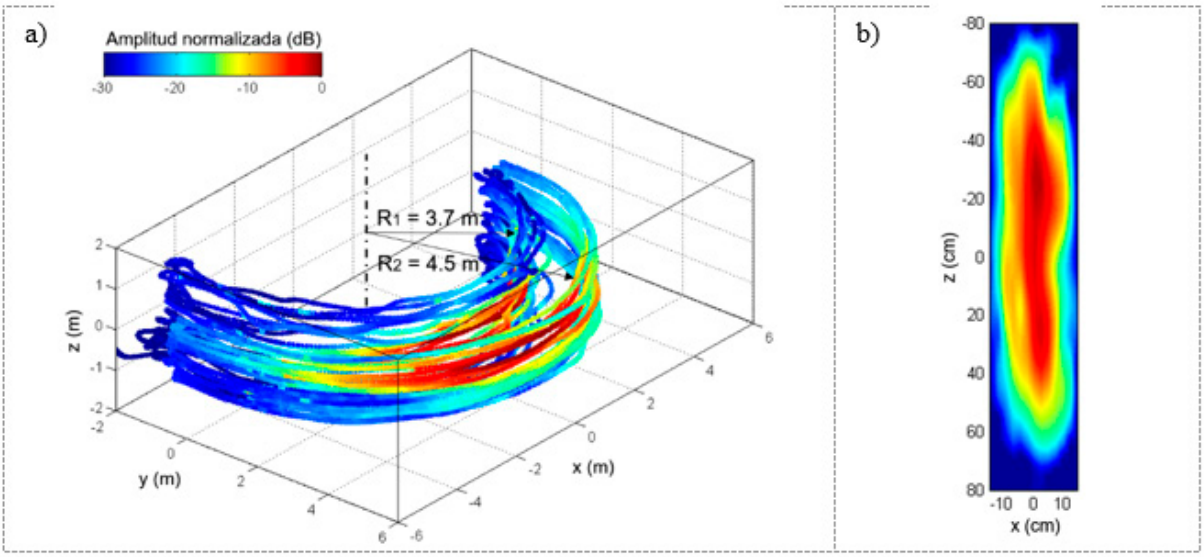


Figura 7. Medidas adquiridas con el prototipo (a) y distribución de corrientes reconstruida (b).

Finalmente, a partir de dicha distribución es posible obtener el diagrama de radiación en campo lejano. En la figura 8 se muestra el diagrama de radiación obtenido a partir de medidas de amplitud y fase en cámara anecoica (traza azul), de medidas de solo amplitud en cámara anecoica (traza negra) y de medi-

das de solo amplitud tomadas con el prototipo (traza roja). Existe una buena concordancia en el margen angular de validez del método (en torno a 30º).

4. Conclusiones

En esta contribución se han presentado dos sistemas novedosos basados en sensores de radiofrecuencia embarcados en UAV: GEODRON, que permite obtener imágenes electromagnéticas del subsuelo para aplicaciones de inspección no destructiva (por ejemplo, detección de minas antipersona); y UASAM, que posibilita la medida de antenas *in-situ*. En ambos prototipos, al emplear UAV se obtiene una mayor velocidad de escaneo y es posible inspeccionar zonas de difícil acceso.

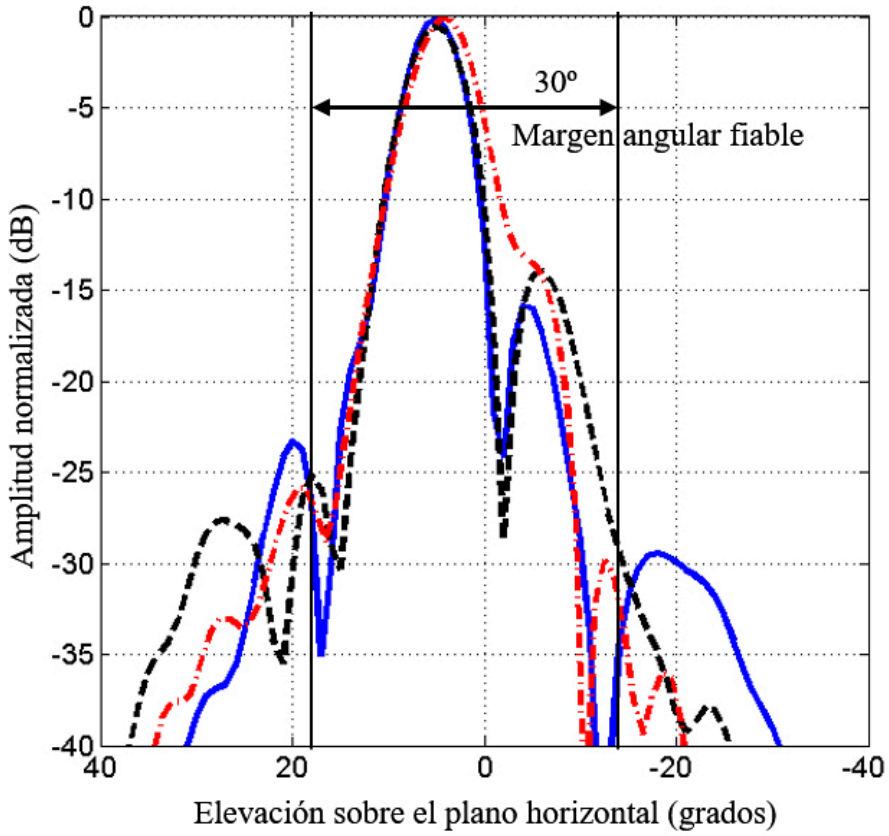


Figura 8. Diagrama de radiación.

En el caso de GEODRON, el principal valor añadido proviene del hecho de que el radar empleado está embarcado en el UAV, lo cual evita el contacto físico con el suelo. Otra ventaja importante es que, al emplear un radar, es capaz de detectar objetos tanto metálicos como plásticos. En el caso de UASAM, una característica diferenciadora es que permite identificar posibles fallos en las antenas, así como evaluar su diagrama de radiación empleando medidas en campo cercano (evitando tener que volar a distancias de campo lejano). Además, como la evaluación de la antena se realiza *in-situ,* posibilita tener en cuenta cómo afecta el entorno al funcionamiento de la misma.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno de España (TEC2014-55290-JIN, TEC2015-73908-JIN, RYC-2016-20280, FPU15-06341), el Gobierno del Principado de Asturias (FC-15-GRUPIN14-114, IDI/2017/000095), el Gobierno de Galicia (GRC2015/018) y AtlantTIC.

Referencias

1. *Llort M, Aguasca A, López-Martínez C, Martínez-Marín T. Initial evaluation of SAR capabilities in UAV multicopter platforms. IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Obs. Remote Sensing. 2018;11(1):127-140.*
2. *Ludeno G, et al. A micro-UAV-borne system for radar imaging: a feasibility study. Proc. 9th Int. Workshop Adv. Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 2017.*
3. *Virone G, et al. Antenna pattern verification system based on a micro unmanned aerial vehicle (UAV). IEEE Ant. Wireless Prop. Letters. 2013;13:169-172.*
4. *García-Fernández M, et al. Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board an unmanned aerial vehicle. IEEE Access. 2018;6:45100-45112.*
5. García-Fernández M, et al. Sistema de GPR embarcado en un UAV para la detección de objetos ocultos enterrados. Conf. Nacional en I+D para Defensa y Seguridad (DESEI+D). 2017.
6. *García-Fernández M, et al. Antenna diagnostics and characterization using unmanned aerial vehicles. IEEE Access. 2017;5:23563-23575.*
7. *Daniels D J. Ground Penetrating Radar. London: IET; 2004.*
8. *Álvarez Y, Las-Heras F, Pino M R. The sources reconstruction method for amplitude-only field measurements. IEEE Trans. Antenn. Propag. 2010;58(8):2776-2781.*

Firma radar de vehículos aéreos no tripulados: revisión de datos publicados y tendencias actuales

Jenaro de Mencos, Guillermo[1,*]; Poyatos Martínez, David[2]; Escot Bocanegra, David[2] y Bueno Pérez, Diego[3]

[1] Jefatura de Ingeniería, MALE, ET c/Prim 4, 28004 Madrid.

[2] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA, Área de radiofrecuencia, Torrejón de Ardoz.

[3] Jefatura de Ingeniería, MALE, ET c/Prim 4, 28004 Madrid. ISDEFE.

[*] Correspondencia: G. Jenaro: gjende@oc.mde.es; David Poyatos: poyatosmd@inta.es ; David Escot: escotbd@inta.es ; Diego Bueno: dbueno@isdefe.es

Resumen

La detección temprana de las plataformas aéreas no tripuladas y a su vez la reducción de la detectabilidad de las propias es imprescindible en los ámbitos de defensa y seguridad. La probabilidad de detección de una plataforma aérea no tripulada (UAV) mediante radar depende en gran medida de su firma radar, también denominada sección transversal radar (*Radar Cross Section* - RCS). Este valor puede llegar a ser muy pequeño, especialmente en sistemas tipo mini y micro UAV, hasta el punto de que estos sistemas pueden tener una RCS comparable a la de los pájaros. Además, las señales procedentes del terreno (*background clutter*), la frecuencia del radar, la velocidad radial y la trayectoria seguida por el UAV pueden hacer aún más difícil la detección. Diversas técnicas, como por ejemplo el análisis micro-Doppler, permiten identificar a las plataformas. En este artículo se hace una revisión de los datos publicados y se esbozan las principales líneas de trabajo para conocer las características de reflectividad de varios UAV operativos y para definir las metodologías de reducción de la sección transversal radar de los nuevos sistemas.

Palabras clave

UAV, radar, RCS, dron, probability of detection, detectability.

1. Introducción

En los últimos años se están desarrollando una amplia variedad de plataformas aéreas no tripuladas de distinto tamaño y forma, y su aplicación se está extendiendo tanto en el ámbito civil como en el de defensa y seguridad. El uso inadecuado constituye una amenaza creciente tanto para infraestructuras como para personalidades y eventos. De esta manera se hace imprescindible tanto la detección temprana de estos sistemas, para el caso de amenazas, como la reducción de la detectabilidad de las aeronaves propias para que cumplan su misión de forma eficiente.

La sección transversal radar (RCS) es un parámetro clave para determinar si un dron o, en términos militares, micro o mini vehículo aéreo (UAV) va a poder ser detectado por un radar y a qué distancia. Existen diversos métodos de medida de la RCS de este tipo de aeronaves, ya sean medidas estáticas en cámara anecoica o medidas dinámicas con el UAV en vuelo. La RCS depende de varios parámetros, como son la frecuencia y el ancho de banda de la señal radar, la polarización del campo con el que se transmite y recibe la señal, la geometría del blanco, los materiales constitutivos o el ángulo de incidencia de la iluminación radar [0]. El procedimiento más extendido para medirla y analizarla es en cámara anecoica y utilizando imágenes radar de apertura sintética inversa (ISAR) [2], aunque también se puede obtener a partir de simulaciones mediante *software*.

Según los trabajos de Knott [3], la sección radar equivalente para diversos objetos abarca un rango que va desde -40 dBsm para los insectos hasta 40 dBsm para grandes barcos, como muestra la figura 1. En el caso de los pájaros, el rango abarca aproximadamente desde -30 dBm hasta -10 dBm. En esa misma zona de valores se encuentran los UAV de pequeño y mediano tamaño, básicamente multicópteros y ala fija, de aproximadamente 30 cm a 1 m de dimensión característica.

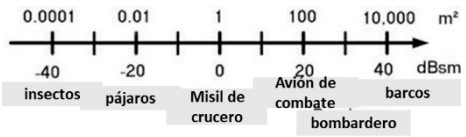


Figura 1. Rango de RCS para diversos elementos, en m2 y en dBsm.

Los radares de ondas milimétricas tienen buenas características de penetración en condiciones de niebla, polvo y humo, y están bien dotados para la detección y seguimiento de UAV [4], pero puede ser difícil discriminar sus ecos radar de los debidos a pájaros o a enjambres de insectos grandes, cuya RCS puede ser significativa.

El artículo hace una revisión de los trabajos publicados recientemente en este campo y muestra las características de reflectividad de varios UAV comerciales con objeto de ser capaces de detectarlos (diferenciándolos de otros blancos similares como pájaros en vuelo). Se presentan las instalaciones disponibles en INTA para la obtención de firma radar y la metodología que se pretende aplicar en los próximos trabajos conjuntos entre el Ejército de Tierra y el INTA.

2. Medidas de sección transversal radar de micro y mini UAV

Herschfelt *et al.,* [5] han realizado medidas en cámara anecoica sobre dos multirotores comerciales. La figura 2 muestra la RCS de un quadrotor (DJI™ F-450) visto por delante y por detrás. En la figura superior, para una frecuencia determinada se presenta la RCS en función del ángulo, y en la inferior la RCS en función de la frecuencia. Todas para polarización horizontal. En la parte superior se observa un pico en el centro con un rizado hacia los laterales. El pico se corresponde con el centro geométrico y se observa una zona de transición del metal (zona central) al plástico de los brazos. Otro aspecto interesante es la variación de la RCS con la frecuencia pues, por un lado, muestran una caída importante a 6,25 GHz visto por delante y a 7,5 GHz por detrás. Se observa además una leve pendiente de modo que a más frecuencia se tiene mayor RCS. El valor medio en la figura es de -17 dBsm.

Los mismos autores han hecho pruebas a un segundo dron tipo DJI™ S-1000+Octocopter con distancia entre patas de 46 x 55 cm, altura de 64 cm, longitud de 130 cm y medido con polarización vertical. Los resultados [5] fueron similares en cuanto a forma y tendencia, pero con valores algo superiores, y en particular un valor medio de -8 dBsm.

La figura 3 muestra datos obtenidos por Guay, R. [6] para medidas sobre el ParrotTM AR Drone (cuatri-rotor con carena y dimensiones 45,1 x 51,7 cm) a una frecuencia de 8 GHz y polarización vertical, pero ahora en función del ángulo de aspecto con el que se ilumina la plataforma. Se observan valores medios del orden de -25 dBsm.

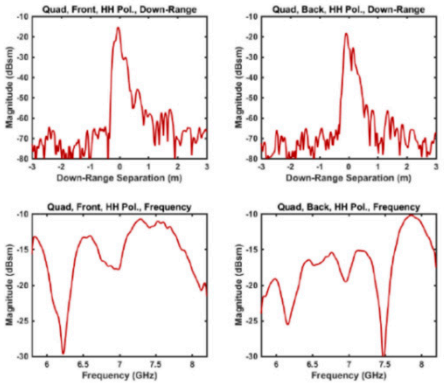


Figura 2. Medidas de RCS [5] (dBsm) en un dron comercial DJITM F450 HH RCS. Dimensiones: altura 19 cm, máxima longitud 49,5 cm, distancia entre patas: 21 x 21cm.

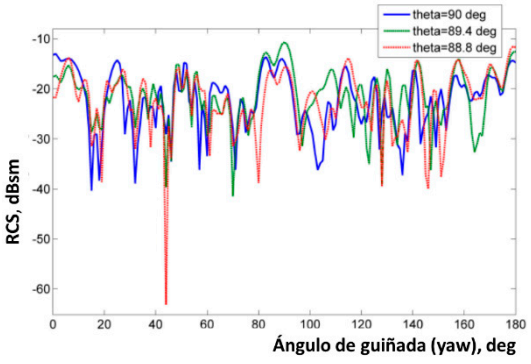


Figura 3. Medidas de RCS [6] en cámara anecoica del ParrotTM AR Drone, polarización vertical, a una frecuencia de 8 GHz.

3. Imágenes radar de apertura sintética inversa

Li [7] y Pieraccini [8] han realizado también medidas sobre multirotores comerciales obteniendo imágenes radar de apertura sintética inversa (ISAR). Las imágenes permiten detectar los puntos calientes y relacionar la RCS con la geometría. Así, se observa que los motores, baterías y materiales metálicos o de fibra de carbono son los que más aportan a la firma radar, y que las hélices no aportan prácticamente nada (estén girando o no). La figura 4 muestra resultados para distintas bandas de frecuencia, con diferencias significativas de RCS. La Tabla 2 permite comparar resultados cuando se modifica el ángulo de alabeo (*roll*), con o sin movimiento de las hélices, polarización, ángulo de elevación y frecuencia. El criterio más significativo es la frecuencia. Ritchie [9] ha realizado medidas en campo sobre hélices de DJI™ Phantom Vision 2+ de tres tipos, de plástico, fibra de carbono y plástico con camisa exterior de metal, encontrando que las propiedades eléctricas de la fibra de carbono son cercanas a las de un conductor eléctrico perfecto mientras que las del plástico son cercanas a las del aire a las frecuencias de medida.

Un resumen de resultados se encuentra en la Tabla 1 y la Tabla 2.

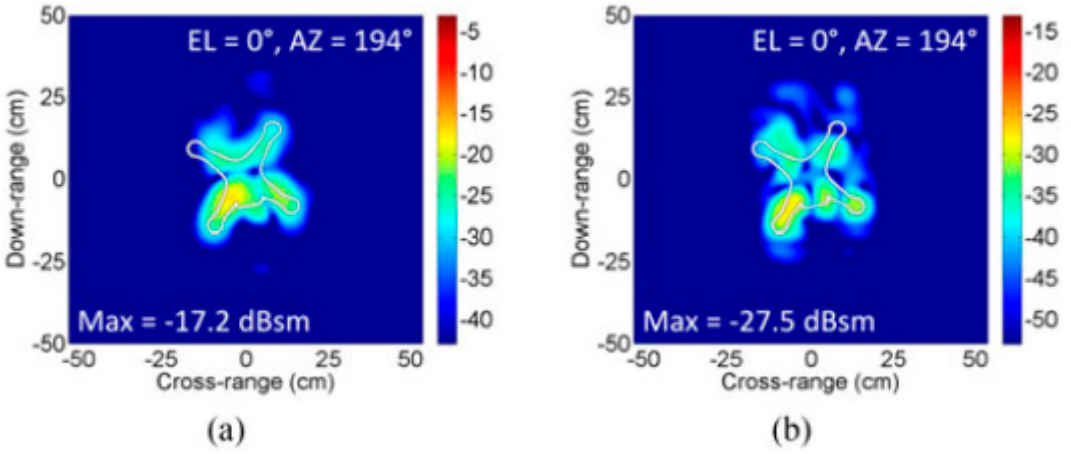


Figura 4. Medida comparativa de RCS e imágenes ISAR [7] a dos frecuencias distintas: (a) 12 – 15 GHz; (b) 3 - 6 GHz.

RCS medida en m² o en (dBsm)				
	Dimensiones	**Frecuencia**	**Pol. vertical**	**Pol. horizontal**
DJI F450 **[5]**	Altura: 19 cm, ancho 49,5cm	Rango 5,8-8,2 GHz	---	-17 dBsm
DJI S-1000 Octocopter **[5]**	Altura 64cm, ancho 130cm	Rango 5,8-8,2 GHz	-8 dBsm	----
PARROT™ AR Dron **[6]**	Altura 45,1cm, ancho 51,7cm	8 GHz	-25dBsm	----
SYMA X5SC-1 **[8]**	Altura 4,5cm, ancho 32 cm, plástico	Rango 8,0-12,0 GHz	0,0312 m² (-15dBsm)	0,0229 m² (-16dBsm)
AIRVISION NT4 CONTRAS **[8]**	Altura 22 cm, ancho 57 cm	Rango 8,0-12,0 GHz	0.271 m² (-5,6dBsm)	0,276 m² (-5,6dBsm)
DJI Phantom2 **[7]**	Ancho 35cm	Rango 12-15 GHz	-13,5 dBsm	-15,3 dBsm

Tabla 1. Resultados de medidas de RCS en varios multirotores [5,6,7,8]

Una primera conclusión de la Tabla 1 es que la RCS media en polarización vertical no muestra diferencias significativas con la horizontal [7, 8]. Se tienen valores entre -5 y -25 dBsm.

		RCS medida en dBsm (entre paréntesis)					
Modelo	**Dimensión**	**Criterio**					
DJI Phantom 2	35 cm diagonal	**Ángulo alabeo**	**8º** (-13,8)	**45º** (-19,4)	**90º** (-9,3)	**135º** (-18,8)	**172º** (-16,3)
Ídem		**Movimiento hélices**		Estacionario (-14,6dB)		En rotación (-15,3dB)	
Ídem		**Frecuencia**		12-15GHz (-17,2dB)		3-6 GHz (-27,5dB)	
Ídem		**Polarización**		VV (-13,5dB)		HH (-15,3dB)	
Ídem		**Elevación**		0º (-9,3dB)		-90º (-9,0dB)	
3DR Solo	46 cm diagonal	**Frecuencia**		12-15GHz (-14,1dB)		3-6 GHz (-24,2dB)	
DJI Inspire I	56 cm diagonal	**Frecuencia**		12-15GHz (-3,0dB)		3-6 GHz (-13,7dB)	

Tabla 2. Resultados de medidas de RCS en varios multirotores [5,6,7]. Si no se indica otra cosa las medidas son en banda 12-15 GHz y polarización vertical (VV)

Asimismo se muestra que las componentes micro-Doppler con polarización horizontal permite identificar las hélices (ensayos a 2,4 GHz, ancho de banda de 45 MHz, potencia 0,2 W, distancias al blanco de entre 70 y 150 m.). Otro aspecto a considerar es la aportación de la carga de pago. Fioranelli [10] ha aplicado la *Short Time Fourier Transform* (STFT) para discriminar cuándo los UAV tienen más carga, pero lo importante es que la carga de pago puede añadir RCS al conjunto.

4. El efecto de la dimensión del UAV

En principio se puede pensar que un UAV de mayor tamaño (suponiendo que no es de baja observabilidad) tendrá mayor RCS, es decir, la firma radar se incrementará con la dimensión característica. La figura 5 presenta los resultados para varios drones comerciales encontrándose nuevamente que el parámetro importante es la frecuencia y que, efectivamente, a mayor dimensión mayor RCS.

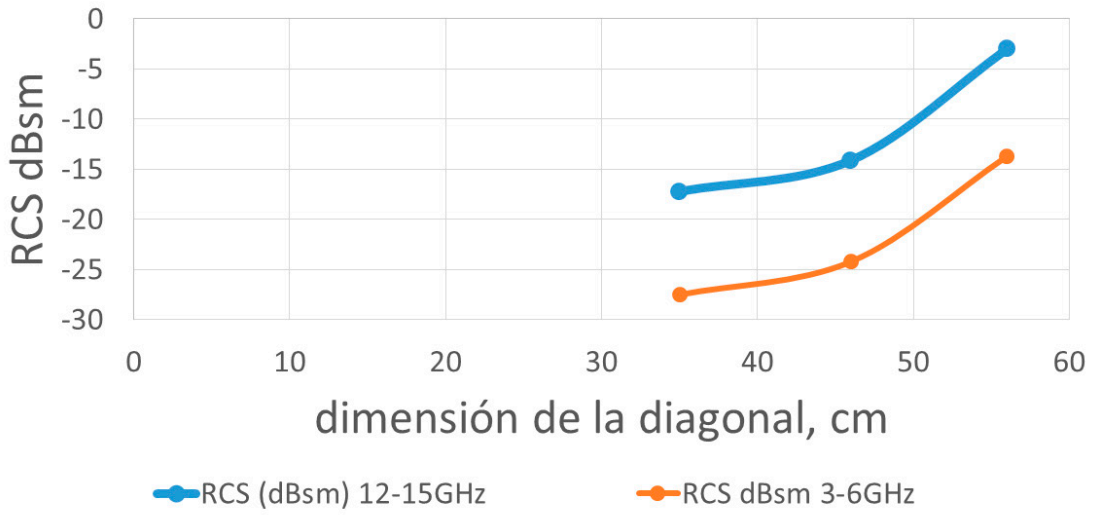


Figura 5. Sección transversal radar y dimensiones.

Long To [11] realizó medidas en campo con un equipo portátil y en cámara anecoica, proporcionando resultados sobre el UAV *Aerosonde* (figura 6). Se demuestra la posibilidad de medir RCS en el exterior con un equipo portátil. Además, cabe destacar el hecho de que la RCS más elevada se encuentra en la zona de cabeza, cola y costillas de las alas.

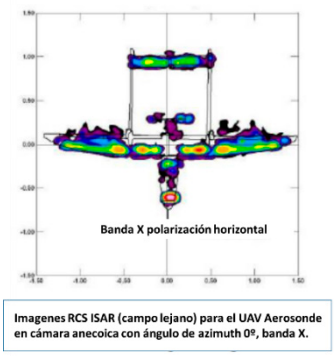


Figura 6. Medida en cámara anecoica de RCS e imagen ISAR [11] del modelo Aerosonde canadiense. Polarización horizontal y banda X.

5. Resultados de simulación

Schroder [12] ha realizado una simulación numérica con el método de los momentos y elementos finitos, obteniendo buenos resultados. La figura 7 muestra la comparativa entre resultados numéricos y experimentales en el DJI™ Phantom II, con valores de RCS entre -10 y -20 dBsm. Además, se hace un análisis de señal micro-Doppler para polarización horizontal y vertical, resultando que es posible identificar al dron en el primer caso y no en el segundo. Para este análisis basta con modelar únicamente la parte rotatoria, pero si esta es de plástico, es prácticamente indetectable. Harmanny [13] aplica también el análisis del contenido espectral en el tiempo de la señal micro-Doppler para discriminar al UAV.

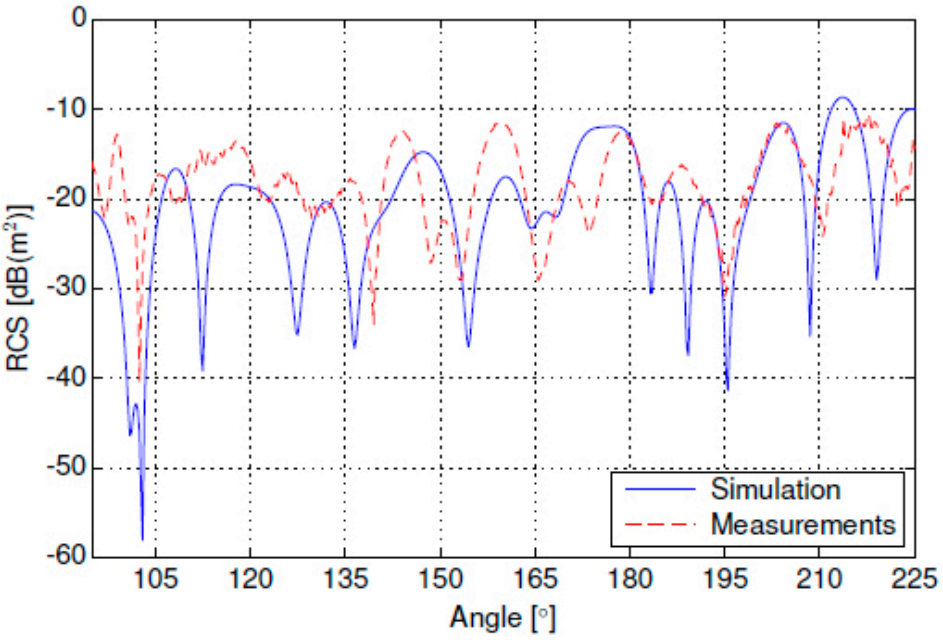


Figura 7. Comparativa entre resultados experimentales y de simulación numérica [12] a 10 GHz.

6. Medidas de sección transversal radar de pájaros

La reflectividad radar de un pájaro se debe principalmente al 65 % de su masa que está formada por agua, pudiéndose hacer un cálculo teórico que resulta comparable a los resultados experimentales. La Tabla 3 muestra la sección transversal radar de varios tipos de pájaros, en dBsm y m^2, en tres bandas de frecuencia diferentes (L, S y X).

		RCS teórica, m^2 (dBsm)			RCS experimental	
Tipo de pájaro	**Peso (gr)**	**Banda X**	**Banda S**	**Banda L**	**Banda X**	**Banda S**
Warbler (curruca)	10	0,0005(-33)	0,0005(-33)	0,00002(-47)		
Sparrow (gorrión)	25	0,0006(-32)	0,0016(-28)	0,00013(-39)	-37	-28
Starling (estornino)	75	0,0013(-29)	0,0017(-28)	0,0010(-30)	-31	
Plover (chorlito)	200	0,0014(-29)	0,0014(-29)	0,0051(-23)		
Pigeon (paloma)	500	0,0027(-26)	0,0038(-24)	0,0109(-20)	-28	-21
Duck (pato)	800	0,0044(-24)	0,0031(-25)	0,0088(-21)	-21	-30
Swan (cisne)	10000	0,024(-16)	0,027(-16)	0,021(-17)		

Tabla 3. Resultados de medidas de RCS en pájaros [8]

7. Análisis micro-Doppler del eco radar

Los trabajos de Torvik, Olsen y Griffiths [15, 16] presentan un método de discriminación entre UAV y pájaros basado en el análisis del efecto Doppler de la señal recibida de los pájaros debido al movimiento de las alas, en concreto un análisis micro-Doppler, que consiste en filtrar paso alto la señal, para eliminar los ecos del *clutter* estacionario, eliminar el efecto Doppler debido al movimiento traslacional y, finalmente filtrar paso bajo para extraer el movimiento relativo de las diferentes partes del cuerpo de los pájaros, en especial las alas. Así, si se representan los desplazamientos de frecuencia obtenidos mediante una transformada corta de Fourier (STFT) frente al tiempo se obtienen espectrogramas que representan la firma micro-Doppler del pájaro en cuestión, como la que muestra la figura 8. La elección de los parámetros de la STFT se realiza en función de la clasificación de los pájaros en base al tamaño y al movimiento, y de la banda frecuencia de trabajo del radar. En el caso de los grandes radares 3D empleados en vigilancia aérea estos parámetros son difíciles de obtener.

Cuando se trata de realizar el análisis micro-Doppler en tiempo real, la dificultad es aún mayor y hay que relajar los requisitos de resolución, según se muestra en los trabajos de Alabaster y Hughes [17].

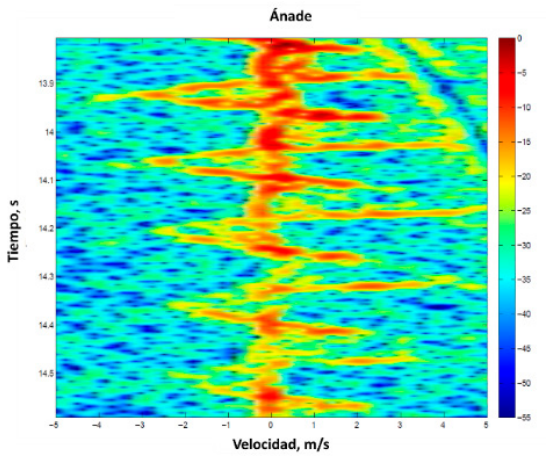


Figura 8. Espectrograma de un pato común en vuelo, alejándose del radar [16].

En el caso estudiado en [16], el efecto micro-Doppler y los espectrogramas para el caso de un pato (*Mallard Duck*) muestran que el 56 % de la potencia del efecto está generada solo por las alas. Otros trabajos como los de Blacksmith y Mack [18] sugieren que los resultados pueden variar sensiblemente en función de la banda utilizada.

Torvik, Olsen y Griffith [19] estudiaron también el comportamiento de pájaros más grandes, como el alcatraz, llevando a cabo observaciones empleando un radar SAR en banda X y polarización vertical desde el Centro de Experimentación del INTA en *El Arenosillo* (Huelva). Como resumen de los resultados de este estudio se tiene que, en banda X, se obtiene con más facilidad un equilibrio entre resolución en tiempo y en frecuencia, una de las mayores dificultades que se había observado empleando el análisis micro-Doppler en banda K. Se probaron además otros algoritmos de procesado con mayor resolución, como la pseudo-transformada de *Wigner-Ville*. Otra de las cuestiones que se confirmaron en estos estudios fue la influencia del ángulo relativo entre el pájaro y el radar, que hace variable la influencia del aleteo en la sección radar obtenida.

En conclusión, se constata la existencia de un problema a la hora de detectar UAV de pequeño y medio tamaño por la posible presencia de ecos debidos a pájaros de tamaño similar o más grandes, y se esboza una posible solución mediante el análisis en tiempo real del efecto micro-Doppler del aleteo de los pájaros, que puede servir para distinguirlos de los UAV.

8. Instalaciones de ensayo en INTA

La figura 9 muestra el campo compacto del INTA que permite la medida de RCS de blancos con dimensiones de 5 x 5 x 6 m y peso de hasta 200 kg.

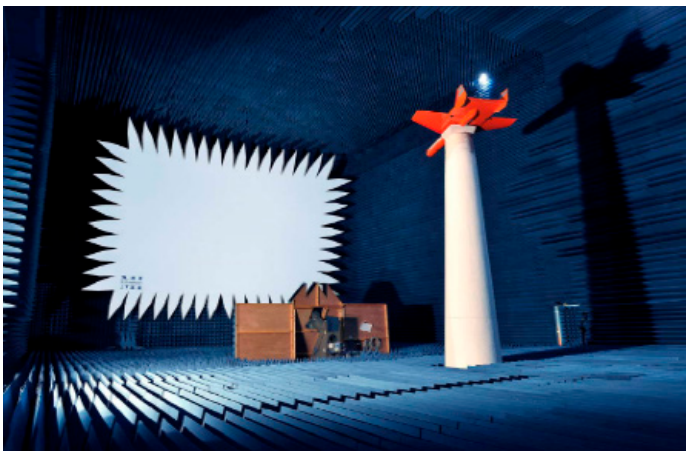


Figura 9. Campo compacto para medidas de RCS (cortesía del INTA).

Aeronaves de dimensiones mayores también se pueden ensayar, pero sin cumplir las condiciones de campo lejano.

9. Parámetros de medida de RCS de UAV del Ejército de Tierra

Los sistemas a ensayar son sustancialmente distintos a los drones comerciales. Se pretende realizar ensayos sobre columna de material transparente en cámara anecoica (figura 9) con los siguientes parámetros de medida: 5 frecuencias a definir repartidas entre banda L, S y X. 5 cortes distintos: Acimut: de 0º a 360º con incremento angular de 0,1º. Elevación (pitch): -5º, 0º y +5º para roll de 0º. Roll: -5º, 0º y +5º para elevación de 0º. Imágenes ISAR: *NoseOn*, *SideOn* y *TailOn* para corte (Pitch, Roll) = (0º, 0º) en banda X. Polarizaciones: VV, HH, VH y HV.

10. Conclusiones

Se ha realizado una revisión de los datos publicados en lo referente a la adquisición de firma radar de UAV de pequeño y mediano tamaño, y a la detección e identificación de este tipo de aeronaves. Estos datos podrán ser usados, además, para definir las metodologías para reducción de la sección transversal radar de los nuevos sistemas. Se ha observado que existe dificultad para distinguir entre la respuesta radar de los UAV y la de los pájaros. El análisis de los datos examinados muestra que hay cierto solapamiento entre la firma radar de ambos blancos y que ese solapamiento puede ser resuelto mediante técnicas tales como el análisis micro-Doppler.

Para finalizar se ha incluido información sobre las instalaciones del INTA dedicadas a la medida de RCS de este tipo de aeronaves y sobre las medidas de firma radar que se están planeando sobre diversos sistemas UAV en España.

Referencias

1. *D. C. Jen, Radar and Laser Cross Section Engineering. AIAA Education Series. 2nd edition. American Institute of Astronautics and Aeronautics. 2005.*
2. *D. R. Wehner, High Resolution Radar. 2nd edition. Artech House, Inc. 1994.*
3. *E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, Radar Cross Section. SciTech Pub. 2004.*

4. *Detection of small drones with millimeter wave radar. Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques. https://www.fhr.fraunhofer.de/en/bussinessunits/security. 2018.*
5. *Herschfelt, A., Birtcher, C.R., Gutierrez, R.M., Rong, Y., Yu, H., Balanis, C.A., Bliss, D.W. Consumer-grade drone radar cross-section and micro-Doppler phenomenology, IEEE Radar Conference, RadarConf 2017. pp. 0981–0985. 2017.*
6. *Guay R. The Dynamic Measurement of an Unmanned Aerial Vehicle Radar Cross Section, Royal military College of Canada. 2016.*
7. *Li, C. J. & Ling, H. An Investigation on the Radar Signatures of Small Consumer Drones. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol.16, 649–652. 2017.*
8. *Pieraccini, M., Miccinesi, L. & Rojhani, N. RCS measurements and ISAR images of small UAVs. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine 32, 28–32. 2017.*
9. *Ritchie, M., Fioranelli, F., Griffiths, H. & Torvik, B. Micro-drone RCS analysis. 2015 IEEE Radar Conference - Proceedings 452–456. Johannesburg. South Africa. 2015.*
10. *Ritchie, M., Fioranelli, F., Borrion, H. & Griffiths, H. Classification of loaded/unloaded micro-drones using multistatic radar. Electronics Letters. Vol 51, 1813–1815. 2015.*
11. *To, L., Bati, A. & Hilliard, D. Radar cross section measurements of small unmanned air vehicle systems in non-cooperative field environments. 3rd European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2009, Proceedings 3637–3641. Berlin. 2009.*
12. *Schroder A, Aulenbacher U, Renker M, Boniger U, Oeschlin, R. Numerical RCS and Micro-Doppler Investigations of a Consumer UAV. Proc.SPIE 9997, Target and Background Signatures II, 99970 24/10/2016.*
13. *R. I. A. Harmanny, J. J. M. De Wit, and G. Prémel Cabic, «Radar micro-Doppler feature extraction using the spectrogram and the cepstrogram,» in European Microwave Week 2014: «Connecting the Future», EuMW 2014 - Conference Proceedings; EuRAD 2014: 11th European Radar Conference. 2014.*
14. *hi, W. et al. Detecting, Tracking, and Identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence. Sensor Fusion - Foundation and Applications Ed. Ciza Thomas, IntechOpen 139–158. 2011. https://www.intechopen.com/books/sensor-fusion-foundation-and-applications/detecting-tracking-and-identifying-airborne-threats-with-netted-sensor-fence*
15. *B. Torvik, K. E. Olsen, and H. Griffiths, Classification of Birds and UAVs Based on Radar Polarimetry, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2016.*
16. *B. Torvik, K. E. Olsen and H. Griffiths, K-band radar signature analysis of a flying mallard duck,* 2013 14th International Radar Symposium (IRS)*, vol. 2 pp. 584-591. Dresden. 2013.*
17. *C. M. Alabaster, E. J. Hughes, and D. W. Forman. Is it a bird or is it a plane? in 2012 International Waveform Diversity and Design Conference, WDD 2012. 2012.*
18. *P. Blacksmith and R. B. Mack, On Measuring the Radar Cross Sections of Ducks and Chickens, Proc. IEEE, vol 53, no. 8, p. 1125. 1965.*
19. *B. Torvik, K. E. Olsen, and H. D. Griffiths, X-band measurements of radar signatures of large sea birds, in 2014 International Radar Conference, Radar 2014. 2014.*

Nuevo concepto de radares pasivos multiestáticos basados en LTE-R para vigilancia de líneas ferroviarias de alta velocidad

Blázquez García, Rodrigo[1,2,*], Casamayón Antón, Jorge[2] y Burgos García, Mateo[1,2]

[1] Observatorio Horizontes en Defensa y Seguridad ISDEFE-UPM. Av. Complutense, 30. 28040 Madrid.

[2] Grupo de Microondas y Radar. Universidad Politécnica de Madrid. Av. Complutense, 30. 28040 Madrid. Correos electrónicos: rodrigo.blazquez@upm.es (RBG), jcasamayon@gmr.ssr.upm.es (JCA), mateo@gmr.ssr.upm.es (MBG).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: rodrigo.blazquez@upm.es (RBG).

Resumen

Entre las diferentes líneas de trabajo del observatorio Horizontes en Defensa y Seguridad ISDEFE-UPM se encuentra el análisis de tecnologías emergentes que puedan hacer frente a las nuevas amenazas basadas en el uso de drones. Una de las infraestructuras críticas que debe protegerse frente al uso malintencionado o negligente de drones son las redes ferroviarias de alta velocidad. Sin embargo, no existe actualmente una solución eficiente de vigilancia de medio alcance para este tipo de escenarios, ya que el empleo de radares convencionales supone un coste excesivamente elevado. En esta comunicación, se propone un sistema radar pasivo multiestático basado en el uso de las señales del enlace descendente del sistema de comunicaciones *Long-Term Evolution-Railway* (LTE-R), cuyo despliegue se extenderá previsiblemente a gran parte de la red ferroviaria de alta velocidad en los próximos años. Los múltiples nodos receptores de este sistema radar distribuido pueden implementarse utilizando dispositivos comerciales de radio definida por *software* (SDR), disminuyendo considerablemente su coste. Además, este sistema no requiere asignación de frecuencias, no interfiere con otros sistemas de comunicaciones, no puede ser interceptado por equipos de guerra electrónica y es fácilmente escalable. Tras presentar la arquitectura *hardware* y el procesado de señal y datos que permite la detección y seguimiento de blancos, se analiza la viabilidad técnica de este sistema en base a la función de ambigüedad de las señales LTE-R y al alcance de detección para drones de pequeño tamaño, que se estima en 4 km para drones de 0,1 m^2 de sección radar.

Palabras clave

Alta velocidad, anti-UAV, LTE-R, radar pasivo, SDR, vigilancia.

1. Introducción

En los últimos años, se ha puesto de manifiesto la necesidad de desarrollar nuevas soluciones de vigilancia perimetral para infraestructuras críticas que hagan frente al uso malintencionado o negligente de drones. Una de las soluciones más eficientes para la detección de drones que se aproximan a infraestructuras críticas aisladas, como centrales nucleares, es el uso de radares activos de alcance medio integrados, a su vez, con sensores ópticos, para la clasificación de la amenaza, y con equipos de *jamming*, para su neutralización [1]. Sin embargo, estos sistemas no son adecuados para vigilar áreas extensas, como el trazado de las vías de trenes de alta velocidad, ya que el despliegue de múltiples equipos a lo largo de las vías supondría un coste excesivo.

Por su parte, los sistemas actuales de vigilancia perimetral de las vías ferroviarias tampoco son apropiados para detectar amenazas aéreas basadas en drones. Estos sistemas están compuestos principalmente por la sensorización del vallado [2], para detectar impactos y saltos sobre la valla, y por cámaras de vigilancia, que presentan un tiempo de refresco de información excesivamente alto para detectar con un alcance adecuado la intrusión de drones en un cierto volumen de seguridad alrededor de la vía [1]. Por tanto, no existe actualmente un sistema eficaz para hacer frente a posibles ataques terroristas basados en el uso de drones, que puedan comprometer la seguridad de los usuarios de los trenes de alta velocidad.

Para solventar estas nuevas necesidades de vigilancia, en esta comunicación, se propone un sistema radar pasivo multiestático y escalable basado en el uso de las señales del enlace descendente del sistema de comunicaciones *Long-Term Evolution-Railway* (LTE-R) como iluminación de oportunidad.

Aunque el sistema de comunicaciones más extendido actualmente en las redes ferroviarias de alta velocidad es el *Global System for Mobile communication-Railway* (GSM-R), dadas sus limitadas capacidades y el impulso que están recibiendo las tecnologías 5G, se prevé que el sistema LTE-R se despliegue en gran parte de la red ferroviaria durante los próximos años. El sistema LTE-R, cuyos principales parámetros se resumen en la tabla 1, permitirá proveer servicios avanzados de comunicación en los escenarios de trenes de alta velocidad de acuerdo con los siguientes requisitos: alta movilidad (hasta 500 km/h), transmisión de banda ancha para vídeo en tiempo real, baja latencia (inferior a 500 ms), alta fiabilidad, disponibilidad y calidad de servicio, y compatibilidad con los sistemas de comunicaciones LTE y GSM-R [3].

Tabla 4. Parámetros del sistema LTE-R

Parámetro	**Valor**
Bandas de frecuencia	700 MHz, 800 MHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz
Ancho de banda de canal	1,4 – 20 MHz
Modulación	OFDM (subportadoras: QPSK/16-QAM)
Longitud de celda	4 – 12 km
Máxima velocidad de datos	50/10 Mbps (enlace descendente/ascendente)

Los nodos receptores del sistema radar pasivo propuesto, cuyo esquema se representa en la figura 1, pueden implementarse utilizando radios definidas por *software* (SDR) comerciales, reduciendo el coste del sistema. Las reflexiones producidas en los blancos de las señales de LTE-R transmitidas por las estaciones base son recibidas por las SDR donde puede llevarse a cabo un procesado distribuido. Los resultados obtenidos en cada nodo receptor son transmitidos a través de enlaces de datos a una unidad de procesamiento central donde se lleva a cabo la fusión de los datos para realizar la detección y el seguimiento de los blancos presentes en el escenario.

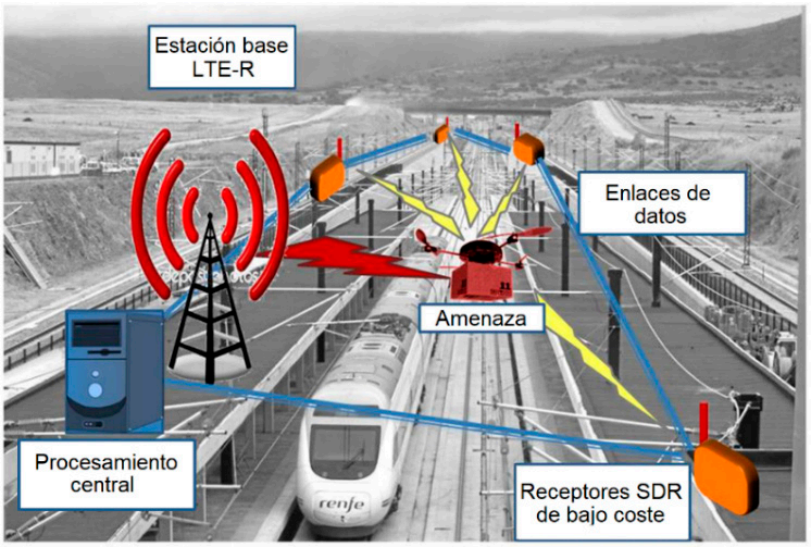


Figura 1. Esquema propuesto del sistema radar pasivo multiestático basado en LTE-R.

En comparación con los radares activos, los radares pasivos no requieren asignación de frecuencias, lo que representa una ventaja importante dada la alta congestión actual del espectro radioeléctrico. Además, no interfieren con otros sistemas de comunicaciones y no pueden ser interceptados por equipos de guerra electrónica. Estas ventajas han motivado el desarrollo de radares pasivos basados en diferentes iluminadores de oportunidad, tanto analógicos [4] como digitales (*Digital Video Broadcasting-Terrestrial* [5], WiFi [6], GSM-R [7], etc.), para aplicaciones de seguridad. Sin embargo, la novedad del sistema propuesto es el uso de señales LTE-R para implementar un sistema radar pasivo multiestático, escalable y de bajo coste que pueda proveer servicios de vigilancia perimetral de las vías de tren de alta velocidad. Además, este sistema puede servir de apoyo a la monitorización del tráfico de la red ferroviaria para optimizar el uso de la infraestructura.

A continuación, se presenta la arquitectura *hardware* del sistema y el procesado de señal y datos que permite la detección y seguimiento de blancos. Además, se analiza la viabilidad técnica del sistema propuesto en términos de la función de ambigüedad de las señales LTE-R y del alcance de detección para drones de pequeño tamaño, personas y coches.

2. Arquitectura y procesado del sistema radar pasivo basado en LTE-R

2.1. Arquitectura hardware

La arquitectura básica del sistema propuesto, compuesto por dos transmisores de oportunidad LTE-R (eNodeB) y dos nodos receptores, se representa en la figura 2a, teniendo en cuenta las características típicas del despliegue de las estaciones base de LTE-R. Se considera una arquitectura multiestática para mejorar las capacidades de detección y localización de los blancos gracias a la diversidad espacial y a las técnicas de multilateración, respectivamente [6,8]. Además, esta arquitectura puede ser escalada

incrementando el número de nodos receptores a lo largo de la vía para extender el área cubierta por el sistema de vigilancia y mejorar sus capacidades.

Los nodos receptores se basan en equipos SRD comerciales con cuatro canales coherentes en recepción, de forma que se puedan aplicar técnicas de *beamforming* digital para recibir las señales de referencia transmitidas por cada estación base LTE-R y las señales de vigilancia a partir de las cuales se detectan los blancos presentes en el escenario. Los cuatro elementos de antena conforman un *array* lineal uniforme (ULA) con una separación entre elementos (12,5 cm para la banda LTE-R en 800 MHz). Cada elemento del *array* presenta una ganancia de 3 dBi y un diagrama de radiación omnidireccional.

Como se muestra en la figura 2b, los módulos SDR se componen de los frontales de radiofrecuencia (RF), las etapas de frecuencia intermedia (IF), los conversores analógico-digital (ADC) y una FPGA (*field-programmable gate array*), donde se lleva a cabo el procesado de señal que permite obtener las detecciones de los blancos. La FPGA se conecta a través de *Peripheral Component Interconnect Express* (PCIe) a un ordenador, que controla la SDR y realiza el procesado de datos distribuido a partir de los *plots* obtenidos por el procesado de señal. Finalmente, el ordenador transmite los datos a una unidad de procesamiento central donde se lleva a cabo la fusión de datos centralizada. Además, la unidad central transmite señales de sincronización a los nodos receptores.

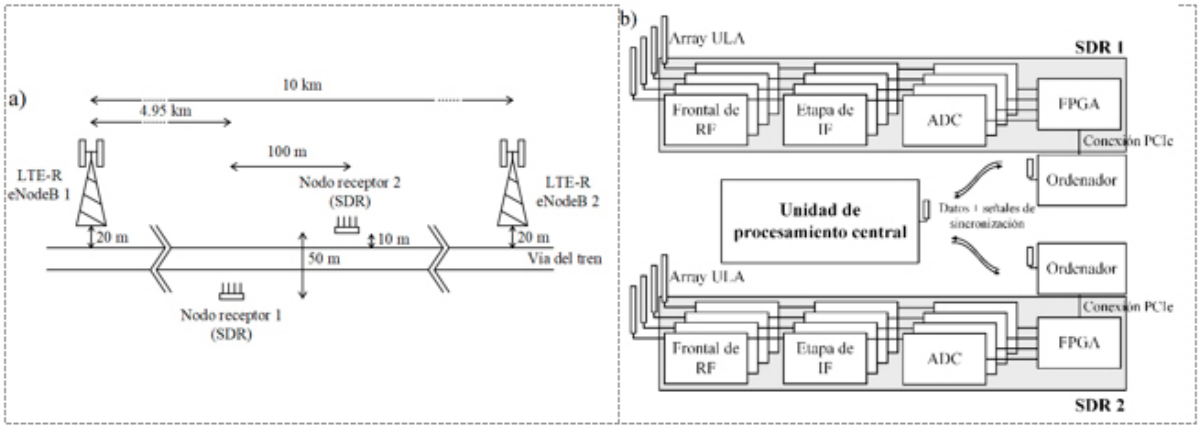


Figura 2. Sistema radar pasivo multiestático: a) geometría del sistema y b) arquitectura hardware del sistema compuesto por dos nodos SDR receptores y una unidad de procesamiento central.

2.2. Procesado de señal y fusión de datos multiestáticos

El diagrama de bloques del procesado de señal implementado en cada nodo receptor se representa en la figura 3a. En primer lugar, se aplica un *beamforming* digital para obtener las dos señales de referencia, transmitidas por los dos iluminadores de oportunidad (estaciones base de LTE-R), y varios canales de vigilancia en diferentes direcciones. Para ello, se sintetizan simultáneamente diversos haces de antena que presentan distintas posiciones de sus nulos y lóbulos principales. Como se muestra en la figura 3b, un haz de referencia es apuntado a cada estación base de LTE-R con un nulo en la dirección del otro transmisor, mientras que los haces de vigilancia se solapan y presentan un nulo en la dirección de su transmisor de oportunidad asociado con el objetivo de minimizar la interferencia por rayo directo, que podría enmascarar las reflexiones producidas en los blancos e impedir su detección. A partir de las señales recibidas por los dos haces de referencia, se reconstruyen las señales LTE-R transmitidas teniendo en cuenta las especificaciones de la capa física del estándar de comunicaciones. Esta estrategia permite evitar el uso de dos canales dedicados en recepción para obtener las señales de referencia transmitidas por las estaciones base.

Teniendo en cuenta el despliegue celular del sistema LTE-R, en el que dos estaciones base adyacentes utilizan distintos canales de frecuencia, la interferencia entre las dos señales de referencia es reducida. De esta forma, las reflexiones producidas en los blancos de las señales transmitidas por las dos estacio-

nes base pueden separarse en cada nodo receptor mediante una correlación cruzada entre cada señal de referencia y las señales de vigilancia, tras aplicar sobre dichos canales de vigilancia procesados de cancelación del rayo directo para evitar que dicha interferencia oculte las reflexiones de los blancos débiles. Posteriormente, un detector *Constant False Alarm Rate* (CFAR) [9] y el extractor de *plots* permiten obtener las estimaciones de distancia biestática, velocidad biestática y acimut de los blancos detectados a partir de los picos de las funciones de correlación cruzada.

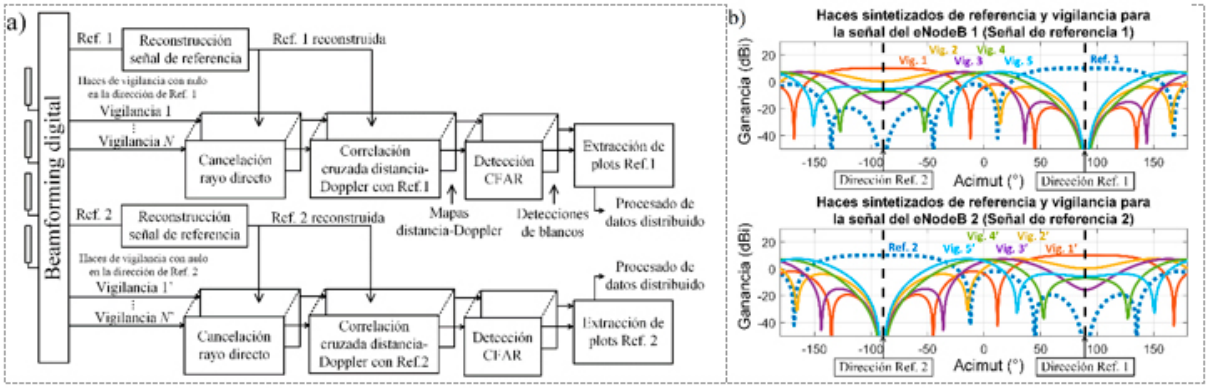


Figura 3. a) Diagrama de bloques del procesado de señal y b) haces sintetizados de referencia (líneas punteadas) y vigilancia (líneas sólidas) en el nodo del receptor 1 para los dos eNodeB de LTE-R.

En relación con el procesado y fusión de datos, se implementa un algoritmo de seguimiento dividido en dos niveles (nivel de sensor y nivel global) [10]. En esta estrategia, se lleva a cabo un primer seguimiento distribuido para cada par transmisor-receptor usando los *plots* extraídos por el procesado de señal y un segundo seguimiento centralizado en coordenadas cartesianas tras la asociación y multilateración de los datos de salida obtenidos de los múltiples pares. La asociación de datos se basa en un procesado de abajo a arriba (*bottom up processing*) [11] en el cual se considera un conjunto finito de posibles posiciones de los blancos en forma de rejilla dentro del área de interés y las posiciones de los blancos detectados se localizan en los mínimos locales de una función de error calculada para cada punto de la rejilla. Esta función de error viene dada por la suma cuadrática de las distancias entre el punto considerado de la rejilla y el *plot* más cercano de cada par transmisor-receptor. Esta técnica permite reducir la tasa global de falsas alarmas del sistema y evitar ambigüedades y blancos fantasma.

3. Análisis de la viabilidad técnica

3.1. Análisis de la función de ambigüedad de señales LTE-R

Las mejores resoluciones en distancia y frecuencia Doppler alcanzables por cada nodo receptor del sistema multiestático pueden evaluarse a partir de la función de ambigüedad de las señales de referencia del enlace descendente del sistema LTE-R, que representa la salida del filtro adaptado. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las resoluciones realmente obtenidas en distancia y frecuencia Doppler dependen de la geometría biestática entre el blanco y cada par transmisor-receptor [12].

La función de ambigüedad distancia-Doppler, , de una señal de oportunidad viene dada por:

$$\chi(\tau, f_d) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s^*(t-\tau) \cdot e^{-j2\pi f_d t} \cdot dt \right|^2 \quad (1)$$

donde τ es retardo temporal, relacionado con la distancia biestática, y f_d la frecuencia Doppler.

La figura 4 representa los cortes para Doppler cero y distancia cero de la función de ambigüedad de una señal LTE-R simulada con 10 MHz de ancho de banda y prefijo cíclico normal utilizando un tiempo de procesado coherente (*coherent processing interval*, CPI) de 10 ms.

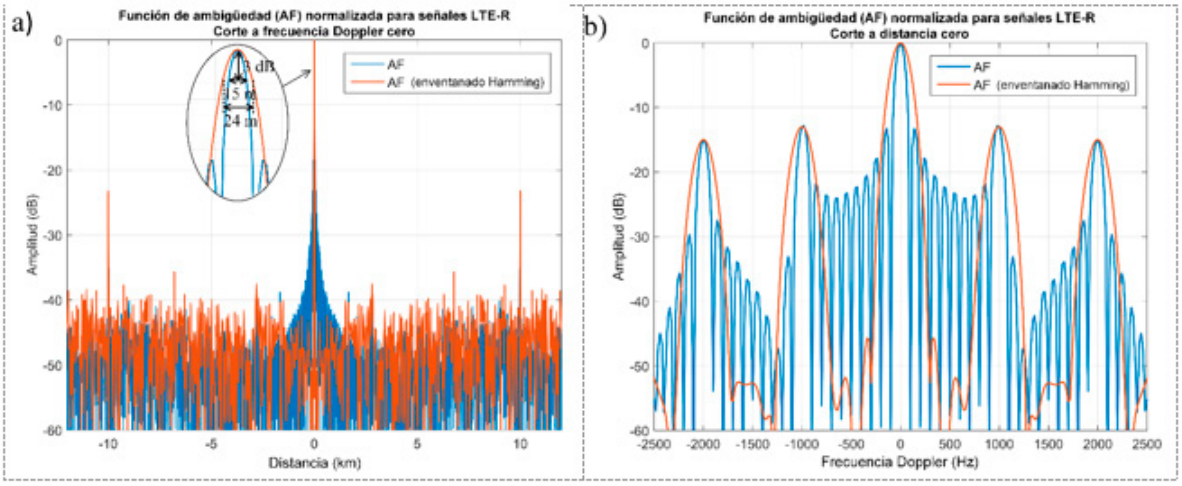


Figura 4. Función de ambigüedad de señales LTE-R de 10 MHz de ancho de banda y prefijo cíclico normal para CPI 10 m: a) corte para frecuencia Doppler cero y b) corte para distancia cero.

Como puede observarse a partir del corte para Doppler cero de la función de ambigüedad, la resolución en distancia para la señal LTE-R sin ponderar es de aproximadamente 15 m, en concordancia con su ancho de banda de 10 MHz. Sin embargo, dado el alto nivel de lóbulos secundarios, es conveniente aplicar técnicas de reducción de lóbulos secundarios, como un enventanado de Hamming en el dominio de la frecuencia. De esta forma, se consigue un nivel de lóbulos secundarios de -40 dB a costa de disminuir la resolución a 24 m. Además, aparece una ambigüedad en distancia a 10 km debido al prefijo cíclico empleado en la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*). Esta ambigüedad se relaciona con el tiempo útil de símbolo de la capa física de LTE-R () y presenta un nivel que viene dado por el cociente entre el tiempo medio del prefijo cíclico (para el prefijo cíclico normal) y el tiempo útil de símbolo (nivel de la ambigüedad =). En el sistema radar pasivo propuesto, el alcance instrumental considerado es inferior a 10 km, por lo que dicha ambigüedad no compromete el funcionamiento del sistema. Sin embargo, para otras aplicaciones que utilicen señales LTE-R como iluminación de oportunidad, puede ser necesario implementar técnicas de supresión del prefijo cíclico para eliminar esta ambigüedad.

Respecto a la resolución en frecuencia Doppler, usando un CPI de 10 ms, el corte de la función de ambigüedad para distancia cero presenta un ancho del lóbulo principal a -3 dB de 90 Hz para la señal sin ponderar y de 170 Hz para la señal con enventanado de Hamming en el dominio del tiempo. Estos resultados, para la banda de LTE-R a 800 MHz, corresponden a resoluciones en velocidad de 33,75 m/s y de 63,75 m/s, respectivamente. Esta escasa resolución en velocidad puede mejorarse incrementando el CPI, lo que también permite aumentar la relación señal a ruido (SNR) de los blancos y, por tanto, el máximo alcance de detección del sistema, siempre y cuando se mantenga la coherencia en la respuesta del blanco durante el tiempo de integración. Por ello, se propone utilizar un CPI de 250 ms, que permite obtener una resolución en velocidad biestática de 10 km/h aplicando un enventanado de Hamming.

En el corte de la función de ambigüedad para distancia cero, también se observan ambigüedades en múltiplos de 1.000 Hz de la frecuencia Doppler debido a la estructura pulsada de las señales LTE-R, que se dividen en subtramas de 1 ms [13]. Sin embargo, estas ambigüedades no son significativas para el sistema propuesto porque corresponden a múltiplos de 1.350 km/h de la velocidad biestática.

Por tanto, teniendo en cuenta las resoluciones obtenidas en distancia y velocidad y el nivel de lóbulos secundarios de su función de ambigüedad, puede concluirse que las señales LTE-R son adecuadas como iluminación de oportunidad para radares pasivos.

3.2. Estimación del alcance de detección

Con el objetivo de demostrar la viabilidad técnica del sistema de vigilancia propuesto en base al máximo alcance de detección limitado por ruido térmico, la figura 5a representa la estimación del área cubierta

por el sistema considerando distintos tipos de blancos. La tabla 2 muestra los parámetros de la simulación, en la que se ha considerado una probabilidad de detección (P_d) objetivo del 90 % en al menos uno de los pares transmisor-receptor para una probabilidad de falsa alarma (P_{fa}) de 10^{-5}. Además, se asume que las antenas de las estaciones base LTE-R (eNodeB) presentan un diagrama de radiación con un haz principal de 30º de ancho apuntado sobre la vía hacia los receptores.

La figura 5b representa la relación señal a ruido de un dron pequeño de 0,1 m^2 de sección radar para el nodo receptor 1 utilizando cada señal de referencia. Como el haz de referencia no se utiliza como haz de vigilancia, para limitar la interferencia por rayo directo, se producen zonas ciegas en cada par transmisor-receptor, que no aparecen al considerar las medidas de todos los pares transmisor-receptor, obteniéndose un alcance de detección de 4 km para drones pequeños de 0,1 m^2 de sección radar.

Tabla 5. Parámetros usados para la estimación del área cubierta por el sistema

Parámetro	**Valor**
Potencia transmitida	40 W
Ganancia de la antena transmisora	14 dB
Ganancia de la antena receptora	Haces sintetizados
Banda de frecuencia	800 MHz
CPI	250 ms
Figura de ruido de los receptores	5 dB
Pérdidas del sistema y margen de seguridad	5 dB
SNR_{min} para blanco tipo Swerling 1, P_d = 90% y P_{fa} = 10-5	20,5 dB

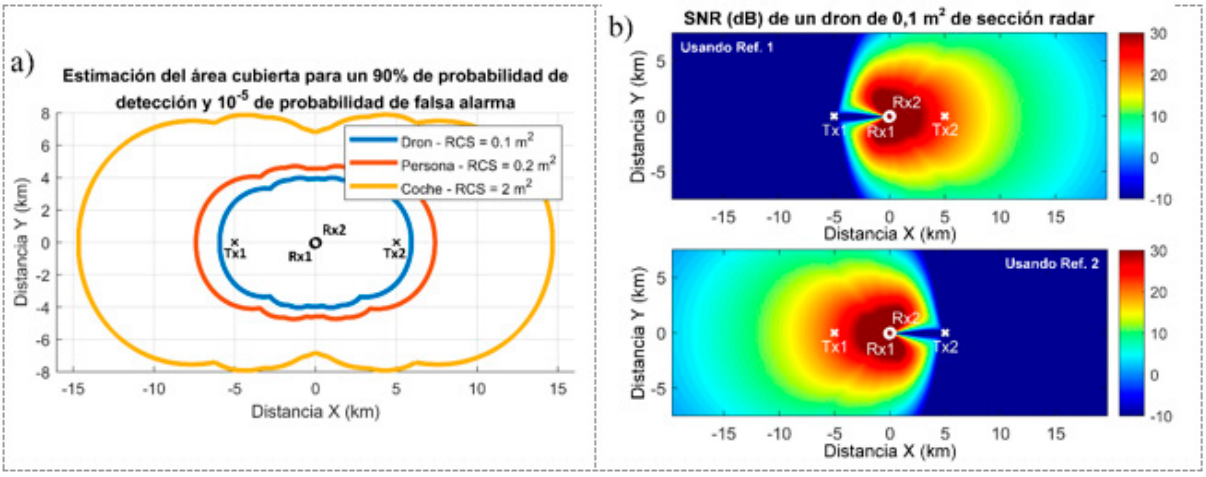


Figura 5. Estimación del alcance de detección: a) estimación del área cubierta para la detección de drones pequeños, personas y coches y b) SNR de un dron pequeño para el nodo receptor 1 utilizando la señal de referencia del eNodeB 1 (arriba) y la señal de referencia del eNodeB 2 (abajo).

4. Conclusiones

En esta comunicación, se ha propuesto un nuevo concepto de radares pasivos multiestáticos basados en LTE-R para llevar a cabo la vigilancia perimetral de las vías ferroviarias de alta velocidad. Este sistema escalable puede implementarse haciendo uso de equipos SDR comerciales para disminuir su coste. Además, se ha demostrado la viabilidad técnica del sistema en base al análisis de la función de ambigüedad de las señales LTE-R como iluminación de oportunidad y al alcance de detección obtenido para coches, personas y drones de pequeño tamaño. La función de ambigüedad de las señales LTE-R muestra buenas

propiedades en términos de resolución en distancia y frecuencia Doppler, nivel de lóbulos secundarios y ambigüedades. Además, la estimación del área cubierta por el sistema multiestático compuesto por dos iluminadores de oportunidad LTE-R y dos nodos SDR receptores muestra capacidades de detección prometedoras para hacer frente a las nuevas amenazas basadas en drones y llevar a cabo la vigilancia perimetral de las redes ferroviarias de alta velocidad.

Referencias

1. *Barbero Rodríguez A., Blázquez García R., Fernández Cruza A., Insua Feito M., Burgos García M. Análisis de viabilidad de despliegues antri-dron basados en tecnologías de última generación. V Congreso Nacional I+D en Defensa y Seguridad; Toledo, España; 2017.*
2. *Indra Sistemas, S. A. Protección Perimetral: Vallado [Internet]. [cited 2018 Ago 02]. Available from: https://www.indracompany.com/es/proteccion-perimetral-vallado*
3. *He R., Ai B., Wang G., Guan K., Zhong Z., Molisch A., Briso-Rodriguez C., Oestges C. P. High-speed railway communications: from GSM-R to LTE-R. IEEE Vehicular Technology Magazine. 2016; 11(3):49-58.*
4. *Colone F., Bongioanni C., Lombardo P. Multifrequency integration in FM radio-based passive bistatic radar. Part II: Direction of arrival estimation. IEEE Aerospace and Electronic System Magazine. 2013; 28(4): 40-47.*
5. *Liu Y., Wan X., Tang H. Yi J., Cheng Y., Zhang X. Digital television based passive bistatic radar system for drone detection. 2017 IEEE Radar Conference; Seattle, EE. UU.; 2017.*
6. *Colone F., Falcone P., Bongioanni C., Lobardo P. WiFi-based passive bistatic radar: Data processing schemes and experimental results. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2012; 48(2):1061-1079.*
7. *Chetty K., Chen Q., Woodbridge C. Train monitoring using GSM-R based passive bistatic radar. 2016 Radar Conference; Philadelphia, EE. UU; 2016.*
8. *Griffiths H. D., Baker C. J. Passive coherent location radar systems. Part 1: performance prediction. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation. 2005; 152(3):153-159.*
9. *Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1983; 19(4):608-621.*
10. *León Infante F., González-Partida J. T., Blázquez-García R., Burgos-García M. Processing chain of a radar network for safety improvement in the usage of heavy machinery. 2015 European Radar Conference (EuRAD); París, Francia; 2015.*
11. *Fölster F., Rohling H. Data association and tracking for automotive radar networks. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2005; 6(4):370-377.*
12. *Baker C. J., Griffiths H. D., Papoutsis I. Passive coherent location radar systems. Part 2: waveform properties. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation. 2005; 152(3):160-168.*
13. *Colone F., Woodbridge K., Guo H., Mason D., Baker C. J. Ambiguitt function analysis of wireless LAN transmission for passive radar. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2011; 47(1):240-264.*

Validación de radares pasivos basados en la TDT para la detección de drones

del Rey Maestre, Nerea[1]*; Gómez del Hoyo, Pedro José; Rosado Sanz, Javier; de la Mata Moya, David; Jarabo Amores, María Pilar y Gaitán Cabañas, Francisco Javier

[1] Dpto de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá. 28805, Alcalá de Henares, Madrid, España. Email: nerea.rey@uah.es (NRM), pedrojose.gomez@uah.es (PJGH), javier.rosado@uah.es (JRS), david.mata@uah.es (DMM), mpilar.jarabo@uah.es (MPJA), francisco.gaitan@uah.es (FJGC).

* Autor principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: nerea.rey@uah.es (NRM).

Resumen

Los drones son una amenaza creciente en infraestructuras críticas y entornos urbanos debido a su facilidad para transportar explosivos, productos químicos, agentes biológicos, o cámaras. Los radares pasivos (RP) son tecnologías emergentes que utilizan iluminadores de oportunidad (IO) en lugar de un transmisor dedicado, por lo que son buenos candidatos para la detección de amenazas en diferentes escenarios. En este artículo se estudia la viabilidad de los RP que utilizan la señal de la TDT como IO para la detección de drones. Se han analizado datos radar reales adquiridos en las instalaciones del Instituto Tecnológico La Marañosa por el demostrador RP IDEPAR, desarrollado en la Universidad de Alcalá. En un primer ejercicio se ha considerado una antena directiva en el canal de vigilancia. Posteriormente, se ha utilizado un *array* de cinco elementos para dotar de discriminación angular al sistema. Los resultados muestran que los RP basados en la TDT presentan unas buenas prestaciones para la detección de drones de pequeño tamaño, mediante la estimación de las probabilidades de detección y falsa alarma.

Palabras clave

Radar pasivo, TDT, drones, UAV.

1. Introducción

En la actualidad, están surgiendo nuevas amenazas de bajo coste y pequeño tamaño como son los vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles*, UAV). Los drones se caracterizan por su tamaño reducido, alta versatilidad y su elevada popularidad tanto en el entorno militar como en el civil. Estas plataformas pueden ser utilizadas para el espionaje industrial o gubernamental, o para el transporte de explosivos, componentes químicos y/o agentes biológicos; siendo considerados una amenaza creciente. Por ello, la detección de drones es un reto de gran interés en el diseño de nuevos sistemas de defensa y la protección de infraestructuras críticas en entornos rurales y urbanos.

Un radar pasivo (RP) tiene como objetivo principal la detección de blancos y la estimación de parámetros tales como la posición o la velocidad, a partir de la energía dispersada por los mismos en la dirección del receptor radar. Este tipo de radares utilizan sistemas de comunicación o radionavegación como iluminadores de oportunidad (IO) en lugar de un transmisor dedicado [1-3]. Presentan numerosas ventajas frente a los radares activos: bajo coste de implementación, desarrollo y mantenimiento, debido a que no requieren de un transmisor propio y la posibilidad de usar componentes COTS; bajo consumo, no necesidad de asignación de frecuencias, baja probabilidad de interceptación, y fácil transporte y despliegue [4]. Debido a la ausencia de control sobre el transmisor, se requiere una recepción multicanal compuesta por un canal de referencia encargado de adquirir la señal transmitida por el iluminador, y un canal de vigilancia que captura los ecos de los blancos; tal y como se muestra en el esquema general representado en la figura 1, (donde R_T es la distancia blanco-transmisor, R_R es la distancia blanco-receptor, L es la distancia transmisor-receptor o línea base, y σ_{bis} corresponde con la sección recta radar biestática de cada blanco).

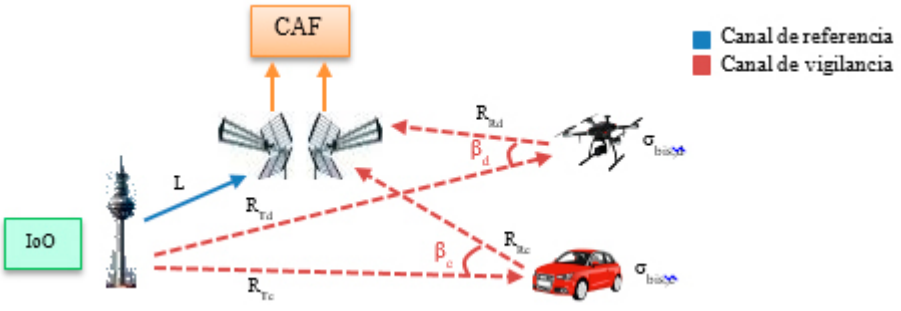


Figura 1. Geometría básica de un RP biestático que utiliza la señal de TDT para la detección de drones y vehículos terrestres.

En este artículo se presenta la validación de los radares pasivos que utilizan la señal de la TDT como IO para la detección de drones de pequeño tamaño. Para ello, se han analizado datos reales adquiridos en las instalaciones del Instituto Tecnológico La Marañosa, ITM (San Martín de la Vega, Madrid) por el demostrador pasivo IDEPAR [5], desarrollado por el grupo de investigación en tecnologías de alta frecuencia de la Universidad de Alcalá. Las campañas de medidas se realizaron en paralelo con las pruebas de evaluación operativas del Proyecto CONDOR, promovido por la Dirección General de Armamento y Material del

Ministerio de Defensa (DGAM), en el marco del convenio de colaboración entre el Ministerio de Defensa y la Universidad de Alcalá. El demostrador está basado en dispositivos USRP (*Universal Software Radio Peripherals*) de *National Instruments*, que le dotan de gran versatilidad y capacidad de adaptación a los IO disponibles en los emplazamientos elegidos. La campaña de medidas ha sido llevada a cabo con el objetivo de detectar un dron DJI Phantom 4 mediante dos configuraciones de la cadena receptora. En un primer ejercicio se ha utilizado una antena directiva en vigilancia, que limita la cobertura y discriminación angular del sistema a cambio de proporcionar una elevada ganancia. En un segundo experimento y con el objetivo de mejorar la cobertura angular, dotar de discriminación angular al sistema y permitir detectar en un espacio 3D (distancia, Doppler, acimut) se ha sustituido la antena de vigilancia por un array de cinco elementos, con cadenas de RF y sistemas de adquisición independientes, y se han aplicado técnicas digitales de procesado en *array*. Los resultados muestran la capacidad de los sistemas radar pasivos basados en la TDT para la detección de UAV de pequeño tamaño con prestaciones de interés práctico.

2. Fundamentos teóricos de los radares pasivos

El principio de funcionamiento de los RP se basa en el procesado coherente de la señal que proviene del IO (capturada por el canal de referencia) y los ecos generados por los objetos que han sido iluminados por dicho IO (capturados por el canal de vigilancia), generando así la función de ambigüedad cruzada (*Cross Ambiguity Function*, CAF) o los mapas rango-Doppler (RD), que, junto a la información relativa a la geometría del sistema y del transmisor, posibilitarán la detección del blanco y la estimación de su posición y velocidad [2][6]. El tiempo de adquisición (T_{adq}) se divide en intervalos coherentes de procesado (*Coherent Processing Intervals*, CPI) de duración T_{int}. Para cada CPI se genera una CAF correlando el canal de vigilancia con copias desplazadas en frecuencia de la señal de referencia, tal y como se expresa en (1), donde s_{ref} y s_{sruv} son las señales de referencia y vigilancia, respectivamente; $N=T_{int}\cdot f_s$ es el número de muestras, f_s(Hz) es la frecuencia de muestreo, m representa el instante de tiempo asociado a un retardo $\tau_m=m/f_s$, y p es la frecuencia Doppler correspondiente a $f_{dop}=f_s(p/N)$.

$$S^{CAF}[m,p]=\sum_{n=0}^{N-1} s_{ref}^{*}[n-m]\cdot s_{surv}[n]\cdot e^{-j2\pi\frac{p}{N}n} \quad (1)$$

Además de los blancos deseados, en las señales adquiridas por el radar pasivo, se encuentran contribuciones no deseadas debidas al clutter, al *Direct Path Interference* o DPI (definido como la interferencia producida por la señal de referencia al ser recibida directamente por el canal de vigilancia) o el multitrayecto. Cuando se trabaja con RP e IO estáticos, estas contribuciones se concentran a lo largo de la línea de cero Doppler de la CAF, reduciendo las prestaciones para la detección de blancos con bajos Doppler. Con el objetivo de reducir sus efectos, una de las técnicas más utilizadas es el algoritmo *Extensive Cancellation Algorithm* (ECA) [7][8].

3. Caso de estudio. Demostrador pasivo IDEPAR

Los datos radar reales analizados en este artículo han sido adquiridos por el demostrador IDEPAR desarrollado en la Universidad de Alcalá [5]. IDEPAR es un demostrador RP tecnológico que utiliza la señal de la TV digital terrestre como IO (en la banda UHF, *Ultra High Frequency*) y realizar tareas de monitorización de tráfico terrestre, aéreo y marítimo.

El sistema está formado por componentes COTS que facilitan la implementación y el mantenimiento del sistema. La cadena de recepción está compuesta por una etapa de RF, sistemas de adquisición USRP de *National Instruments* y un sistema de sincronismo externo de alta precisión para la generación de la señal de reloj común a las tarjetas de adquisición. Las plataformas USRP seleccionadas permiten una frecuencia máxima de muestreo de las señales I/Q de 25 MHz para una resolución de 14 bits por muestra, y una frecuencia central variable entre 50 MHz y 2,2 GHz. Atendiendo a estas características, el demostrador se ha diseñado para trabajar con un ancho de banda de señal AB_s = 24 MHz, incrementando así la resolución del sistema al poder adquirir tres canales consecutivos de la TDT. Los algoritmos necesarios para la realización de las tareas de detección y seguimiento se han implementado sobre una

estación de trabajo de alto rendimiento [5]. En la actualidad, el procesado de señal es *off-line*, con el fin de permitir la fácil integración de mejoras en los algoritmos y su validación con datos reales brutos.

IDEPAR utiliza antenas comerciales tanto en el canal de referencia como en el de vigilancia. Para el canal de referencia se ha hecho uso de la antena directiva Televés DAT 75 HD BOSS que se caracteriza por tener una elevada ganancia (17dB), un alto ratio *front-to-back*, un ancho de haz de 24º y un gran tamaño. En el canal de vigilancia se han establecido dos configuraciones:

1) *Primera configuración (figura 2a):* una antena Televés DAT 75 HD BOSS como la utilizada en el canal de referencia. Sus características la hacen adecuada para la detección de blancos en dos dimensiones (distancia, Doppler).
2) *Segunda configuración (figura 2b): array* de antenas formado por cinco elementos individuales Televés 4G-Nova, con dispositivos USRP independientes para cada uno. La antena presenta un ancho de haz de 59,94º; una ganancia de 6,9 dB y un tamaño muy reducido. Mediante esta configuración se mejora la cobertura angular, se dota de discriminación angular al sistema y se permite detectar en un espacio 3D (distancia, Doppler, acimut).

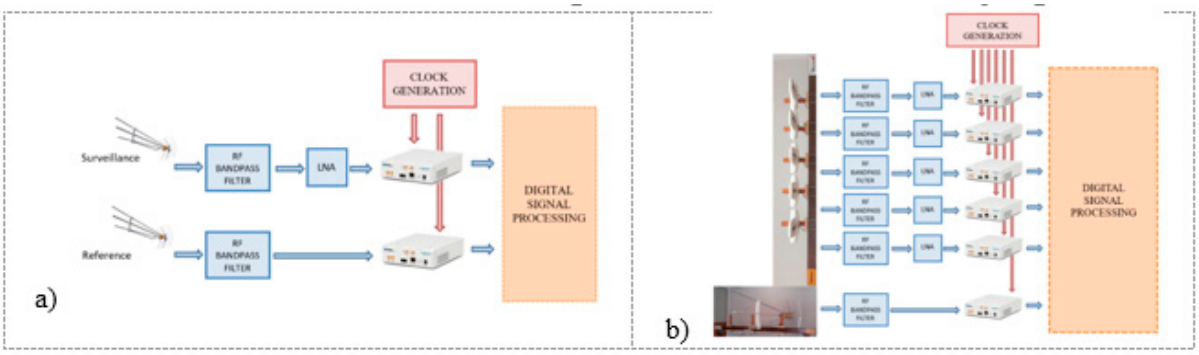


Figura 2. Diagrama de bloques funcional del demostrador IDEPAR. a) Cadena receptora formada por una antena de vigilancia. b) Cadena receptora formada por un array de 5 antenas.

3.1. Escenario radar

Para validar las prestaciones de los RP para la detección de drones, se ha seleccionado un entorno militar como escenario radar. El demostrador IDEPAR ha sido desplegado en las instalaciones del Instituto Tecnológico La Marañosa, ITM, (San Martín de la Vega, Madrid). En este escenario existen varios transmisores de la señal TDT que pueden ser considerados como IO. Torrespaña fue seleccionado debido a su elevada potencia (PIRE = 75,17 dBm) y a su diagrama de radiación omnidireccional.

En la figura 3a se muestra el escenario considerado y la geometría del demostrador, donde se puede observar la dirección de apuntamiento de los canales de vigilancia (rojo) y el área de interés (AoI) para las dos configuraciones, la cual está definida por el ancho de haz de la antena utilizada: área de cobertura para la antena DAT 75 HD en verde (24º) y área de cobertura para la antena 4G-Nova en naranja (59,94º). En la figura 3b se muestra con mayor detalle el AoI (el escenario es un entorno rural) y el movimiento esperado del dron bajo estudio. El emplazamiento seleccionado para las antenas de referencia y vigilancia se muestra en las figuras 4a y 4b, respectivamente.

Para validar las capacidades detectoras del demostrador IDEPAR se ha utilizado un dron DJI Phantom 4 como blanco cooperativo, el cual realiza vuelos supervisados dentro del área de interés. En la figura 5a se presenta una imagen del dron seleccionado y sus principales características.

3.2. Estudio de cobertura del sistema

La estimación de la cobertura del sistema sirve como herramienta para analizar las capacidades reales del RP. Para proporcionar una estimación más precisa, es necesario conocer las características de disper-

sión del blanco (RCS), caracterizar la cadena receptora del RP para determinar la potencia de señal mínima requerida a la entrada (sensibilidad del sistema) y calcular las pérdidas de propagación en exceso. En este estudio, el modelado de las pérdidas de propagación en exceso se ha llevado a cabo utilizando el simulador electromagnético WinProp (*AWE Communications GmbH*), que permite seleccionar diferentes modelos de propagación e integrar datos SIG (Sistema de Información Geográfica) para tener en cuenta la influencia de los obstáculos y el relieve del terreno.

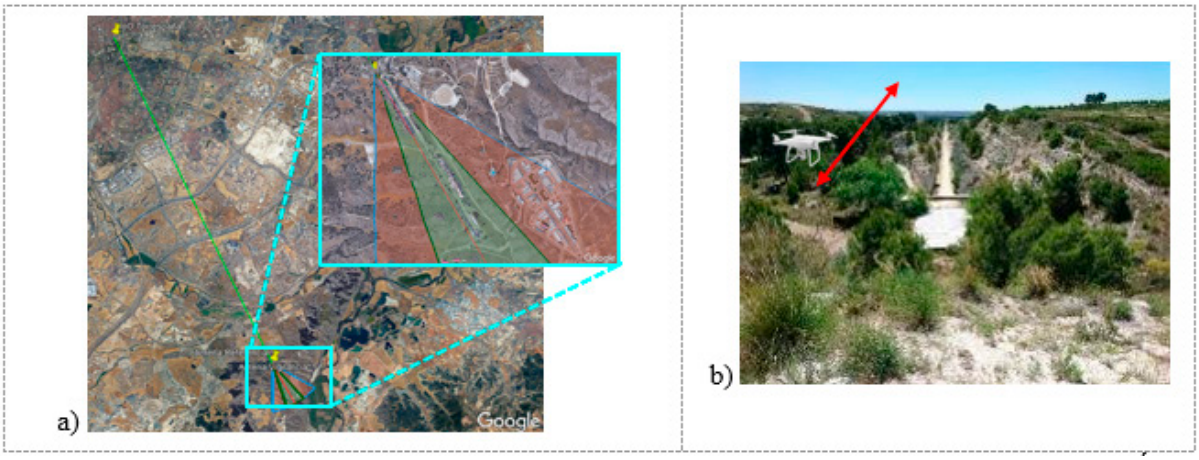


Figura 3. Escenario y geometría del demostrador IDEPAR en las instalaciones del ITM. a) Área de interés para las dos configuraciones del demostrador (antena DAT 75 HD (verde), antena (naranja)). b) Vista desde el canal de vigilancia y movimiento esperado del dron.

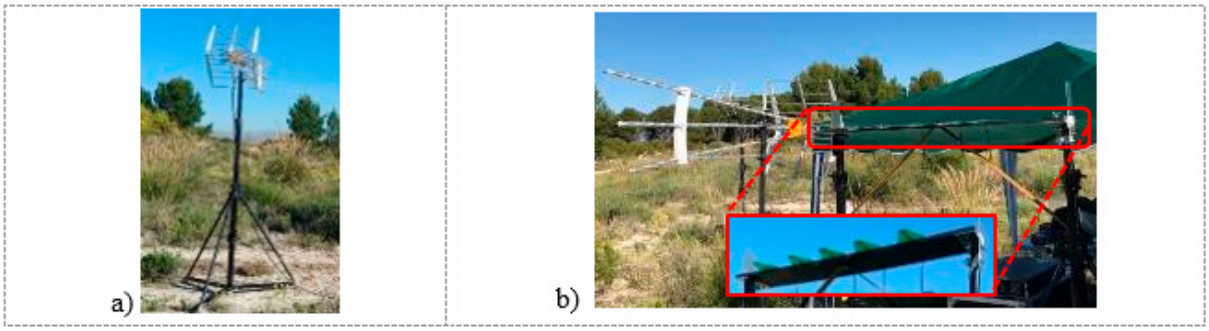


Figura 4. Demostrador IDEPAR: a) antena de referencia; b) antenas de vigilancia.

a)

Características del dron Phantom 4	
Peso (batería y hélices incluidas)	1.380 g
Tamaño diagonal (sin hélices)	350 mm
Velocidad máxima	72 km/h
Sistemas posicionamiento	GPS / GLONASS
Sección recta radar (RCS)	-20 dBsm

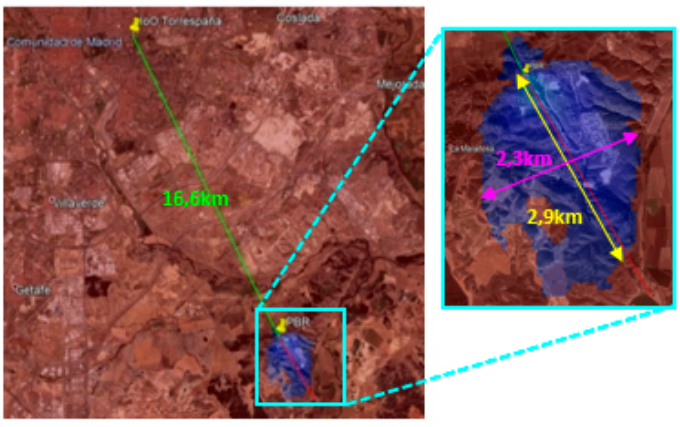


Figura 5. a) Dron cooperativo utilizado durante la campaña de medidas. b) Mapa de cobertura estimado: área de cobertura (azul) y área de sombra (marrón).

En la figura 5b se muestra el área de cobertura estimado para el dron bajo estudio cuando se asume una altura de vuelo de 50 m, una frecuencia central f_c =770MHz, una P_D=80% y una $P_{FA}=10^{-6}$ (asumiendo la sensibilidad del demostrador calculada en [5]). Como se puede observar, esta área incluye las dos AoI de las dos configuraciones de la cadena receptora en vigilancia, por lo que la detección de drones utilizando el demostrador IDEPAR en el escenario considerado es posible.

4. Resultados

En este artículo se ha realizado el análisis de dos medidas adquiridas el 20 de junio de 2018: ancho de banda AB_s=24MHz (tres canales consecutivos de la TDT), T_{adq}=20 seg, tiempo de repetición de pulso de 250 ms y T_{int}=250 ms. Se han obtenido 80 CPI (*Coherent Processing Intervals*) por cada adquisición. Para reducir los efectos del DPI y del *clutter*, se ha aplicado un filtrado ECA sobre el canal de vigilancia para, posteriormente, obtener la CAF de cada CPI con un tamaño de 401 celdas de Doppler (asociadas a una $f_{dop}\epsilon$[-799,744; 799,74]Hz) y 350 celdas de distancia (correspondiente a una distancia de cobertura de 2,1 km en la dirección de apuntamiento). En la Tabla 6 se muestran las características principales de cada una de las medidas bajo estudio, donde V_{blanco} es la velocidad media del dron durante el vuelo y $d_{inicial}$ es la distancia del dron respecto al radar en el inicio de la adquisición. Las capacidades detectoras se han evaluado mediante la estimación de la probabilidad de deteción (P_D) y la de falsa alarma (P_{FA}) utilizando técnicas de MonteCarlo y siguiendo la metodología descrita en [5] y [9], asumiendo una P_{FA} deseada de 10^{-5} y un error de estimación inferior al 10 %.

Tabla 6. Características de las medidas bajo estudio

	Canal de vigilancia	**f_c**	**V_{blanco}**	**Trayectoria**	**d_{incial} al radar**
Medida 1	Antena DAT 75 HD	770 MHz	30 km/h	Acercándose	1.150 m
Medida 2	Array de 5 elementos	698 MHz	30 km/h	Acercándose	600

4.1. Primer experimento: una antena en el canal de vigilancia. Medida 1

El primer ejercicio que se ha llevado a cabo ha sido la detección del dron cooperativo utilizando una única antena en el canal de vigilancia (figura 3a, medida 1 en Tabla 6). Tras obtener los mapas RD para cada CPI, se ha aplicado una etapa de detección basada en técnicas de umbral adaptativo mediante el uso de un detector CA-CFAR (*Cell-Averaging Constant False Alarm Rate*) que estima los estadísticos del *clutter* utilizando una ventana rectangular en 2D. En la figura 6a se muestra la superposición de las salidas del detector para los 80 CPI, donde se observa la trayectoria correspondiente al dron. En este primer experimento, el sistema carece de discriminación angular; por lo que únicamente se puede mostrar sobre Google Earth el área asociada a las celdas de distancia de la trayectoria del blanco (área naranja en la figura 6b, donde la traza GPS del dron se representa en amarillo). Como se puede observar, la traza GPS del dron se encuentra dentro del área estimada; por lo que la trayectoria detectada puede asociarse a la correspondiente a la realizada por el dron cooperativo. En esta medida las capacidades detectoras del sistemas son P_D=97% y $P_{FA}= 2{,}72\cdot10^{-5}$. El dron ha sido detectado a una distancia respecto al radar de entre 970 m y 1.120 m.

4.2. Segundo experimento: canal de vigilancia formado por un array de antenas. Medida 2

En el segundo ejercicio se ha sustituido la antena del canal de vigilancia por un *array* lineal no uniforme de cinco elementos para dotar de discriminación angular al sistema (figura 3b, medida 2 en Tabla 6). En este caso, se ha implementado una técnica de filtrado espacial en dos etapas como la que se describe en [9] para estimar la información del blanco en el espacio 3D (distancia, Doppler, acimut). En la primera etapa se realiza un *beamforming* digital utilizando haces ortogonales y se aplica un detector CA-CFAR con una ventana de referencia en 3D para detectar los blancos. En la figura 7a se muestra la superposi-

ción de las salidas del detector para los 80 CPI, donde se observa la trayectoria correspondiente al dron y una segunda trayectoria que puede ser asociada a un coche.

En la segunda etapa se realiza la estimación de la dirección de llegada de las trayectorias detectadas en la primera etapa. En la figura 7b se han representado las trayectorias detectadas sobre Google Earth, donde se observa que el movimiento de la trayectoria estimada del dron se ajusta a la traza GPS proporcionada por el blanco cooperativo. En esta medida las capacidades detectoras del sistema son P_D=97,5% y P_{FA}= $7{,}32 \cdot 10^{-5}$. El dron ha sido detectado a una distancia respecto al radar de entre 445 m y 600 m. Estos resultados demuestran la capacidad de los radares pasivos que utilizan la señal de la TDT como IO para la detección de drones.

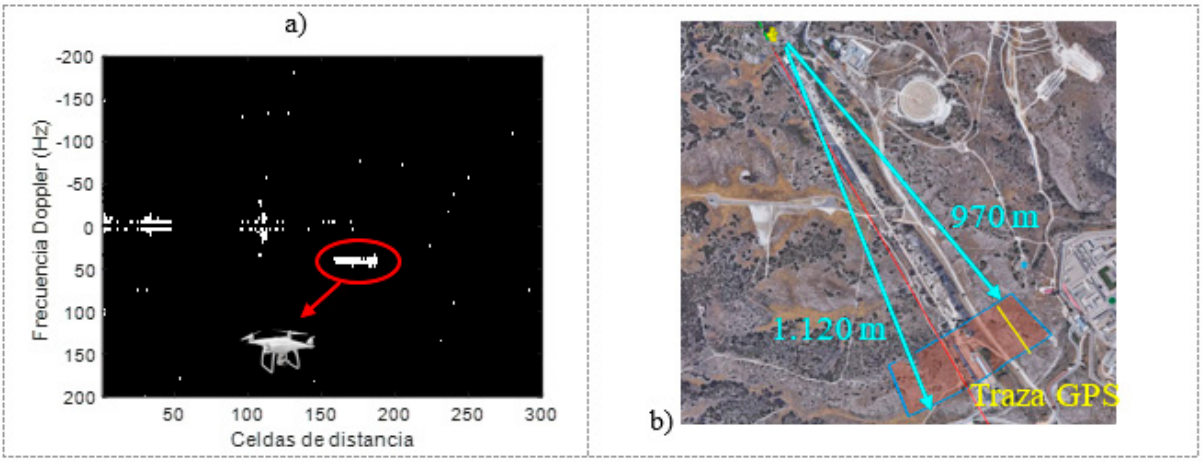


Figura 6. Resultados obtenidos en el primer experimento. a) Mapa de detección acumulado de la adquisición completa. b) Representación sobre Google Earth: traza GPS (amarillo), área asociada a las detecciones del blanco (naranja) y distancias al receptor estimadas (cian).

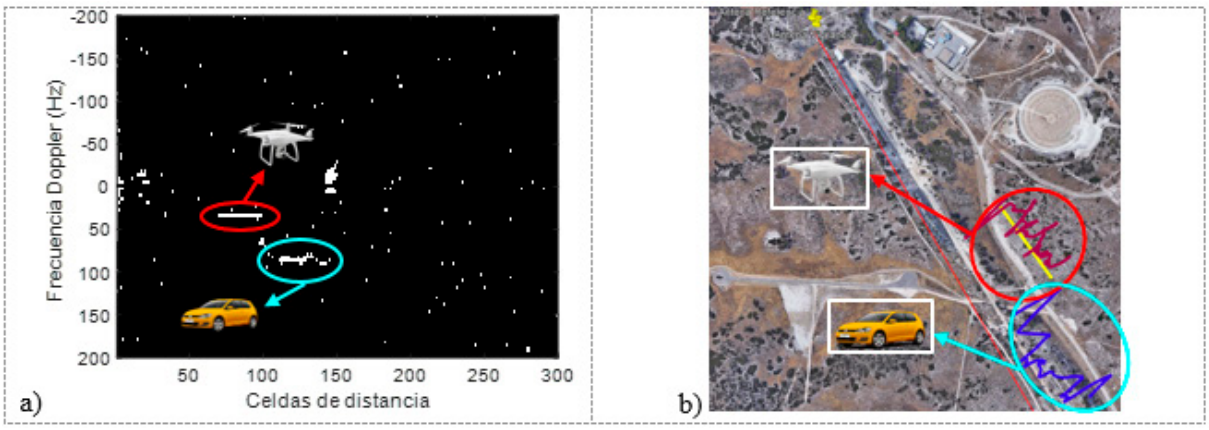


Figura 7. Resultados obtenidos en el segundo experimento. a) Mapa de detección acumulado de la adquisición completa. b) Representación sobre Google Earth: traza GPS (amarillo), trayectoria estimada asociada al dron (rojo) y trayectoria estimada asociada a un coche (azul).

5. Conclusiones

En este artículo se validan las prestaciones de los sistemas radar pasivos que utilizan la señal de la TDT como IO para la detección de drones de pequeño tamaño en un entorno militar. El estudio se ha llevado a cabo desplegando el demostrador pasivo IDEPAR, desarrollado por la Universidad de Alcalá, en las instalaciones del Instituto Tecnológico La Marañosa. El objetivo era la detección un dron DJI Phantom 4 que realizaba vuelos supervisados dentro del área de interés durante las pruebas de validación del proyecto CONDOR. Sobre el escenario seleccionado y teniendo en cuenta la RCS del blanco, la sensi-

bilidad del sistema y las pérdidas de propagación en exceso (calculadas utilizando el simulador electromagnético WinProp); se ha estimado la cobertura del sistema para estudiar las capacidades reales del RP.

Las capacidades detectoras del demostrador IDEPAR se han analizado teniendo en cuenta dos configuraciones de la cadena receptora de vigilancia. En un primer ejercicio se ha utilizado una única antena directiva en el canal de vigilancia, la cual limita la discriminación angular del sistema pero proporciona una elevada ganancia. En el segundo ejercicio se ha sustituido la antena anterior por un *array* lineal no uniforme de cinco elementos que dota de discriminación angular al sistema. El procesado se ha basado en una técnica de filtrado espacial en dos etapas: detección de los blancos y estimación de la dirección de llegada de los mismos. En ambos casos, los resultados demuestran la capacidad de los radares pasivos que utilizan la señal de la TDT como IO para la detección de drones, proporcionando una P_D elevada manteniendo los valores de P_{FA} de interés práctico.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España en el marco del proyecto TEC2015-71148-R. Las campañas de medidas se realizaron en paralelo con las pruebas de evaluación operativas del Proyecto CONDOR, promovido por la Dirección General de Armamento y Material del Ministerio de Defensa (DGAM), gracias a la invitación del Departamento de Optrónica y Misilística de la Subdirección General de Sistemas Terrestres del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), en el marco del convenio de colaboración entre el Ministerio de Defensa y la Universidad de Alcalá.

Referencias

1. *IEEE Standard for Radar Definitions. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society Sponsored by the Radar Systems Panel. IEEE Std 686-2017, 2017.*
2. *Howland, P. E. FM radio based bistatic radar. IEE Proceedings Radar Sonar and Navigation. 2005; 152 (3): 107-115.*
3. *Malanowski, M. K. PaRaDe - Passive Radar Demostrator family development at Warsaw University of Technology. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symp. 2008: 22-24.*
4. *Kuschel, H., Heckenbach, J., Muller, S., Appel, R. On the potentials of passive, multistatic, low frequency radars to counter stealth and detect low flying targets. Radar Conf. 2008.*
5. *Jarabo-Amores, M.P. et al. IDEPAR: a multichannel digital video broadcasting-terrestrial pasive radar technological demonstrator in terrestrial radar scenarios. IET Radar, Sonar and Navigation. 2016; 11(1): 133-141.*
6. *Saini, R. C. DTV signal ambiguity function analysis for radar application. IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation. 2005; 152(3): 133-142.*
7. *Colone, F. et al. A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2009; 45(2): 698–722.*
8. *Cardinali, R., Colone, F., Ferretti, C., and Lombardo, P. Comparison of clutter and multipath cancellation techniques for passive radar. IEEE Radar Conference. 2007; (1): 469–474.*
9. *Del-Rey-Maestre, N., et al. Passive Radar Array Processing with Non-Uniform Linear Arrays for Ground Target's Detection and Localization. Remote Sensing. 2017; 9: 756.*

Plataformas USRP para el desarrollo de radares pasivos de altas prestaciones reconfigurables

Almodóvar Hernancez, Anabel[1,*], Gómez del Hoyo, Pedro José[1], Del Rey Maestre, Nerea[1], Mata-Moya, David[1], Jarabo Amores, María Pilar[1] y Gaitán Cabañas, Francisco Javier[1]

[1] Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad de Alcalá. Plza. San Diego s/n, 28803, Alcalá de Henares, Madrid (España).

Correo electrónico: anabel.almodovar@edu.uah.es (AAH), pedrojose.gomez@uah.es (PJGH), nerea.rey@uah.es (NRM), david.mata@uah.es (DMM), mpilar.jarabo@uah,es (MPJA), francisco.gaitan@uah.es (FJGC).

* Autor principal y responsable del trabajo: anabel.almodovar@edu.uah.es (AAH).

Resumen

En este artículo se presenta un estudio acerca de la utilización de señales *sparse* en frecuencia para la mejora de capacidades de los sistemas radar pasivos basados en DVB-T. El análisis se ha realizado sobre señales reales adquiridas por el demostrador IDEPAR desarrollado en la Universidad de Alcalá. Los datos han sido obtenidos gracias a la actualización de las plataformas de adquisición a tarjetas USRP X310, las cuales disponen de ancho de banda suficiente para adquirir grupos de canales de televisión digital terrestre dispersos en frecuencia. Se ha realizado un doble análisis para determinar la mejora de capacidad detectora comparando la versión inicial de IDEPAR y la actualizada. En primer lugar, se presentan las estimaciones del pedestal de la función de ambigüedad de la señal de referencia adquirida, el cual se encuentra directamente relacionado con la relación señal a ruido del sistema. En segundo lugar, se analizan los mapas rango-Doppler obtenidos tras el procesado coherente de las señales. En este caso se calcula la relación señal a interferencia media a lo largo de la trayectoria de tres blancos. Los resultados muestran una mejora de las capacidades al aumentar el ancho de banda útil de las señales adquiridas.

Palabras clave

USRP, radar pasivo, señales sparse, función de ambigüedad.

1. Introducción

Un radar pasivo (RP) es un conjunto de técnicas capaz de detectar blancos y estimar parámetros como la posición y velocidad, a partir de la energía que dispersan al ser iluminados por otros sistemas de comunicaciones conocidos como iluminadores de oportunidad, IO (televisión digital, radio FM, telefonía móvil) [1-3]. Este tipo de radares presentan numerosas ventajas frente a los activos [4]: reducido coste de desarrollo y mantenimiento, no requieren asignación de frecuencias, no provocan contaminación electromagnética. No obstante, cuentan con ciertas desventajas que condicionan su funcionamiento: disponibilidad de IO, ausencia de control de la señal transmitida, mayor carga computacional. Debido a todo ello, se han posicionado como una tecnología emergente que despierta un gran interés dentro de la comunidad científica. Una de las principales fuentes de señal bajo estudio es la TV digital terrestre, TDT, debido principalmente a sus elevadas potencias, alta disponibilidad, ancho de banda por canal independiente del contenido transmitido (8MHz), el cual puede ser ampliado mediante la utilización de canales consecutivos, permitiendo RP de alta resolución [5-9].

Las plataformas USRP (Universal Software Radio Peripherals) han permitido un gran desarrollo de esta tecnología [9-12]. El grupo de Tecnologías de Alta Frecuencia de la Universidad de Alcalá ha desarrollado el demostrador IDEPAR [9], basado en dispositivos USRP de National Instruments. En la primera versión, las tarjetas permitían una frecuencia máxima de muestreo de las señales I/Q de 25 MHz para una resolución de 14 bits por muestra, y una frecuencia central variable entre 50MHz y 2.2GHz, lo que posibilitaba la utilización de tres canales consecutivos de la banda TDT.

Tras la liberalización del dividendo digital, la nueva asignación de frecuencias se caracteriza por una elevada dispersión que reduce la probabilidad de disponer de canales consecutivos, y una variabilidad entre regiones. La facilidad de transporte y despliegue de un RP le convierte en una atractiva solución móvil, por lo que se requiere de una capacidad de reconfiguración para poder utilizar los canales disponibles en el emplazamiento elegido. A su vez, la cada vez mayor presencia de blancos pequeños, como drones que deben ser monitorizados por su incipiente peligrosidad y uso indebido, requiere de sistemas con una mayor resolución que posibiliten mejores capacidades de detección y seguimiento. Por todo ello, el aumento del ancho de banda de adquisición se convierte en una tarea indispensable para la mejora del demostrador IDEPAR. Este aumento permitirá la adquisición de señales multicanal *sparse* en frecuencia pudiendo utilizar conjuntos de canales no consecutivos para mejorar las capacidades del sistema. Si bien el espectro adquirido presentará *gaps* frecuenciales, las capacidades se verán incrementadas al procesar un mayor ancho de banda útil.

En este artículo se analizarán las mejoras en capacidades detectoras al utilizar señales multicanal *sparse* mediante el uso de las tarjetas de adquisición USRP X3010 de National Instruments, que permiten al sistema la adquisición coherente de hasta 4 canales de radiofrecuencia por tarjeta, con una tasa de muestreo de 100MS/s. Para ello se hará uso de la función de ambigüedad, FA, sobre señales reales adquiridas con el nuevo equipo, siguiendo el modelo utilizado en [15-16], y se analizarán los efectos del aumento de ancho de banda sobre la relación señal a interferencia en blancos reales después del procesado coherente de las señales adquiridas.

2. Función de ambigüedad

La función de ambigüedad (FA) permite el análisis de las capacidades detectoras de las señales radar [13]. Esta función describe cómo una señal se encuentra correlada consigo misma cuando sufre un desplazamiento en frecuencia. Su implementación en tiempo discreto se expresa en (1), donde N es la longitud de la señal para una tasa de muestreo f_s(Hz), m representa el instante de tiempo asociado a un retardo τ_m=m/f_s, y p es la frecuencia Doppler correspondiente a f_{dop}=f_s(p/N). La FA proporciona la ganancia de procesado necesaria para permitir la detección del eco del blanco, actuando como filtro adaptado del sistema radar.

$$\chi(m,\omega) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot x^*[n-m] \cdot e^{-j\omega n} \quad (1)$$

Las propiedades fundamentales que presenta la FA son: 1) máximo de la función en el origen que está relacionado con la energía de la señal; 2) simetría respecto al origen; 3) volumen encerrado por la función constante y, si la señal está normalizada en energía, igual a la unidad; 4) el corte con el eje en frecuencia permite el estudio de la resolución en frecuencia; 5) el corte a lo largo del eje temporal permite el estudio de la resolución temporal, la cual depende del ancho de banda de la señal.

Atendiendo a las diferentes formas de onda, la FA se clasifica en cuatro clases [13-14]. Los principales IO utilizados en aplicaciones radar presentan señales no periódicas, pseudoaleatorias y casi incorreladas consigo mismas, por lo que producen una AF tipo B1. Este tipo de AF consiste en un pico muy pronunciado en el origen (desfases temporal y frecuencial nulos) junto con un pedestal (figura 1). El volumen ocupado por el máximo central se encuentra inversamente relacionado con el ancho de banda de la señal de partida (B) y su duración temporal (T), alcanzándose unas resoluciones de 1/B y 1/T para las dimensiones de rango y frecuencia Doppler, respectivamente [9]. El valor medio del pedestal se puede estimar como 1/BT [14]. Como se puede apreciar en la figura 1, el nivel de este pedestal determina la diferencia entre el pico principal y el nivel de fondo, siendo este un parámetro relacionado con la relación señal a interferencia (SIR) definida a la entrada del detector. Dadas las relaciones existentes entre los parámetros de la AF y el ancho de banda y duración de la señal utilizada, las capacidades obtenidas en sistemas radar (resoluciones y capacidad de detección) se verán ampliamente mejoradas mediante el aumento del ancho de banda y del intervalo de procesado de la señal adquirida.

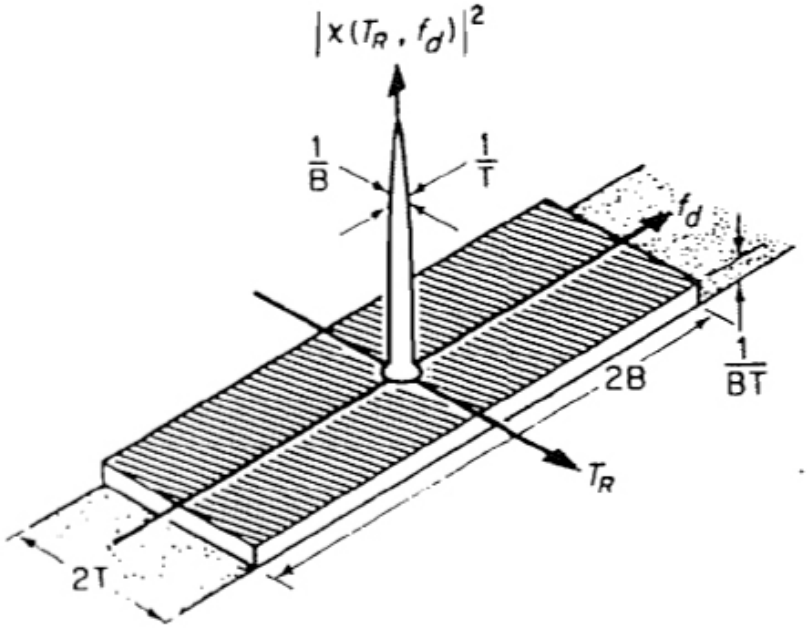


Figura 1. Función de ambigüedad de tipo B1 [13].

3. Actualización del demostrador IDEPAR

IDEPAR es un demostrador radar pasivo desarrollado en la Universidad de Alcalá y aplicado a tareas de vigilancia y monitorización de tráfico terrestre, marítimo y aéreo [9]. El sistema está basado en el uso de plataformas USRP N210, que permiten una gran versatilidad para adaptarse a cambios espectrales y una escalabilidad para su uso con sistemas de *arrays*. No obstante, su limitado ancho de banda (25MHz) y la presencia de osciladores locales independientes entre equipos dificultan su funcionamiento a plena capacidad. El sistema fue inicialmente diseñado para la utilización de 3 canales consecutivos en la parte alta del espectro TDT, lo que permite alcanzar una resolución de 12 metros biestáticos, siendo complicado mantener esta resolución en todo el territorio nacional por la ausencia de canales consecutivos tras el primer dividendo digital. A su vez, la aparición de nuevas amenazas cada vez de menor tamaño y firma radar, como drones, requiere una mejora del sistema para posibilitar la detección, discriminación y clasificación de los blancos objetivo.

Con el fin de aumentar las capacidades del sistema radar pasivo y lidiar con la dispersión espectral de los canales de TDT disponible, se ha optado por actualizar el demostrador mediante la utilización de tarjetas de adquisición USRP X310 equipadas con dos *daugther boards* TwinRx, cada una de ellas con la capacidad de digitalizar dos canales analógicos. Con esta nueva configuración se consigue aumentar las prestaciones del demostrador (Tabla 7) mediante el aumento a ocho canales analógicos disponibles, junto con un mayor ancho de banda de adquisición, hasta 100MHz por canal, y asegurando una adquisición coherente de las señales en todos los canales utilizados, lo que reduce la complejidad de los algoritmos necesarios para el procesado en *array* en tareas de detección y seguimiento. Además, la inclusión de una FPGA de mayores prestaciones permitirá desviar parte del procesado radar a la propia USRP, acercando el demostrador al funcionamiento en cuasi-tiempo real.

Tabla 7. Características principales de las dos versiones de IDEPAR

	IDEPAR	Actualización IDEPAR
N.º de canales analógicos	6 (6 tarjetas USRP N210)	8 (2 tarjetas USPR X310)
Tasa de muestreo I/Q máxima	25 MS/s	100MS/s
Frecuencias de trabajo	40MHz – 2GHz	40MHz - 6GHz
Resolución ADC	14 bits/muestra	14 bits/muestra
Osciladores locales enfasados	No	Si
FPGA interna	3A-DSP 3400 FPGA	Kintex-7 FPGA XC7K410T
Interfaz de transmisión	1 Gigabit Ethernet	Dual 10 Gigabit Ethernet

4. Caso de estudio

El emplazamiento elegido para la realización de las pruebas de capacidades de las nuevas tarjetas de adquisición se sitúa en la azotea de la Escuela Politécnica Superior (EPS) de la Universidad de Alcalá (figura 2A). Esta localización proporciona un escenario terrestre de carácter predominantemente rural con presencia de grandes edificios en las proximidades, que ha sido ampliamente utilizado para la validación de capacidades del demostrador IDEPAR. El área de interés está formada por un sector de 24º (ancho de haz de la antena utilizada) con dos tramos de carreteras a diferentes distancias (carretera de Meco entre 300 y 500 m, autopista R2 aproximadamente 1,9 km), siendo posible la detección de blancos fuera de este sector. Los blancos objetivo son vehículos terrestres en movimiento dentro del área de interés principalmente circulando por los dos tramos de carreteras, donde se esperan tanto vehículos ligeros como autobuses y camiones. También existe tráfico rodado en menor densidad dentro de las calles del campus universitario que puede entrar dentro de la zona de interés. Como IO se selecciona el transmisor de TDT de Torrespaña situado a 28,7 km de la posición del RP, debido a la mayor potencia de transmisión y la disponibilidad de canales respecto al resto de transmisores TDT disponibles.

El equipo utilizado durante la prueba consta de (figura 2b): dos antenas HD Boss 75R, una para cada canal de adquisición; un amplificador de bajo ruido para aumentar el nivel de señal del canal de vigilancia; una USRP310 con sus dos TwinRx preinstaladas; y una estación de trabajo de altas prestaciones para la recopilación y análisis de los datos. Para la realización del estudio, no es necesaria la utilización del resto de equipamiento del demostrador IDEPAR (red de sincronización) puesto que una única USRP X310 permite la adquisición simultanea y coherente de hasta cuatro canales analógicos con un ancho de banda instantáneo de 100 MHz por canal.

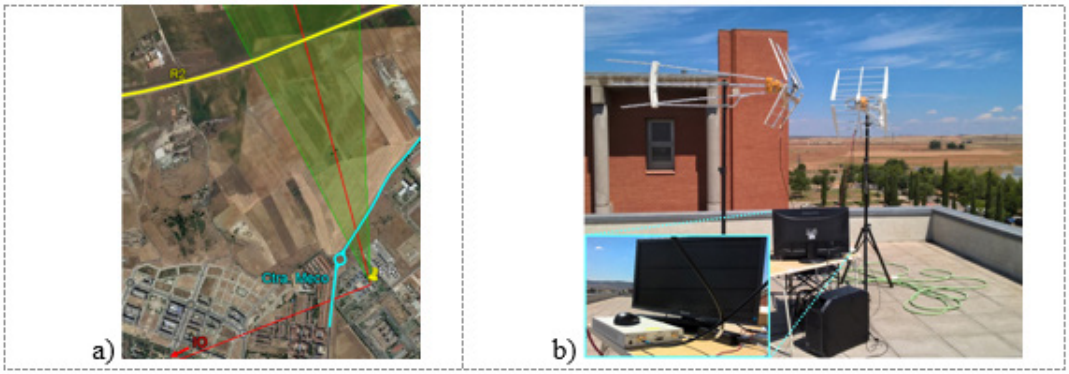


Figura 2. Detalle del escenario radar. Vista aérea del emplazamiento (a): área de interés (verde) con las carreteras de Meco (azul) y R2 (amarillo). Equipos desplegados en la azotea de la EPS (b).

5. Resultados

Las capacidades de la nueva versión del sistema IDEPAR han sido analizadas mediante datos reales adquiridos el día 18 de julio de 2018. La campaña de medidas consta de una adquisición continua de 15 segundos de las señales provenientes de los canales de referencia y vigilancia. La frecuencia de muestreo se fija a 100 MHz con una frecuencia central de 742 MHz (figura 2). A fin de comparar las capacidades obtenidas mediante la inclusión de la USRP X310 con las del sistema de adquisición previo, se simula la adquisición de señales de 25 MHz. Para ello, se aplica un proceso de filtrado digital y remuestreo sobre las señales de referencia y vigilancia adquiridas, generando unas nuevas señales con únicamente tres canales de TDT consecutivos centrados a 770 MHz, caso ampliamente utilizado con la versión inicial de IDEPAR. Para completar el estudio, la señal de partida se ha filtrado nuevamente con el fin de obtener una señal con un solo canal de información (ancho de banda de 8 MHz) que aportará los valores de referencia. Para cada conjunto de señales se generan 60 intervalos de procesado coherente (CPI) de 250 ms, sobre los que a su vez se aplica la función de ambigüedad cruzada, CAF, que es el resultado de correlar la señal de vigilancia, s_{surv}, con copias de la señal de referencia, s_{ref}, desplazadas en frecuencia (2). Los mapas rango Doppler, RDM, obtenidos para cada par de señales contarán con los mismos ecos de blancos debido a la interdependencia entre las señales adquiridas y simuladas.

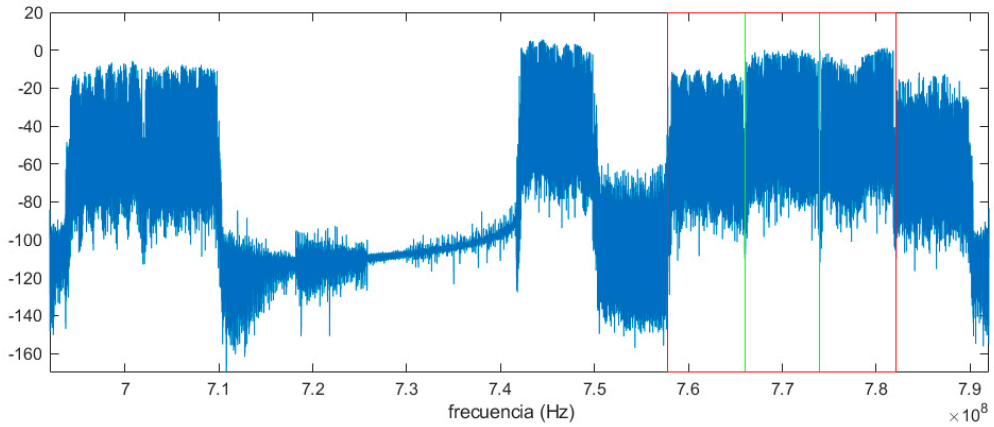


Figura 3. Espectro de la señal adquirida por la USRP X310: adquisicion de 100 MHz con siete canales de TDT dispersos. En rojo tres canales consecutivos que simularán el uso de las USRP N210. En verde canal de 8 MHz utilizado como referencia en el estudio.

$$\chi_{CAF}(m,p) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} s_{ref}^{*}[n-m] \cdot s_{surv}[n] \cdot e^{-j2\pi\frac{p}{N}n} \qquad (2)$$

El espectro de la señal de referencia está compuesto por 7 canales de TDT dispersos en frecuencia procedentes del IO Torrespaña. En los *gaps* producidos entre los mismos podemos encontrar canales transmitidos por iluminadores interferentes y espacios de ruido en los que ningún canal de DVB-T es transmitido. Los canales seleccionados para la simulación tanto del uso de la versión previa de IDEPAR como el sistema de referencia se encuentran en la parte alta del espectro, donde existe disponibilidad de canales de información consecutivos (marcados en rojo y verde respectivamente).

5.1. Análisis de la función de ambigüedad

Dadas las características propias de la FA normalizada en energía, volumen unidad distribuido mayoritariamente en el pedestal, la función densidad de probabilidad (FDP) se utiliza como herramienta para la estimación del pedestal de la FA. El valor medio estimado del pedestal se corresponde con el punto de máximo valor de la FDP. En la figura 4 a se representan las FDP para los tres casos bajo estudio, siendo los valores característicos los indicados en la Tabla 8. Como se puede observar, el aumento de ancho de banda de información dentro de la señal analizada se corresponde con una disminución del nivel medio estimado de pedestal, lo que redunda en una mejora de las capacidades de detección del sistema. Las mejoras con la utilización de las USRP X310 y la consiguiente ampliación del ancho de banda adquirido rondan el nivel de 1dB. No obstante, la mejora conseguida sobre los valores estimados de pedestal no alcanza la mejora teórica esperada. Esto puede deberse a la presencia de ruido e interferencias en las señales bajo estudio. En la figura 4b se muestra el corte de la FA para la línea cero-Doppler en los tres casos estudiados. Como era de esperar, el nivel de pedestal se ve reducido cuando el ancho de banda de información presente en la señal aumenta.

Tabla 2. Estimaciones del nivel de pedestal a partir de la FA para los tres casos bajo estudio

	$B_{señal}$	$B_{Información}$	$1/B_i*T$ (dB)	Pedestal estimado (dB)
1 canal	8MHz	8MHz	-53,802	-53,49
IDEPAR	25MHz	24MHz	-58,751	-55,90
Actualización IDEPAR	100MHz	56MHz	-62,253	-56,87

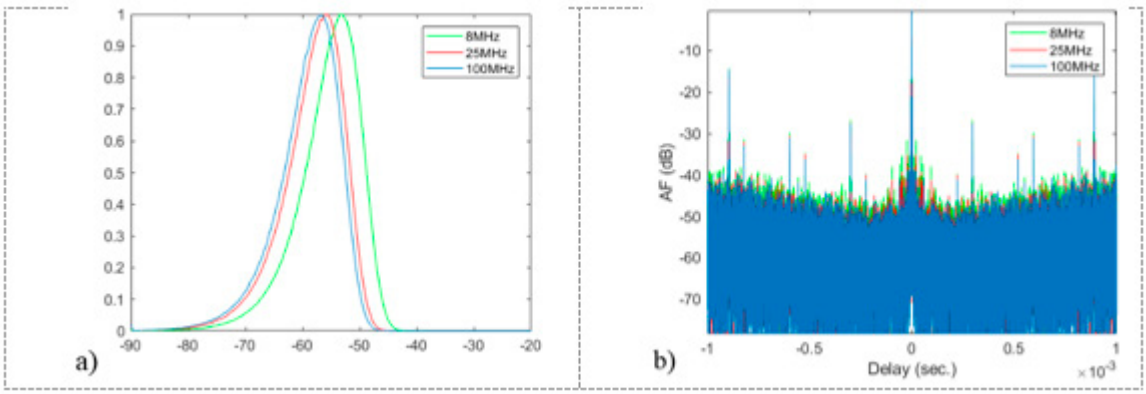


Figura 4. FDP de los valores obtenidos en la FA (a) y línea cero-Doppler de la FA (b): un único canal (azul), tres canales (rojo) y siete canales dispersos en frecuencia (verde).

5 .2. Análisis de la relación señal a interferencia sobre la CAF

Para comprobar la mejora sobre capacidades reales de funcionamiento, se realiza un análisis de la relación señal a interferencia sobre blancos presentes en el sistema, utilizando las CAF generadas a partir de las señales de referencia y vigilancia (2). Se seleccionan tres blancos aislados con trayectorias duraderas sobre los que se evalúa la relación entre la potencia del blanco y la potencia media en una ventana alrededor del mismo a lo largo de toda la trayectoria.

se muestran la CAF del CPI 25 para los tres casos bajo estudio, en los que se pueden diferenciar los tres blancos seleccionados para el análisis y las ventanas sobre las que se calcula el nivel de interferencia. La ventana utilizada para cada caso se ajusta a los datos disponibles debido a la diferencia de resolución conseguida con cada configuración. Los resultados estimados a lo largo de toda la trayectoria de los blancos se resumen en la Tabla 9. Las mejoras obtenidas con el aumento del ancho de banda útil se aproximan a lo estimado en el apartado anterior. La actualización del sistema IDEPAR incrementa en 1,5 dB la SIR media de los blancos analizados, lo que incrementa las posibilidades de detectar blancos más lejanos o con menor retorno radar. El incremento de ancho de banda útil también mejora la resolución del sistema, incrementando el numero de celdas en las que aparece el blanco. Esto permitirá implementar estrategias de integración de pulsos en detección.

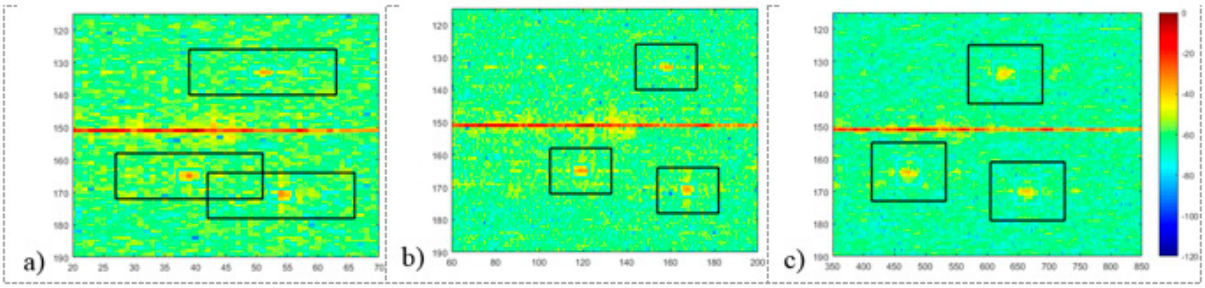


Figura 5. Intensidades de las CAF con los tres blancos seleccionados y sus correspondientes ventanas de análisis de interferencia: un único canal (a), tres canales (b) y siete canales dispersos en frecuencia (c).

Tabla 9. Relación señal interferencia media de los blancos para los casos de estudio

	1 canal	IDEPAR	Actualización IDEPAR
Blanco 1	23,57dB	24,96dB	25,32dB
Blanco 2	21,85dB	22,06dB	24,46dB
Blanco 3	20,30dB	21,14dB	22,57dB
Mejora media		0,84dB	2,22dB

6. Conclusiones

En este articulo se ha presentado la actualización de la cadena receptora del demostrador IDEPAR mediante la inclusión de tarjetas de adquisición USRP X310 de National Instruments, que permiten la digitalización coherente de cuatro canales cuadriplicando el ancho de banda previo. Esta mejora de ancho de banda incrementa notablemente las capacidades del sistema en cuanto a resolución y detección. A su vez, la capacidad de digitalizar un mayor ancho de banda permite la utilización de grupos de canales TDT *sparse* en frecuencia, maximizando la robustez del sistema ante la dispersión actual del espectro de TDT.

Se ha analizado sobre datos reales adquiridos por el demostrador las mejoras en capacidades detectoras del sistema. Para ello se ha adquirido un set de 30 segundos de medidas con un ancho de banda de 100MHz lo que ha permitido adquirir 7 canales TDT *sparse* en frecuencia. Para simular el uso de la cadena de adquisición base de IDEPAR, se ha simulado la adquisición de señal mediante técnicas de

filtrado y remuestreo sobre la señal real. La mejora de capacidades se ha analizado utilizado dos vías: el análisis de la función de ambigüedad y el cálculo de la relación señal a interferencia sobre la CAF utilizando las trayectorias de tres blancos reales. Ambos análisis muestran una mejora de las capacidades detectoras al aumentar la relación señal a interferencia. A su vez, el aumento de ancho de banda conseguido incrementa la resolución del sistema, aumentando las celdas sobre las que se presenta el blanco. Esto permitirá aplicar cadenas de detección con integración de pulsos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad bajo el proyecto MASTERSAT, ref: TEC2015-71148-R. En el proceso de diseño e integración de las nuevas cadenas de adquisición se ha contado con el soporte de profesionales de National Instruments.

Referencias

1. *Willis N.J. Bistatic Radar. Scitech Publishing Inc. 2005.*
2. *Glende M, Heckenbach J, Kuschel H, Müller S, Schell J, Schumacher C. Experimental passive radar systems using digital illuminators (DAB/DVB-T). Int. Radar Symposium. 2017.*
3. *Malanowski M, et all. Passive Coherent Location DBV-T demonstrator at Warsaw University of Technology. 3rd FHR Focus Days on PCL, Wachtberg-Werthhoven. 2011.*
4. *Kuschel H, Heckenbach J, Muller S, Appel R. On the potentials of passive, multistatic, low frequency radars to counter stealth and detect low flying targets. Radar Conference. 2008.*
5. *Saini R, Cherniakov M. DTV signal ambiguity function analysis for radar applications. IEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, no. 3, pp. 133-142. 2005.*
6. *O'Hagan DW, Schroder M, Basavarajappa V, Knott P, Kuschel H, Simeoni M. Wideband antenna array for digital video broadcast terrestrial-based passive bistatic radar applications. IET Radar, Sonar Navigation, vol. 8, no. 2, pp. 106-113. 2014.*
7. *Conti M, et all. High range resolution multichannel DVB-T passive radar. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 27, no. 10, pp. 37-42. 2012.*
8. *Bárcena-Humanes JL, et all. DVB-T ambiguity peaks reduction in passive radar applications based on signal reconstruction. 44th European Microwave Conference, pp. 1900-1903. 2014.*
9. *Jarabo-Amores MP, et all. IDEPAR: a multichannel digital video broadcasting-terrestrial passive radar technological demonstrator in terrestrial radar scenarios. IET Radar, Sonar and Navigation, pp. 1-9, 2016.*
10. *Berizzi F, Martorella M, Petri D, Conti M, Capria A. USRP technology for multiband passive radar, IEEE Radar Conference, Washington, DC, pp. 225-229. 2010.*
11. *D. Petri, Berizzi F, Martorella M, Dalle E, Capria A. A software defined UMTS passive radar demonstrator. Proc. of 11-th International Radar Symposium IRS, pp. 1–4. 2010.*
12. *Heunis S, Paichard Y, Inggs M. Passive radar using a software defined radio platform and open source software tools. Proc of IEEE Radar Conference, pp. 879–884. 2011.*
13. *Levanon, N. and Monzeson, E. Radar signal. Wiley Interscience, 2004.*
14. *Rihaczek, A. W. Radar waveform selection-a simplified approach. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., AES-7(6):1078–1086. 1971.*
15. *Del Rey Maestre N, et all. DVB-T based passive radar performance sensitivity with respect to channel availability. Signal European Radar Conference (EURAD), pp183-186. 2017.*
16. *Del Rey Maestre N, et all. Nondesired Effects in DVB-T Based Passive Radar Due to Sporadic Interference. Signal Processing Symposium (SPSympo), pp1-6. 2017.*

2C. Sensores y sistemas optrónicos

Investigación del efecto del tamaño de la fuente en equipos de termografía infrarroja y termómetros de radiación

Javier de Lucas[1*], Sagrario Alonso[2], Manuel Bernal[3], María Ángeles Sierra[4], Raquel Macías[5]

[1, 2, 3] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Centro de Metrología y Calibración, Ctra. a Ajalvir, km 4, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid; delucasvj@inta.es (JdL), alonsods@inta.es (SA), bernalgm@inta.es (MB).

[4, 5] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Departamento de Optoelectrónica y Misilística, Área Sensores, Ctra. M-301 km 10.400, 28330 San Martín de la Vega, Madrid; sierrasma@inta.es (MAS), maciasjrdv@inta.es (RM).

* Javier de Lucas; delucasvj@inta.es (JdL).

Resumen

Cámaras y sistemas de termografía infrarroja son utilizados en múltiples aplicaciones en sectores de seguridad y defensa: optrónica, sensores, contramedidas, estudio termográfico del estrés del combatiente, etc. Su evolución ha sido espectacular, especialmente desde la introducción del microbolómetro como detector elemental. En el pasado se utilizaban básicamente para medidas cualitativas, interesando únicamente el contraste térmico, búsqueda de fugas de calor, etc. Hoy son más las aplicaciones cuantitativas, combinando la imagen térmica de alta resolución con medidas absolutas de temperatura. La necesidad de garantizar la trazabilidad al S.I. de los valores de temperatura proporcionados, exige a los laboratorios de calibración investigar los factores de influencia que afectan a los resultados de las medidas realizadas. La incertidumbre en la medida depende de multitud de factores (p.ej. emisividad) y uno de los más significativos es el efecto del tamaño de la fuente (ETF) por el cual, debido a imperfecciones en el sistema óptico (difracción, reflexiones internas, etc.), radiación que proviene de zonas fuera del blanco correspondiente a un pixel, puede llegar a este. Es equivalente a considerar que el tamaño de la fuente incide en el valor de temperatura que proporciona un termómetro de radiación. El Laboratorio de Temperatura y Humedad del INTA, tiene acreditación ENAC para calibración de termómetros de radiación e indicación de temperatura de cámaras termográficas y actúa en este ámbito como Laboratorio Metrológico del Ministerio de Defensa. En este trabajo se presentan resultados de la investigación realizada sobre el ETF de termómetros de radiación y cámaras termográficas y se analiza su influencia sobre los valores de temperatura proporcionados por estos instrumentos.

Palabras clave

Termografía, termómetro de radiación, cámara termográfica, cuerpo negro, optrónica, factores humanos.

1. Introducción

Los sistemas de termografía infrarroja, cámaras termográficas (CT), cámaras de imagen térmica, etc. son dispositivos que detectan la radiación infrarroja emitida por todos los objetos y generan un mapa bidimensional de su temperatura superficial. Las aplicaciones de la termografía pueden ser de tipo cualitativo y cuantitativo. En el primer caso interesan las diferencias o la distribución de temperatura en el objeto (contraste térmico). Son frecuentes en sectores de gestión de la energía, búsqueda de fugas térmicas en instalaciones industriales y circuitos electrónicos, etc. Las aplicaciones cuantitativas requieren un valor exacto de la temperatura en cada pixel de la imagen. Cada uno de ellos, situado en una matriz en el plano focal imagen (FPA en la terminología técnica), consiste en un detector térmico elemental (microbolómetro, refrigerado o no) que genera una señal eléctrica (resistencia en este tipo de detector o tensión en termopilas) en función de la temperatura de equilibrio que alcanza por efecto de la radiación infrarroja que absorbe.

Las aplicaciones de la termografía infrarroja en defensa y seguridad (DyS) son innumerables. Algunos ejemplos son: vigilancia, visión nocturna, vuelo y conducción nocturna o sin visibilidad, detección de blancos, caracterización de contramedidas, control y seguridad de fronteras, etc. En el ámbito aeroespacial (asociado a DyS) observación de la tierra, teledetección, etc. Cabe también destacar aplicaciones relacionadas con la medida de diversos factores humanos, especialmente psicométricos y de estrés del combatiente en ambientes complejos. Así mismo es cada vez más frecuente su uso para diagnósticos en el ámbito sanitario, tales como: detección de lesiones musculares, fiebre (incluyendo posibles afectados por enfermedades infecciosas, como el ébola, en controles fronterizos), medida del estado psicológico del individuo, etc. [1-4].

El incremento en el uso cuantitativo o absoluto de las CT y unas especificaciones cada vez más exigentes en cuanto a resolución térmica, hace imprescindible su calibración con trazabilidad al SI y al mismo tiempo el análisis de los factores de influencia sobre la incertidumbre asociada a la medida. Algunos de los más relevantes son: emisividad de la fuente, reflexiones externas, no uniformidad del FPA, efecto del tamaño de la fuente (ETF), etc. [5]. La emisividad es un problema que interesa sobre todo al usuario final. En un entorno de calibración en el laboratorio, las fuentes patrones son cuerpos negros (CN) de emisividad efectiva conocida y muy próxima a 1 (>0,999 en muchos casos) [6]. Para las aplicaciones no queda otro remedio que determinar con precisión el valor asociado a las superficies o apuntar a zonas del objeto que formen cavidades u oquedades donde la emisividad (en este caso efectiva) se incremente, haciéndose además algo más independiente de la emisividad intrínseca. Si el blanco es accesible, puede utilizarse algún tipo de cinta adhesiva de emisividad conocida o una pintura de alta emisividad [7].

El efecto de las reflexiones (o de temperatura ambiente) se minimiza evitando fuentes de calor externas cuya radiación incida directamente sobre el objeto y se refleje hacia la cámara. En cualquier caso estos equipos proporcionan valores corregidos a partir de un valor promedio de temperatura ambiente externa. Es especialmente importante si las paredes u objetos del entorno están a mayor temperatura que el blanco (medidas por debajo de ambiente).

El ETF se genera a partir de reflexiones y difracciones internas dentro del sistema óptico. Debido a ello, radiación que proviene de regiones del blanco exteriores a la imagen virtual de un píxel (en el plano objeto) por el sistema óptico, puede llegar a dicho píxel. La temperatura indicada por este detector depende entonces del tamaño y temperatura de la fuente o blanco externo. A diferencia de otros factores de influencia, el ETF es difícil de corregir cuando las condiciones de uso difieren de las de calibración.

En el Laboratorio de Temperatura y Humedad del INTA estamos investigando y desarrollando métodos para caracterizar el ETF en sistemas de termografía y termómetros de radiación (TR), que permitan el cálculo de correcciones a aplicar para diferentes tamaños de fuente y temperaturas del objeto. Para ello es necesario partir de un modelo teórico, disponer de fuentes de radiación de CN bien caracterizadas y suficientemente uniformes y contar con aperturas de diámetro variable mantenidas a temperatura controlada, que simulen fuentes con diferente tamaño.

2. Modelo teórico para la caracterización del ETF

Considerando un detector (pixel individual o grupo en el FPA de una CT o el detector de un TR clásico), el ETF correspondiente a una fuente de radio $r > r_b$ (siendo r_b el radio del blanco o imagen del detector por el sistema óptico en el plano objeto) suele expresarse como [8]:

$$\sigma(r) = \frac{S(r)}{S(\infty)} \quad (1)$$

S es la señal generada en el detector y el ETF representa la radiación que proviene de una fuente de radio r normalizada a una de tamaño infinito. Se asume que la temperatura de la fuente T es uniforme y que el diafragma que la limita no emite radiación o es despreciable. En la figura 1 se describe esquemáticamente el mecanismo.

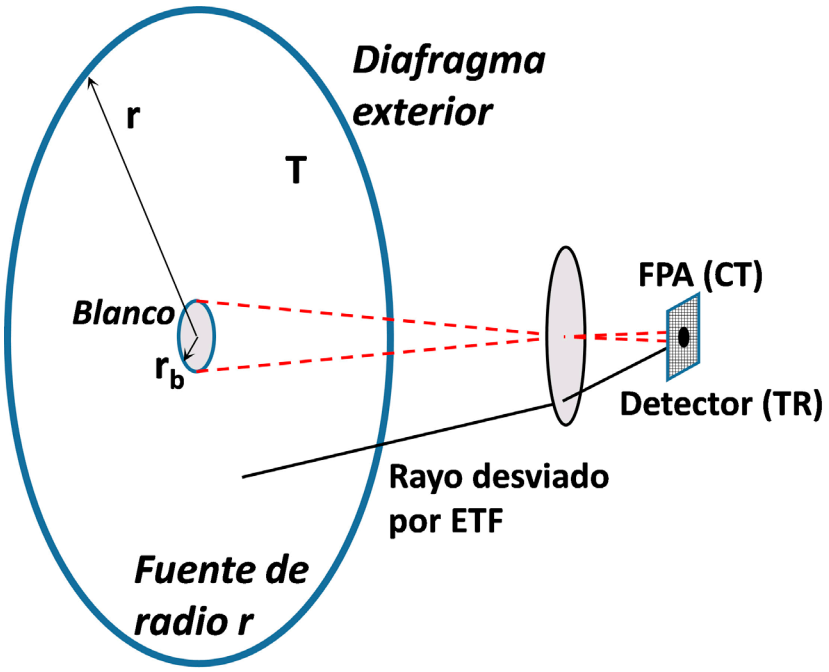


Figura 1. Esquema del ETF en un TR o una CT.

Cuando la radiación del diafragma no es despreciable, hay que considerar su temperatura T_D. El resultado es un radio efectivo r_{eff} $(r;\ T_D) > r$. Para caracterizar el ETF, lo habitual sin embargo es refrigerar las piezas que delimitan la fuente o bien trabajar con $T >> T_D$ puesto que el ETF calculado según (1) es una característica propia de la óptica y no depende de la temperatura. Definiendo

$s^*(r, r_c) = s^*(r) - s^*(r_c)$, siendo r_c un radio de referencia que generalmente coincide con el utilizado en calibración, los valores s^* suelen ajustar bien a una función del tipo:

$$\sigma^*(r, r_c) = a\left(1 - e^{b_1(r_c - r) + b_2(r_c - r)^2}\right) \quad (2)$$

Los parámetros a, b_1 y b_2 se calculan por ajuste no lineal sobre los valores s^* medidos. En la práctica es necesario disponer de fuentes de radio variable suficientemente extensas para que $S(\infty)$ @ $S(r_{max})$. En este caso a @ 1 - $S(r_c)/S(r_{max})$ es una buena aproximación.

La corrección en temperatura DT_m, que es necesario aplicar a la lectura del TR (T_m) cuando pasamos de una fuente (a temperatura T y con emisividad efectiva e_a) de radio r_1 a otra de radio r_2, se calcula utilizando la expresión de Sakuma-Hattori para la señal del detector:

$$S \propto \frac{\varepsilon_a}{e^{\frac{c_2}{\lambda_x T}} - 1} \quad (3)$$

l_x (función de T) es la llamada longitud de onda efectiva extendida, dependiente de la respuesta espectral del detector y de la responsividad espectral del filtro [9]. De ahí se puede deducir la corrección a la indicación del TR:

$$\Delta T_m = -\left(1 - e^{-\frac{c_2}{\lambda_x T_m}}\right)\left(\frac{\lambda_x {T_m}^2}{c_2}\right)\sigma^*(r_1, r_2) \quad (4)$$

Para obtener (4) se asume que el TR es ajustado a un valor de emisividad instrumental $e_{instr} = 1$, con lo cual la indicación T_m es temperatura de radiancia.

3. Instalación para la investigación del ETF y resultados experimentales para TR

Se ha puesto en marcha una instalación para caracterizar el ETF en TR, que puede ser utilizada también para el estudio en detectores individuales o grupos en CT. El elemento principal es un CN de cavidad cilíndrica (esquema en la figura 5(b)) con e_a entre 0,9984 para r = 35 mm y 0,9999 para r = 5 mm. El CN está sumergido en un baño de aceite de silicona con un control PID, que permite mantener una temperatura uniforme y estable dentro de ± 0,005 ºC entre 30 ºC y 180 ºC. La medida de temperatura en el fondo de la cavidad se realiza con 2 termómetros de resistencia de platino (TRP) tipo Pt100 calibrados en el propio laboratorio y con trazabilidad a puntos fijos de la EIT-90. Para la variación del tamaño de la fuente se han fabricado aperturas de latón con diferentes diámetros y se ha instalado un sistema para su mantenimiento a temperatura controlada. En la figura 2 se muestra el sistema durante el proceso de medida con un TR. El ETF se caracteriza con el CN a 180 ºC y las aperturas se mantienen a 10 ºC. Esto garantiza que la contribución de los diafragmas a la radiancia total es despreciable frente a la del CN y por tanto r_{eff} @ r.

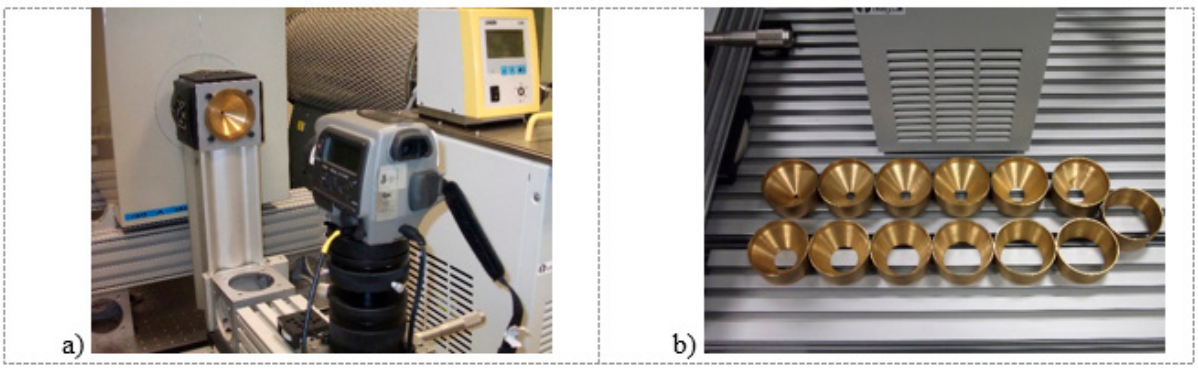


Figura 2. a) Soporte de las aperturas refrigeradas situado frente al CN y baño de recirculación para el mantenimiento a temperatura controlada. b) Conjunto de aperturas intercambiables construidas en latón.

3.1. Resultados experimentales

Se ha investigado el ETF en varios modelos de TR, poniéndose de manifiesto que existe bastante variabilidad. En la mayoría de los casos se observa que la señal tiende a un valor fijo para $r \geq r_{max}$, que en este caso es 35 mm. Sin embargo en algunos modelos esto no es así y requieren fuentes con aperturas mayores para caracterizar completamente su ETF.

Seleccionamos un TR de nuestro laboratorio (modelo C300 de Minolta/LAND) con anchura de banda 8-13 mm (l_x = 9,6 mm a 180 ºC) y radio de blanco r_b = 4,5 mm a 500 mm de la apertura del CN. La señal dada por (3) se corrige por dos efectos que aparecen al incrementar la apertura. Uno es la disminución de temperatura en la cavidad debida a una mayor disipación de calor por convección y radiación y el otro una menor radiancia al disminuir la emisividad efectiva. El primero es cuantificado con el Pt100 situado en el fondo de la cavidad y el segundo es obtenido teóricamente con un modelo de cálculo de la emisividad efectiva [10]. Para un radio de calibración (referencia) r_c = 15 mm, los resultados se muestran en la figura 3 junto a los de un TR (modelo UX40P de IRCON/FLUKE, r_b = 8,8 mm a 700 mm de distancia y banda 8-13 mm), con ETF considerablemente mayor.

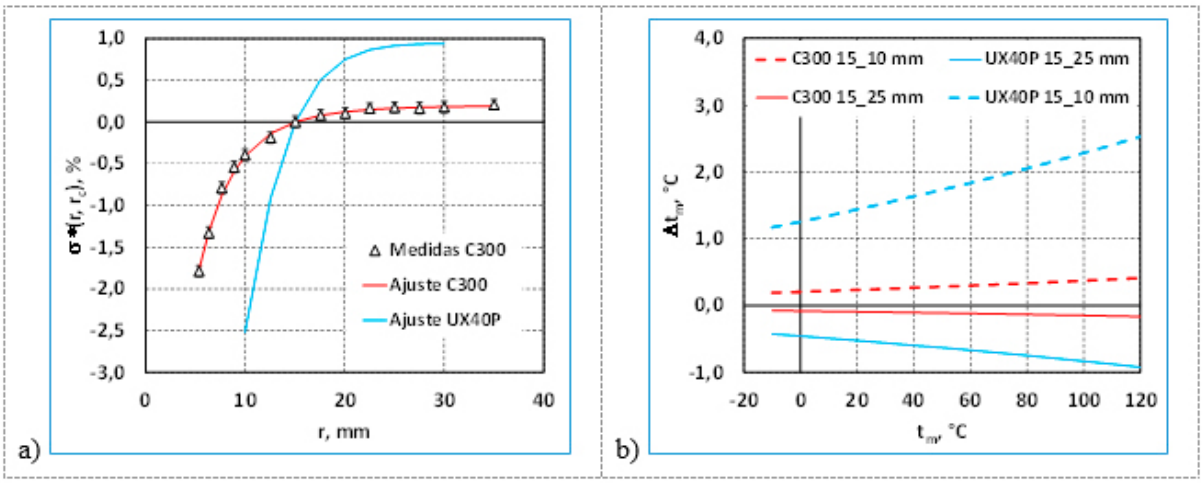


Figura 3. a) ETF de un TR C300 del laboratorio, comparado con el de un TR modelo UX40P, para aperturas de radio entre 5,35 mm y 35 mm. b) Correcciones en temperatura para ambos TR, entre una fuente de calibración de radio 15 mm y fuentes de 10 mm y 25 mm.

Aunque el ETF es relativamente fácil de analizar y cuantificar en el laboratorio con fuentes de CN muy uniformes y de tamaño bien definido, no está todavía suficientemente claro cómo trasladar las correcciones calculadas a medidas realizadas en las aplicaciones. Son muchos los usuarios que utilizan TR o incluso CT para calibrar sus propios CN, con lo cual es suficiente corregir entre radio de calibración y de uso. En este último caso el radio tendrá que ser efectivo puesto que el entorno térmico alrededor de los CN puede ser diferente. En medidas en campo se puede asumir que la fuente tiene radio infinito aunque generalmente no uniforme. Sería como considerar una fuente uniforme equivalente asociada a la distribución de temperatura real. La dificultad es mayor cuando interesa obtener mapas de distribución de temperatura con alta resolución espacial y térmica, como es cada vez más frecuente en aplicaciones con CT. En este caso aparecerá cierta correlación entre valores proporcionados por píxeles vecinos, lo cual afectará tanto a la resolución térmica como al valor de temperatura indicado.

4. Ejemplo de ETF en CT

Para aplicar el modelo a CT es necesario especificar el área del detector en el FPA. Puede ser un píxel individual con su indicación de temperatura o un conjunto de ellos y la temperatura media. En este caso seleccionamos una región (ROI) de 3x3 en el centro del FPA. Se trata de una cámara modelo FLIR A655sc con FOVH de 15º, resolución 640x480 píxeles y rango espectral 7,5-14 mm.

Se enfoca (en modo autofocus) sobre la apertura del CN a 500 mm de distancia. El IFOV correspondiente es 0,21 mm por lo que el blanco es un cuadrado de 0,63 mm de lado. Una vez caracterizado el ETF mediante una función equivalente a (2) se ha tratado de evaluar el efecto de la temperatura del entorno sobre la indicación de la CT en la región de interés ROI. La adquisición de datos se realiza con el *software* comercial: flir_researchir_max_4.40 [11]. Los resultados de la figura 4(a) muestran un comportamiento muy diferente a lo que suele ser habitual en TR ya que el radio máximo r_{max} no es suficiente para detectar una tendencia como en la figura 3. Esto significa que la función s^* que caracteriza el ETF en esta CT no puede tomar la forma (2).

Para CT otra forma de evaluar el ETF y que probablemente ilustra mejor el problema, es fijar la apertura (en este caso 6,25 mm de diámetro), variar la temperatura del diafragma y medir el efecto sobre la señal de la ROI. Se ha realizado entre 10 ºC y 50 ºC con la configuración experimental que se muestra en la figura 5(a). Esta prueba podría determinar, al menos de forma cualitativa, si las especificaciones de resolución térmica (o contraste térmico) de la CT dependen del campo de temperatura cubierto por todo el FOV. En todo caso un análisis completo exigiría modificar la temperatura del blanco, la posición de la región en el FPA y la distribución de temperatura en torno al blanco. En la figura 4(b) se observa claramente la correlación entre la temperatura media del diafragma y la leída por la CT en la ROI.

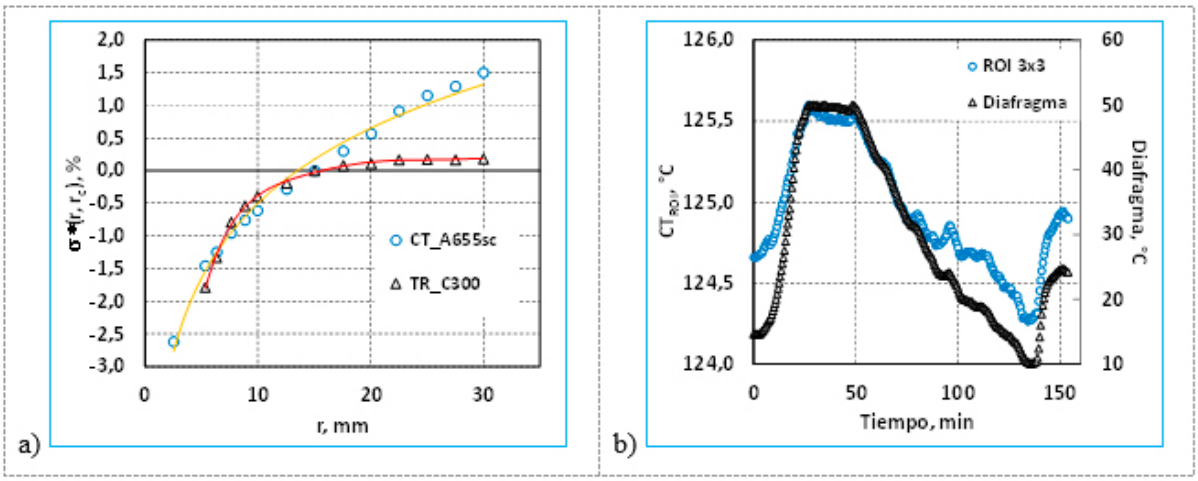


Figura 4. a) Comparación del ETF entre la CT y el TR modelo C300. b) Efecto de la temperatura de un diafragma de 50 mm de diámetro con apertura F=6,25 mm, sobre la indicación de la CT en la ROI de 3x3 píxeles (0,63 mm de lado).

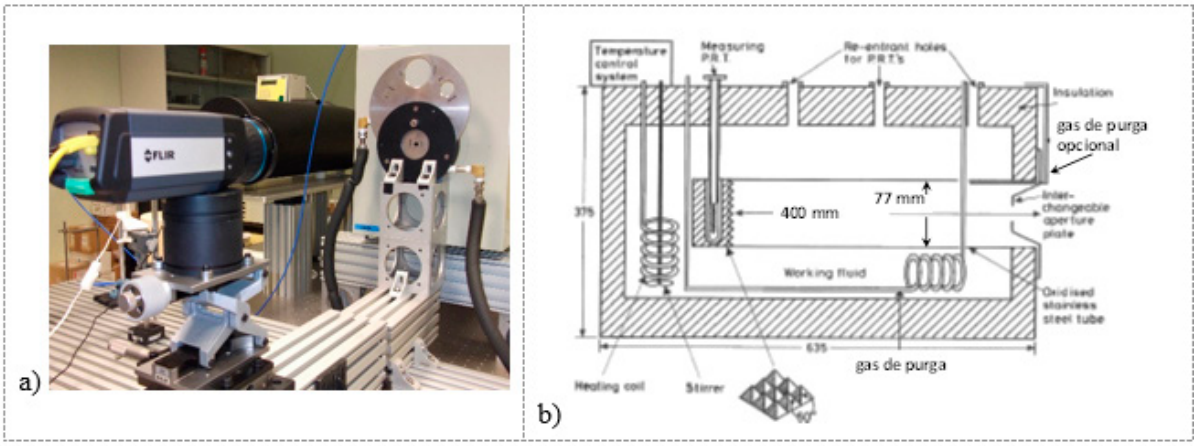


Figura 5. a) CT modelo FLIR A655sc posicionada frente al CN e instalación de la apertura a temperatura controlada. b) Esquema del CN patrón utilizado en la investigación del ETF.

5. Conclusiones

El ETF en TR y CT es una de las contribuciones principales a la incertidumbre de medida, tanto en calibración como en el uso posterior de estos instrumentos. Su completa caracterización facilita la corrección de los valores de temperatura, aunque no elimina del todo la incertidumbre. Tanto en TR como en aplicaciones cuantitativas de CT en todos los ámbitos, en las que se mide temperatura sin contacto, se exige cada vez una menor incertidumbre en la medida. Por otro lado, para aplicaciones cualitativas de CT es necesario generar imágenes térmicas con mejor resolución. Otras contribuciones, tales como: emisividad, temperatura ambiente, absorción atmosférica, etc. son tenidas en cuenta habitualmente y corregidas en función de la información disponible sobre el entorno o escena térmica.

En la mayoría de los casos, el ETF puede analizarse en condiciones de laboratorio, con fuentes de CN bien caracterizadas, estables y uniformes y entornos térmicos (ambientales) a temperatura baja o controlada. Sin embargo, en las aplicaciones es difícil de cuantificar y corregir, ya que conceptos tales como tamaño de fuente, radio efectivo, temperatura de diafragma, etc. no son extrapolables de forma inmediata. Es preciso por tanto seguir investigando a cerca del efecto que tienen campos o escenarios térmicos no uniformes sobre la indicación de píxeles individuales o grupos. Para ello será probablemente necesario calcular radios efectivos (considerando fuentes uniformes equivalentes) correspondientes a cada distribución espacial de temperatura. El uso de CN de cavidad de gran área y aperturas con un control espacial del gradiente, será en todo caso imprescindible. Aplicando procedimientos como el descrito en este trabajo podemos determinar, aunque sea de forma más cualitativa que cuantitativa, si el ETF está presente y si puede constituir una limitación en las especificaciones para una CT particular.

Referencias

1. *Grgić, G. and Pušnik, I. Analysis of Thermal Imagers, Int J Thermophys (2011) 32: 237.*
2. *Fletcher, T., Whittam, A., Simpson R., and Machin, G. Comparison of non-contact infrared skin thermometers, Journal of Medical Engineering & Technology, (2018) 42:2, 65-71.*
3. *Cardone, D. and Merla, A. New Frontiers for Applications of Thermal Infrared Imaging Devices: Computational Psychopshysiology in the Neurosciences, Sensors (2017), 17(5), 1042.*
4. *Akula, A. Ghosh, R. and Sardana, H. K. Thermal Imaging And Its Application In Defense Systems, Optics: Phenomena, Materials, Devices, and Characterization, AIP Conference Proceedings, (2011) 1391, 333.*
5. *McMillan, J. L., Whittam, A., Rokosz, M., and Simpson, R. C. Towards quantitative small-scale thermal imaging, Measurement, Volume 117, March (2018), 429-434.*
6. De Lucas, J. Infraestructura metrológica para la caracterización de fuentes de radiación utilizadas en calibración de sistemas de termometría y termografía infrarroja, Actas del V Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad (DESEi+d 2017), Toledo 22 a 24 de noviembre de 2017.
7. *Adibekyan, A., Kononogova, E., Monte, C. et al. High-Accuracy Emissivity Data on the Coatings Nextel 811-21, Herberts 1534, Aeroglaze Z306 and Acktar Fractal Black, Int J Thermophys (2017) 38: 89.*
8. *Saunders, P. and Edgar, H. On the characterization and correction of the size-of-source effect in radiation thermometers, Metrologia 46 62, (2009).*
9. *Saunders, P. General interpolation equations for the calibration of radiation thermometers, Metrologia 34 201, (1997).*
10. *De Lucas, J. Cálculo de la emisividad efectiva en cavidades de cuerpo negro cilíndricas cónicas y cilindro-cónicas. Modelos y aplicaciones a la termometría de radiación [Tesis Doctoral]. Universidad de Valladolid, (2016).*
11. *https://www.flir.es/products/researchir/*

Proyecto de mejora del telescopio TFRM en el marco de apoyo SST de la UE

Canals Ros, Lluís[1,*], Núñez de Murga, Jorge[2], López Morcillo, Ricardo[1], Del Ser Badia, Daniel[2], Merino Espasa, María Teresa[2]

[1] Real Instituto y Observatorio de la Armada. San Fernando 11110, Cádiz, España.

[2] Observatori Fabra, RACAB y Departament de Física Quàntica i Astrofísica i ICC, Universitat de Barcelona (UB/IEEC). Av. Diagonal 647, Barcelona 08028, España.

* Autor principal y responsable del trabajo; lcanals@roa.es

Resumen

El telescopio Fabra-ROA en el Montsec (TFRM) ha demostrado su capacidad como sensor de vigilancia y seguimiento como prueba su participación en proyectos españoles y europeos de vigilancia y seguimiento espacial (SST, por sus siglas en inglés), en particular la iniciativa EU SST de la Unión Europea [1].

Por su gran campo de visión (FoV, por sus siglas en inglés) el TFRM es un telescopio especialmente indicado para labores de vigilancia, aunque su *software* de control y su *software* de procesado de imágenes «siguiendo al objeto», le permiten hacer seguimiento en cualquier tipo de órbita.

En la determinación de la posición astrométrica de objetos en órbitas bajas, se necesita una precisión en la medida del tiempo por debajo del milisegundo, debido a la enorme velocidad de los objetos en estas órbitas. Esto es necesario para que la incertidumbre en la determinación de la posición introducida por el sistema de etiquetado de tiempo, sea del mismo orden que la inherente al proceso de reducción astrométrica. Por ejemplo, para un satélite que tiene una velocidad angular aparente en el cenit de unos 2.500 arcsec/s, una precisión en tiempo del orden de las centésimas de segundo, implica una incertidumbre en su posición de 25 arcsec, que es un orden de magnitud superior a la incertidumbre típica astrométrica e inaceptable para una determinación precisa de la órbita.

La principal limitación de los telescopios en el etiquetado de tiempo de las imágenes son las incertidumbres introducidas por los obturadores mecánicos de las cámaras CCD. Estas incertidumbres son del orden de la centésima de segundo y por tanto, inutilizan el telescopio para su uso en labores de seguimiento en órbitas bajas. Así pues, es necesaria la utilización de cámaras CCD con obturación electrónica, ya que, tienen una incertidumbre en la medida del inicio y fin de la imagen muy por debajo del milisegundo.

Palabras clave

Vigilancia y seguimiento espacial (SST), desechos espaciales, telescopios, ccd, astrometría.

1. Introducción

El telescopio Fabra-ROA en el Montsec (TFRM) [2] es el resultado de la remodelación de la cámara Baker-Nunn [3], cámara utilizada para el seguimiento de satélites artificiales. La mayor virtud del telescopio es su gran campo de visión con una relación focal de f/1. Para aprovechar al máximo este campo de visión con sensores CCD de gran formato, se realizó un nuevo diseño óptico. Para ello se creó una araña y una carcasa con óptica correctiva. El foco principal donde se encuentra la cámara CCD está en el interior del tubo del telescopio y, obviamente, no es posible usar dos cámaras al mismo tiempo. Desde la inauguración del telescopio en septiembre de 2010 hasta febrero de 2016, el TFRM operó con una cámara FLI PL16803, equipada con un obturador mecánico, que proporciona un campo de visión de $4{,}4^{o}x4{,}4^{0}$ (19,4 grados cuadrados).

En febrero de 2016 se instaló una nueva cámara CCD, la FLI PL29050. Debido a la gran velocidad de los objetos situados en órbita LEO (*Low Earth Orbit*, por sus siglas en inglés), de entre 88 y 127 minutos de periodo orbital, es necesario una gran precisión en el etiquetado temporal de la imagen, ya que así se conseguirá la suficiente precisión en la posición de dicho objeto. Dicha cámara cuenta con un obturador electrónico que nos elimina la incertidumbre en la apertura y cierre de un obturador de tipo mecánico y nos da la suficiente precisión en el etiquetado temporal de la imagen. Esta cámara nos ofrece también un gran campo de visión de $4{,}3^{o}x2{,}9^{o}$ (12,47 grados cuadrados).

Durante la realización de exploraciones en el anillo geoestacionario se observó que aunque el rendimiento en el número de detecciones obtenidas no varió sustancialmente, la magnitud límite de los objetos detectados era significativamente menor. Aunque la magnitud aparente en las actividades de seguimiento y vigilancia espacial es muy relativa y depende de factores externos al sistema óptico, como el ángulo de fase, la geometría del objeto y la configuración del programa de reducción de acuerdo con el brillo del cielo y las condiciones meteorológicas de la noche, los resultados indicaron que el TFRM, usando la PL29050, perdía casi una magnitud con respecto a la anterior PL16803 (aproximadamente desde una magnitud límite de 16,5 V a 15,5 V, para un mismo tiempo de exposición de 12s). Esta inesperada disminución de magnitud probablemente se debía a la combinación del efecto negativo de la gran amplitud de la trayectoria óptica de un telescopio con una relación focal f/1 con las microlentes delante de cada píxel del chip de *interline* KAI-29050.

Teniendo en cuenta que la misión principal del TFRM es la de un telescopio de vigilancia [4], en febrero de 2017, decidimos volver a instalar la PL16803, aunque como consecuencia negativa se perdiera la capacidad de seguimiento de objetos LEO.

Dado el creciente interés en el seguimiento de objetos en órbita LEO por telescopios, parece muy interesante recuperar dicha capacidad desde el TFRM mientras se mantiene, o incluso se mejora, el rendimiento máximo en tareas de vigilancia.

Por lo tanto, el objetivo principal del proyecto de mejora es restaurar la capacidad del TFRM para realizar observaciones de seguimiento de objetos LEO y, asimismo, mejorar su rendimiento en operaciones de vigilancia en el anillo GEO. Para ello se colocó una cámara adicional, llamada «Pi-

ggyBack Camera», con obturador electrónico, unida externamente al tubo del telescopio como una cámara superpuesta, y se modificó el *software* de control para poder para usar ambas cámaras, en modo remoto y robótico.

2. Componentes

2.1. Óptica

A fin de cubrir ambos objetivos del proyecto, observar objetos LEO y apoyar las exploraciones del anillo GEO, se necesitaba una óptica lo más grande posible, pero con una relación focal lo más rápida posible. Por lo tanto, una lente con una distancia focal de aproximadamente 500 mm era la mejor opción.

Se barajaron varias opciones dentro de las posibilidades que ofrecía en mercado. Entre ellas se consideró la Canon EF 500 mm f/4L IS II USM, la Canon EF 400 mm f/2.8L IS II USM y la Nikon AF-S NIKKOR 400 mm f/2.8E FL ED VR. El primero con una distancia focal de 500 mm daría la misma distancia focal que el TFRM pero con una relación focal f/4 presentaba una apertura de 12,5 cm. El segundo con una distancia focal de 400 mm es un poco más corto, pero con una relación focal de f/2,8 presentaba una apertura de 14,3 cm que representa un 30 % más de superficie de recolección, equivalente a 0,3 mag en magnitud límite. Finalmente, el tercero es idéntico al segundo pero de la marca Nikon. La tabla 1 resume las características de las opciones.

Óptica	**Apertura (mm)**	**Distancia focal (mm)**	**Relación focal**
Canon EF 500 mm f/4L IS II USM	125	500	4
Canon EF 400 mm f/2.8L IS II USM	143	400	2,8
Nikon AF-S NIKKOR 400mm f/2.8E FL ED VR	143	400	2,8

Tabla 1. Cuadro resumen de las características de las ópticas

Tras varias consideraciones y favoreciendo una mayor apertura y una relación focal mínima, se escogió la óptica de Canon, modelo EF 400 mm f/2.8L IS II USM, lente con una focal de 400 mm y una apertura de 14,3 cm y una relación focal de f/2.8

Adicionalmente se montó un interfaz entre la óptica y la cámara CCD para poder enfocar remotamente. Se trata de un «Birger Canon EF Lens Interface» que se comunica con un ordenador de control mediante una conexión USB.

2.2. Cámara CCD

La elección de la cámara CCD, expuestas anteriormente las necesidades del proyecto, debía contar con obturador electrónico, un campo de visión lo más grande posible y una fácil y rápida integración del nuevo *software* en el sistema. Dadas tales premisas, y ya que el TFRM montaba una cámara Finger Lakes Instrumentation (FLI) se decidió buscar la mejor opción dentro de esa misma marca.

Se barajaron las opciones disponibles entre los chips *Interline Transfer Full Size*, KAI-29050 o KAI-29052 de 6576x4384 píxeles de 5,5 µm; KAI-11002 de 4008x2672 píxeles de 9 µm; KAI-16070 de 4864x3232 píxeles de 7,4 µm o KAI-16000 de 4872x3248 píxeles de también 7,4 µm. Mientras que el segundo, el tercero y el cuarto tienen la ventaja de tener menos píxeles y, por lo tanto, las imágenes ocupan menos espacio en disco y se procesan de manera más rápida, el primero tiene una mayor resolución espacial. Teniendo esto en cuenta, se escogió el KAI-29052 ya que contaba con una mayor eficiencia cuántica sobre el KAI-29050.

El cuerpo de la cámara CCD se decidió que fuera el modelo MicroLine también de FLI. Es un modelo más compacto que el ProLine montado en el TFRM, por lo que es menos pesado, pero manteniendo las mismas prestaciones, como número de unidades USB, velocidad de descarga de las imágenes o la

capacidad de montar refrigeración líquida mediante glicol, pudiendo así aprovechar el circuito existente para la cámara del TFRM.

La combinación de la lente Canon EF 400 mm f/2.8L IS II USM y la cámara FLI ML29052 proporciona un campo de visión de 5,3ºx3,5º (18,55 grados cuadrados) con una escala de 2,90 arcsec/pixel. Este campo de visión es muy similar (96 %) al del telescopio TFRM.

2.3. Montura

Para montar el conjunto (cámara CCD + óptica) al telescopio principal, se diseñó e instaló un adaptador y sus contrapesos correspondientes. El adaptador fue diseñado con el fin de soportar lo más rígidamente posible el sistema de óptica y cámara, manteniendo la suficiente versatilidad para moverse fácilmente de una posición a otra, así se podía apuntar de forma paralela o hacia un lugar diferente respecto del telescopio principal TFRM.

El adaptador fue diseñado y fabricado por el Instituto de Ciencia Fotónica (ICFO) [6] con la ayuda de la empresa Tecnifil S.C.P. Su diseño permite ajustar la inclinación de todo el sistema para cumplir con los requisitos de apuntado. Además un sistema preciso permite, también, ajustar la distancia entre la nueva cámara y el telescopio principal.

Una parte crítica del montaje fue la instalación y los ajustes de los contrapesos para reequilibrar el conjunto una vez instalado el adaptador en el telescopio principal TFRM. Se necesitaba mantener la estabilidad en el movimiento y la precisión en la puntería originales, una vez añadida la cámara *PiggyBack*.

Contando los contrapesos y la propia cámara, se añadieron unos 80 kg aproximadamente al tubo del TFRM.

2.4. Desarrollo del software

Para poder controlar tanto remota como robóticamente el nuevo sistema, se desarrolló una nueva versión del *software* del TFRM para poder operar de forma tanto simultánea como de manera independiente la nueva cámara y la cámara principal del TFRM.

Se modificó el cliente gráfico ObsCam (control de las cámaras CCD) para usar la cámara y obtener imágenes de forma remota. Este permite elegir entre la cámara principal del TFRM y la *PiggyBack* mediante un desplegable. Ambas cámaras funcionan de forma independiente utilizando partes separadas del código fuente y guardando las imágenes en sus correspondientes ordenadores de control. Por lo tanto, se pueden usar por separado o al mismo tiempo.

De la misma manera, INDI [5], a través del programa que ejecuta las órdenes para llevar a cabo las observaciones de forma automática puede usar la nueva cámara para realizar la observación de manera robótica. Así pues se puede configurar la nueva cámara para cada observación de manera automática e independiente a la principal del TFRM. Por lo tanto, el nuevo *software* permite ahora, operar la *PiggyBack* tanto para realizar seguimientos de objetos LEO, como para realizar operaciones de vigilancia con ambas cámara a la vez.

Es importante señalar que el nuevo *software* permite introducir un desplazamiento en la orientación del montaje del TFRM para seguir cualquier objeto en órbita LEO con la *PiggyBack* sin ningún cambio físico en la configuración de ambas cámaras. Además, el *software* tiene en cuenta dicho desplazamiento para introducir el apuntamiento correcto de la nueva cámara en la cabecera de las imágenes.

3. Primera luz y resultados

En la mañana del 2 de diciembre de 2017 se obtuvo la primera luz con el nuevo sistema. La figura 1 muestra una imagen completa de todo el campo de visión de 5,3x3,5 grados de la galaxia M51 y una ampliación de la misma galaxia.

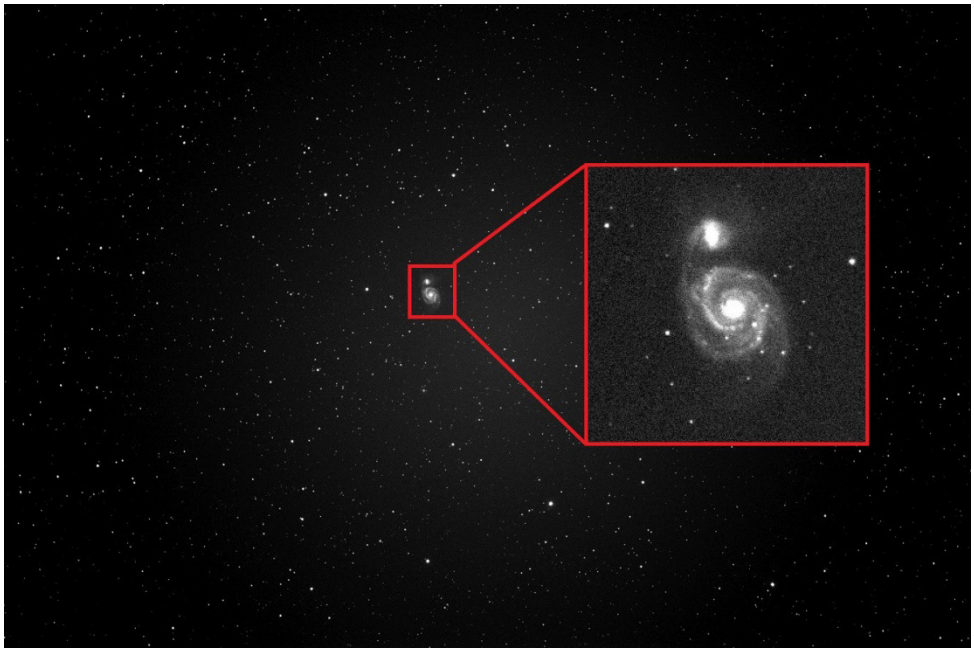


Figura 1. Imagen de la primera luz de la cámara PiggyBack.

3.1. Operaciones de seguimiento

En la figura 2 se muestra una exposición de 10 segundos a telescopio parado de una parte del anillo GEO observada simultáneamente por ambas cámaras, la principal del TFRM con una escala de 3,88 arcseg/pixel (izquierda) y la nueva cámara *PiggyBack* con una escala de 2,90 arcseg/pixel (derecha) usando la configuración en paralelo.

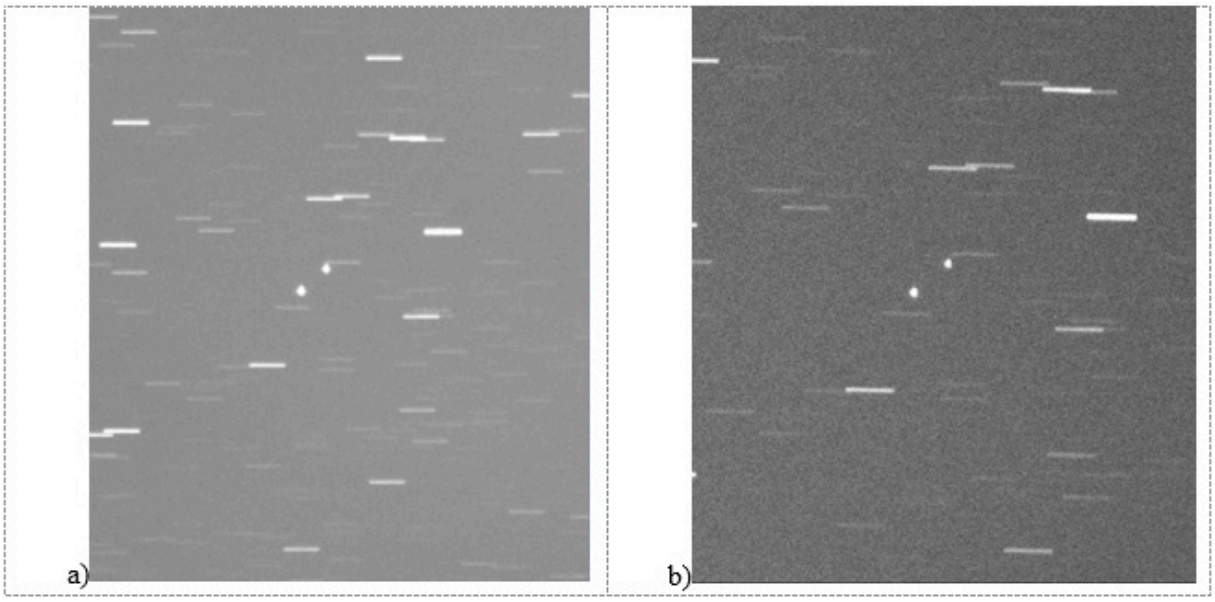


Figura 2. a) Imagen tomada con la cámara principal del TFRM. b) Imagen tomada con la PiggyBack.

En la figura 3 se muestra una imagen de 3 segundos de exposición con la *PiggyBack* realizando un seguimiento sobre el satélite GPS NAVSTAR-61.

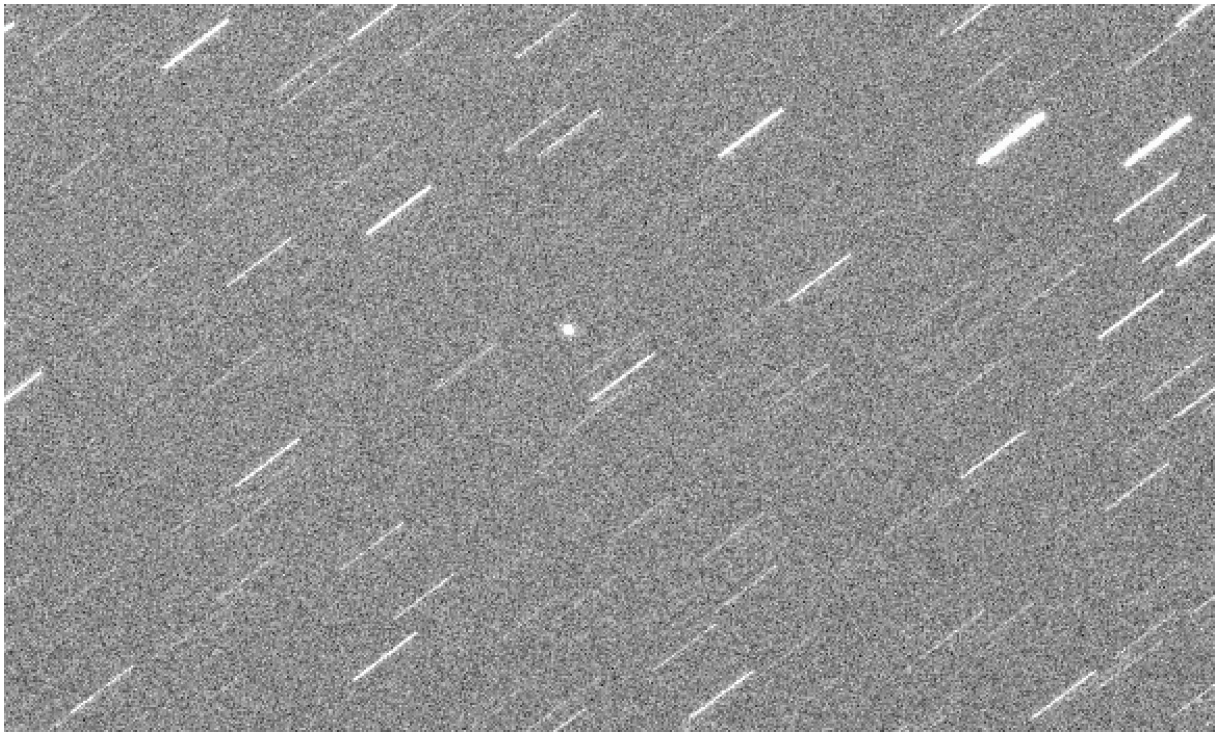


Figura 3. Imagen del seguimiento de un satélite GPS con la PiggyBack.

En la figura 4 se muestra una exposición realizada con la *PiggyBack* de 0,1 segundos de exposición del satélite COSMOS-1666 en órbita LEO. Rodeado en verde el satélite en seguimiento y en rojo las trazas de las estrellas.

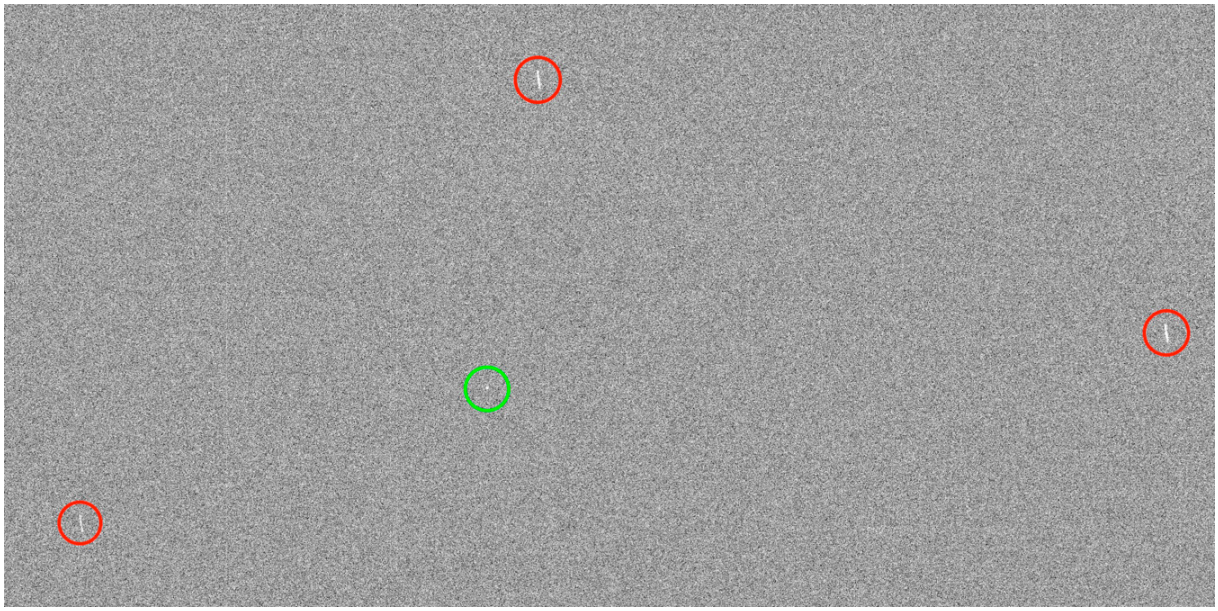


Figura 4. Imagen del seguimiento de un satélite LEO con la PiggyBack.

Los objetos en órbita LEO son mucho más rápidos que los objetos en órbitas más altas, y por esa razón usando un obturador electrónico (elimina el sesgo de tiempo introducido por el obturador mecánico) se consigue mayor precisión en la posición. La imagen se obtiene siguiendo al objeto (usando los TLE), y para el caso de los LEO, se utilizan tiempos de exposición más cortos para evitar que las trazas de las estrellas sean demasiado largas, cuya consecuencia sería una menor precisión en la reducción as-

trométrica. Debido a que la luz de la estrella está por encima de un píxel determinado durante un breve momento no se ganaría nada en magnitud límite. Así, la solución de compromiso es conseguir detectar el objeto a seguir con un tiempo de exposición lo más corto posible.

3.2. Operaciones de exploración del anillo GEO

Para comparar el nuevo sistema (*PiggyBack*) con la cámara principal del TFRM, se llevó a cabo una observación de exploración del anillo geoestacionario de manera simultánea con ambas cámaras en la configuración en paralelo. En esta configuración, ambas cámaras observan más o menos la misma parte del cielo, en consecuencia los mismos objetos, y los resultados se pueden comparar directamente.

Los resultados muestran que, aproximadamente, la *PiggyBack* detecta el 75 % de los objetos encontrados por la cámara principal del TFRM. Las razones son principalmente dos. La primera que la *PiggyBack* no detecta los objetos más débiles (por encima de magnitud 14,5) y la segunda se debe a que el campo de visión de la *PiggyBack* es un 95,8 % de total de la cámara principal del TFRM.

4. Conclusiones

Con la instalación de la *PiggyBack* (lista para su integración operativa en diciembre de 2017) se ha conseguido mejorar las prestaciones del telescopio TFRM restaurando su capacidad para observar objetos en órbita LEO y aumentando el rendimiento en número de objetos detectados durante las operaciones de exploración del anillo GEO.

Las observaciones llevadas a cabo, tanto en seguimiento de objetos LEO, como en exploraciones del anillo GEO confirmaron que el nuevo sistema proporciona una precisión astrométrica de aproximadamente 1 arcseg, compatible con la escala de 2,90 arcseg/pixel y un sesgo de tiempo medio de cero.

	TFRM	**TFRM /PIGGYBACK**
Tipo de órbita	GEO/MEO/HEO	GEO/MEO/HEO/LEO
Capacidad LEO	No	Sí
Configuraciones	1	2 (paralelo y 5º inclinación)
Sesgo de tiempo (s)	~ 0.050	~ 0,050 / < 0,001
Precisión astrométrica	Sobre 0,7 arcsec	Sobre 0,7 arcsec/0,5 arcsec
Magnitud límite	~ 16	~ 16/14,5
Escala	3,88 arcsec/pixel	3,88 y 2,90 arcsec /pixel
Tasa de objetos por hora en exploración GEO	70-75 objetos/hora	120-130 objetos/hora
Tasa de posiciones por minuto en seguimiento	10 posiciones/min	20 posiciones/min (en paralelo)
Velocidad de movimiento sistema	4 º/s	4 º/s
Precisión apuntado	Sobre 1 arcmin	Sobre 1 arcmin
Estabilidad del sistema	Buena	Buena

Tabla 2. Cuadro resumen de los resultados del proyecto.

Agradecimientos

El presente proyecto queda enmarcado dentro de los estudios complementarios de mejora del telescopio TFRM aportados por España al marco de apoyo de SST de la UE (establecido por la Decisión 541/2014/

UE [1]) liderado en España por CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial) dependiente del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Ha recibido financiación del programa de la Unión Europea Horizonte 2020 de investigación e innovación con el contrato No 713762.

Referencias

1. *DECISION No 541/2014/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 April 2014 establishing a Framework for Space Surveillance and Tracking Support.*
2. *Telescope Fabra ROA Montsec (TFRM): A refurbished Baker-Nunn Camera [Internet]. [citado 2018 Ago 26]. Disponible en: http://www.am.ub.edu/bnc/*
3. *Heinze K.G. The Baker-Nunn Satellite-Tracking Camera, Sky and Telescope, 1957, 16 n.º 3, 108-111.*
4. Montojo F.J, Catalán M, Núñez J, Canals Ll, López R, Pazos A. Actividades del Real Instituto y Observatorio de la Armada en Vigilancia y Seguimiento Espacial (SST): TFRM y Estación Láser. IV Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad (DESEi+d 2016).
5. *Downey E. INDI Control System Architecture. Clear Sky Institute, Inc. 2011.*
6. *Instituto de Ciencia Fotónica ICFO [Internet]. [citado 2018 Sep 05]. Disponible en: https://www.icfo.eu/*

Adquisición automática de blancos IR en entornos navales

Giménez Romo, Jorge[1,*] y González Lomas, Jesús[2]

1 Tecnobit. Director Proyectos. Marie Curie 19, Rivas-Vaciamadrid. jggimenez@oesia.com

2 Tecnobit. Responsable IRST. Marie Curie 19, Rivas-Vaciamadrid. jgonzalezlo@oesia.com

* Autor principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: jggimenez@oesia.com

Resumen

Los sistemas IRST (*Infrared Search and Track*) presentan ventajas operativas y de prestaciones que los hace muy interesantes para la detección de objetivos. En particular, en buques como la F-110, son un complemento excelente para la detección de blancos de baja firma radar como los RPA y los misiles antibuque rozaolas, donde el resto de sensores pueden tener más dificultades.

La automatización de la operación de estos sistemas y sobre todo el nivel de falsas alarmas, han sido tradicionalmente las causas por la que la utilización de este tipo de sistemas se ha visto reducida hasta el momento.

Tecnobit ha conseguido, mediante la aplicación de algoritmos basados en inteligencia artificial a la tarea de determinación de tipo de blanco, la reducción del nivel de falsas alarmas a un punto que lo hacen adecuado para la operación de este tipo de sistemas de forma automática.

Palabras clave

IRST, F-110, MWS, IR, FAR.

1. Introducción

Los sistemas IRST se basan en la detección de la firma infrarroja de objetos para proporcionar un medido de adquisición y seguimientos de blancos de interés. Este tipo de sistemas tiene la ventaja fundamental de ser completamente pasivos.

La furtividad de estos sistemas tiene dos ventajas operativas:

- Impiden la detección de la plataforma propia debido a las emisiones (radar).
- Son inmunes a los sistemas de guerra electrónica de otras plataformas.

Esta indudable ventaja operativa solo se puede explotar si el sistema se comporta de forma fiable y repetitiva en todos los entornos operativos de forma automática, haciendo que sea independiente del operador humano el proceso de detección de blancos.

En particular, los entornos navales tienen unas peculiaridades de reflexiones y diferentes tipos de objetos que hacen particularmente complicado la detección de objetos debido a la gran cantidad de fenómenos que pueden conducir a la declaración de una falsa alarma. Dichas falsas alarmas tienen muy diferentes orígenes, tales como:

- Nubes.
- Reflexiones en la superficie marina.
- Objetos en la costa.
- Animales, en particular aves volando a baja cota.

El proceso de detección de blancos desarrollado por Tecnobit consigue una tasa de falsas alarmas por debajo del 1 %, lo que permitirá que el sistema IRST de la F-110 funcione de forma automática y de esta forma proveer la ventaja operativa de un sistema IRST.

El desarrollo realizado divide la adquisición de blancos en dos etapas denominadas detección y clasificación, que se re alizan automáticamente sin la intervención del operador.

1.1. Detección automática

La función de detección realiza la segmentación de la imagen recibida, seleccionando de entre todos los datos, los candidatos más probables a ser la detección de un objeto real. Esta selección es particular dependiendo de las necesidades del sistema, por lo que se debe adaptar a la aplicación específica.

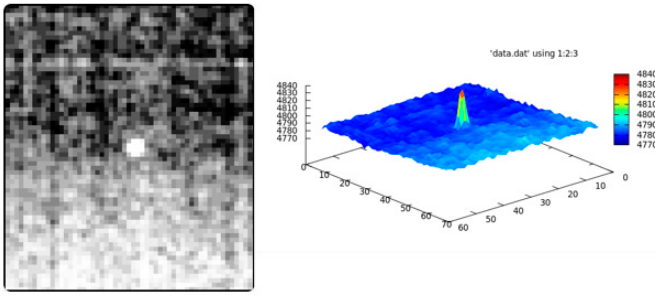


Figura 1. Firma IR blanco.

Dada la naturaleza de esta función, que debe aplicarse a todos los pixeles de la imagen en tiempo real, la adaptación a la aplicación debe elegirse cuidadosamente para tener una buena relación entre tiempo de procesamiento y selección de objetos.

Asimismo, esta función debe tener en cuenta las diferentes firmas que todos los objetos pueden presentar a las diferentes distancias y teniendo en cuenta los fenómenos atmosféricos que atenúan la señal que llega hasta los sensores.

Con este proceso de reducen la cantidad de elementos a tratar por el resto del sistema desde los millones de pixeles que tiene la imagen hasta unos centenares o pocos miles en cada imagen.

Este proceso de detección ajusta de forma que se obtenga un nivel de falsas alarmas constantes (CFAR) y que se determina en función del proceso estocástico determinado por la naturaleza del fenómeno físico y de las prestaciones del sistema electroóptico.

1.2. Clasificación

La función principal del bloque de clasificación, es la de decidir si una detección es considerada como verdadera para enviarla a la función de seguimiento o bien descartarla como falsa.

Para asegurar que el sistema IRST tenga una tasa general de falsas alarmas operativa, la salida del clasificador de tener una alta fiabilidad. Para evaluar la calidad de la clasificación, se definen tres parámetros fundamentales de calidad:

- **Probabilidad de falsa alarma o PFA:** es la probabilidad de clasificar como verdadera una detección que en realidad es falsa.
- **Probabilidad de pérdida o PMD:** es la probabilidad de clasificar como falsa una detección que en realidad es verdadera.
- **Probabilidad total de error o PTE:** es la probabilidad de que la clasificación de una detección sea errónea, bien cuando se clasifica como verdadera siendo falsa, o bien cuando se clasifica falsa siendo verdadera.

Para conseguir un bloque clasificador con buenas prestaciones es necesario que estas tres probabilidades sean lo más pequeñas posibles y que estén equilibradas la probabilidad de falsa alarma y de pérdida de detección.

La función de clasificación se lleva a cabo utilizando toda la información disponible de la detección para clasificarla como probablemente proveniente de un objeto de interés o no.

Este tipo de funcionalidad se puede implementar mediante múltiples aproximaciones, tales como filtros ajustados adaptativos, filtros espacio-temporales, etc.

Uno de los métodos más habituales es el algoritmo RX, llamado así por sus inventores Reed and Xiaoli Yu. Este método es un algoritmo que intenta conseguir una tasa constante de falsas alarmas (CFAR). Básicamente este algoritmo trata de correlar la firma del blanco en la zona de la imagen seleccionada, mediante la supresión del *background*

Para cada elemento de la imagen, este algoritmo implementa un filtro de media según la siguiente formulación:

$$r = (x' - m)\emptyset(x' - m)$$

donde

m es la estimación de la media local de los ocho pixeles adyacentes

Φ es la matriz de covarianza estimada espacio-temporalmente.

Este es un método que da buenos resultados, teniendo en cuenta que se mantiene un nivel de falsas alarmas constante y que esto limita de alguna forma la sensibilidad del sistema.

Tecnobit ha mejorado la función anterior de clasificación mediante el uso de redes neuronales. Las redes neuronales son un operador matemático que es capaz de codificar reglas extremadamente complejas, que son difícilmente describibles de forma analítica, tal como es esa matriz de covarianza.

La complejidad y profundidad de la red neuronal a aplicar depende del tipo de datos, las muestras obtenidas, el tipo de clasificación a efectuar y del procediendo de entrenamiento a utilizar junto con la repetitividad del mismo.

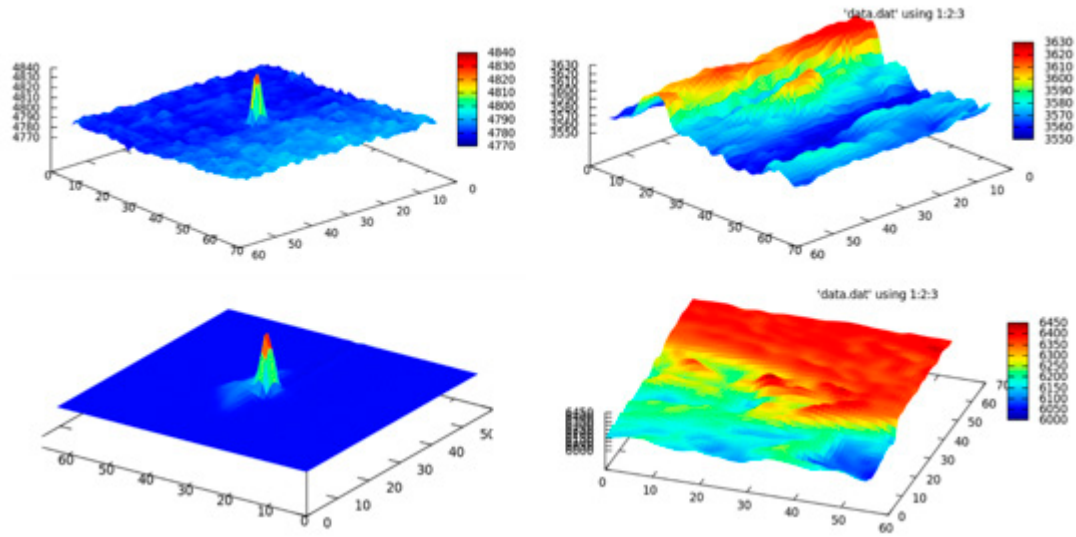


Figura 2. Ejemplos de detecciones.

2. Clasificador

Como ya se ha comentado, el clasificador es el encargado de realizar el reconocimiento de todas las detecciones, clasificando como verdaderas aquellas que tengan o cumplan unas características concretas que diferencian los blancos reales de los que no lo son, como la forma, el tamaño, texturas y otros parámetros específicos. Para ello, este elemento hace uso de un conjunto de redes neuronales artificiales tipo Perceptrón multi-capa o MLP (*Multi-Layer Perceptron*).

Su funcionamiento se basa en la utilización de algoritmos de «aprendizaje profundo» a diferentes niveles. El funcionamiento de estas redes se basa, en un proceso de entrenamiento previo con tanto los blancos como las falsas alarmas clasificadas, de forma que los coeficientes de la red neuronal se ajustan para proveer la mejor aproximación de los resultados al conjunto de la muestra.

2.1. Redes neuronales Perceptrón multi-capa (MLP)

El modelo de redes neuronales que se han utilizado es el de Perceptrón multi-capa con propagación hacia delante. En este tipo de redes neuronales, la información fluye desde las entradas hacia las salidas, atravesando capas intermedias de neuronas, llamadas capas ocultas.

Las entradas son todos los píxeles que conforman la propia imagen de la detección ordenados vectorialmente, mientras que la única salida es el resultado de la clasificación: verdadero o falso. Cada una de las neuronas que conforman la red neuronal, realiza una operación sobre el vector de sus entradas llamada de «excitación», y a continuación aplica una función de filtrado denominada de «activación» para obtener una salida concreta, que puede ir a la entrada de una neurona de la siguiente capa, o bien ser la salida final. La función de excitación más común, y la usada en este sistema, es la de una combinación lineal simple de las entradas, descrita por un sumatorio de las entradas multiplicadas por ciertos pesos «Wk», más un término de corrección o «bias». Por su parte, para la función de activación, se ha

usado una función tangente hiperbólica sigmoidal (tansig) cuya salida se encuentra entre -1 y +1. Las operaciones llevadas a cabo en una neurona o perceptrón i, de la capa j, a la que le llegan k entradas, queda descrita por:

$$outj(i) = tansig\left(\sum_{k=1}^{K\ entradas} W_{j-i-k} \cdot X_k + bias_{j-i}\right)$$

Para la aplicación naval, las redes neuronales MLP utilizadas tienen varias capas ocultas y una capa de salida. La siguiente figura, muestra la estructura genérica de redes MLP.

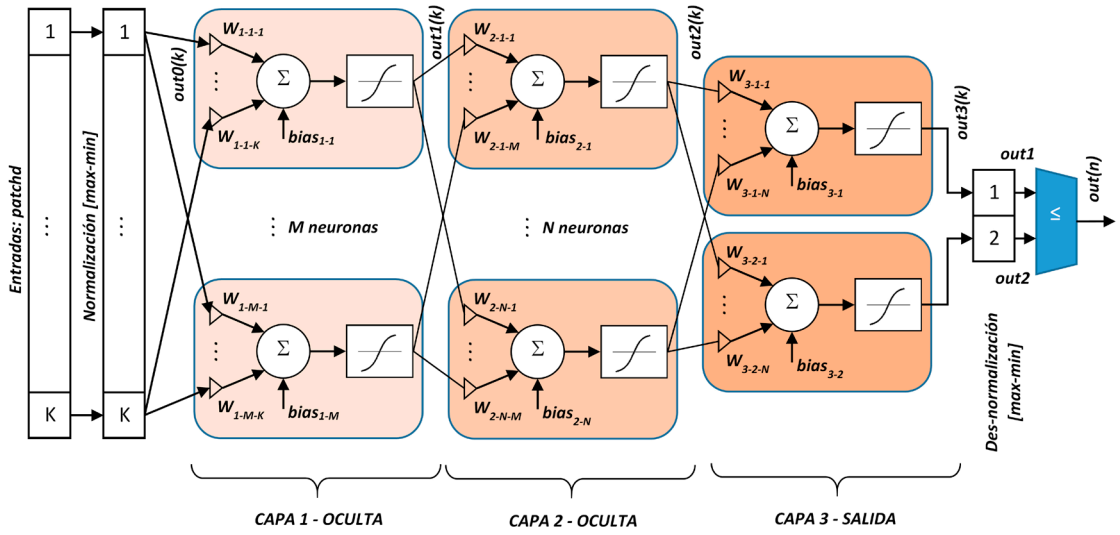


Figura 3. Estructura de la red MLP.

Aparte de los propios píxeles que conforman la detección, a las redes neuronales se les pasan otros parámetros característicos de la firma. En particular este hecho es importante en las detecciones de pequeño tamaño, donde detecciones pertenecientes a falsas alarmas tienen grandes semejanzas con las detecciones verdaderas, por lo que son necesarias informaciones adicionales para la determinación de las mismas.

2.2. Entrenamiento de las redes neuronales

Los algoritmos de entrenamiento para las redes neuronales, están basados en el método conocido de «descenso estocástico de gradiente con propagación inversa» o SGD. Los algoritmos de entrenamiento son difíciles de describir en profundidad debido a la complejidad matemática que conllevan.

El entrenamiento de las MLP consiste en encontrar los valores de los coeficientes de multiplicación de cada una de las neuronas con las predecesoras y las que les siguen. De forma general, los algoritmos de entrenamiento están basados en un problema de minimización del error cuadrático medio cometido por la red al procesar una entrada. Para encontrar dicho mínimo, se buscan aquellos valores que minimicen o hagan nulos el gradiente o derivada de la función global que presenta la red neuronal. La dificultad radica en que dicha función es multidimensional, por lo que este gradiente es complicado de calcular y evaluar. Por otro lado, encontrar los valores que minimicen el gradiente o hagan mínimo el error no es inmediato.

2.3. Proceso iterativo de entrenamiento

En cada iteración del entrenamiento, la red neuronal procesa un amplio conjunto de datos de detecciones seleccionadas, de las cuales se conocen sus resultados esperados, evalúa el error cuadrático medio

cometido y corrige los valores para que en la siguiente iteración el error sea menor. El resultado final es encontrar el conjunto de valores para los cuales el error no puede seguir decreciendo, siguiendo un proceso como el mostrado en la siguiente figura, en el que solo se tendría una función bidimensional.

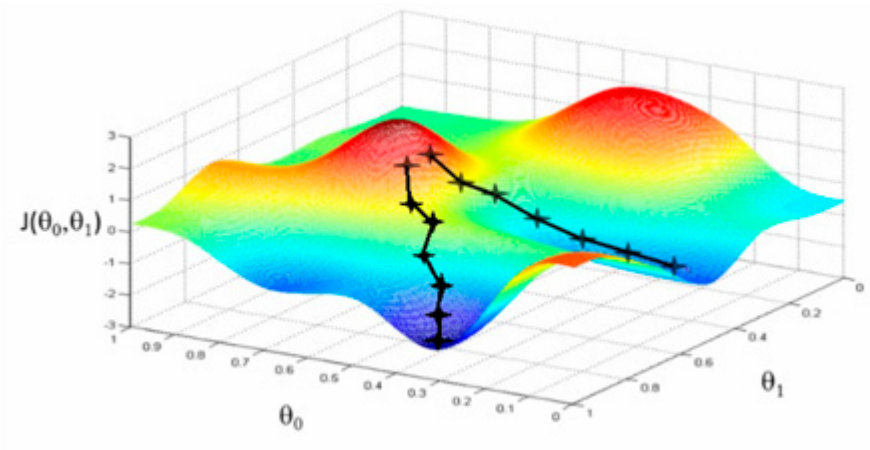


Figura 4. Reducción del gradiente en el entrenamiento de RRNN.

3. Resultados y discusión

En el marco del programa de desarrollo del IRST de F-110, y gracias a la enorme colaboración de la Armada liderada por la Dirección Técnica del proyecto, se desarrolló una campaña de recogida de imágenes a partir de diferentes blancos puestos a disposición:

- Aeronave ala fija, turborreactor
- Helicópteros
- Avión blanco
- Embarcaciones:
  - Patrullera
  - Lancha neumática
- Blancos de oportunidad tales como aviones de caza, buques de transporte, pequeñas embarcaciones de pesca…

Con esas imágenes se ha podido constatar que los algoritmos de adquisición de blancos, permite tener un comportamiento generalizado con errores en el entorno del 2 % para el caso de detecciones falsas (sobre todo con reflejos de olas, nubes, aves, etc.).

La siguiente tabla especifica el diseño de las MLP utilizadas para cada tamaño de detección, así como los valores de calidad de las mismas especificados en base a la probabilidad de falsa alarma (PFA), probabilidad de pérdida (PMD) y la probabilidad total de error (PTE).

Tamaño	Probabilidad de falsa alarma (%)	Probabilidad de pérdida (%)	Probabilidad total de error (%)
3 x 3	1,9	1	2,9
5 x 5	1,8	1,2	3
7 x 7	0,75	0,24	0,98
9 x 9	0,54	0,1	0,62
11 x 11	0,75	0,25	1
13 x13	2,9	0,25	3,2
15 x15	0,89	0	0,9

Tabla 1. Resultado redes MLP

Agradecimientos

Este análisis y sus resultados hubiesen sido imposibles sin la generosa colaboración de la Armada, liderada por la dirección técnica del proyecto, que hizo posible la campaña de grabaciones realizada en la Base Naval de Rota entre septiembre y octubre de 2016.

Referencias

1. *Reed I, Xiaoli Y. Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, Nov 1990.*

LASERONUAV – Proyecto para desarrollo de microdiodo laser en 2,1 μm para sistema de contramedidas en RPAS

Colomer García, Benjamin[1,*], Ortiz Benítez, Rafael[2] y Barandiarán, Ignacio[3]

[1, 2, 3] AERTEC Solutions S.L. (AERTEC) Avenida Juan López de Peñalver, 17. Málaga.

* Autor principal y responsable del trabajo; bcolomer@aertecsolutions.com (BCG).

Resumen

El presente artículo describe los trabajos de investigación y desarrollo llevados a cabo por AERTEC para responder a la necesidad planteada por la EDA, Agencia Europea de Defensa, para el estudio de componentes críticos para láseres militares y las ventajas de las tecnologías de sensores en UAV, de forma que se trate de mejorar el rendimiento de los láseres empleados en sistemas DIRCM.

La mayor parte de los sistemas actuales de láser DIRCM emplean subsistemas de láser de fibra y *Quantum Cascade* que pueden resultar costosos, de grandes dimensiones y puede que no cubran todo el espectro de emisión, por lo que pueden no ser útiles para ciertas amenazas. Dichas aproximaciones utilizan soluciones tecnológicas de emisiones de alta potencia a costa de reducir la calidad del haz del láser y generar emisiones multimodo en lugar de perfil gaussiano.

Entre los requisitos a cumplimentar por los prototipos que se fabriquen en el proyecto, se encuentran: alcanzar una potencia de emisión P>0,5 W y un M2<1,5, centrado en 2,1 micrometros y teniendo en cuenta que el sistema estará embarcado en UAV, con todas las especificaciones y requisitos que esto implica.

Durante el proyecto, las tareas de diseño y fabricación se han realizado tratando de emplear nuevas tecnologías basadas en materiales semiconductores que mejoren la respuesta de los sistemas cuando se utilizan para la emisión de alta potencia, además de soluciones de última generación para los subsistemas electrónicos y para los materiales empleados en el equipo.

Durante el proyecto que presenta AERTEC se analizarán las tecnologías disponibles en el mercado, conceptos necesarios para el diseño de la solución como: firma infrarroja, subsistema electrónico basada en GaN FET, subsistema óptico y los prototipos finalmente fabricados.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El desarrollo del proyecto surge como necesidad propuesta por parte de la Agencia Europea de Defensa (EDA) con el objeto principal de realizar un estudio de componentes críticos para láseres militares y las ventajas de las distintas tecnologías en UAV. De esta manera se quiere tratar de mejorar las prestaciones de los emisores y diodos láser que se integran en los equipos DIRCM disponibles siempre teniendo en cuenta las nuevas aplicaciones en los que se emplearán.

En los nuevos conceptos operativos militares es común el empleo de RPAS para distintos tipos de misiones, cabe destacar que aún está en auge el empleo de este tipo de plataformas aéreas como sistemas de defensa y otras aplicaciones en el entorno militar. Uno de los puntos débiles que tienen ee su vulnerabilidad ante amenazas como *Manpads* o cohetes guiados por infrarrojos.

La necesidad planteada por EDA surge debido al hecho de que estos equipos DIRCM con los que se podría dotar a los UAV, en su mayoría emplean soluciones basadas en subsistemas láser de fibra y/o *Quantum Cascade*. Estas tecnologías tienen una eficiencia demostrada en su estado actual, aunque, (teniendo en cuenta el objeto de embarcarlos en UAV de distinto tamaño), pueden ser demasiado pesados, de dimensiones excesivas y con un coste no asumible para la operación (pudiendo llegar a ser desproporcionado el coste del sistema DIRCM con respecto al propio coste de la aeronave a proteger).

1.2. Especificaciones

El destino y objeto del desarrollo que se llevará a cabo durante el proyecto es el análisis y estudio para dotar a los sistemas de contramedidas, específicamente para UAV, de emisores de microdiodos láser que mejoren las prestaciones de soluciones actuales. Se deberán analizar las modificaciones y actualizaciones a realizar para integrarlos en estos sistemas de contramedidas para UAV cumpliendo principalmente los siguientes requerimientos y especificaciones:

1. Longitud de onda de emisión en 2,1 micrómetros.
2. Potencia de emisión > 0,5 Watios.
3. Parámetro de eficiencia M2 < 1,5.

2. Análisis y cálculos

2.1. Análisis conceptual previo

Como se ha introducido, en la banda 1, en la que se encuadra la longitud de onda requerida por el proyecto (2,1 µm) se puede alcanzar suficiente potencia requerida por los sistemas de contramedidas

empleando láseres de fibra, pero a costa de emplear equipos costosos, pesados y de elevadas dimensiones. Incompatibles con los requerimientos que implicaría su uso desde plataformas aéreas no tripuladas como bajo peso, coste y dimensiones, bajo consumo energético, la complejidad de su integración en la aeronave, etc.

Suelen presentar el inconveniente de disminuir la calidad del haz a costa de aumentar la potencia del diodo emisor láser, no resultando en emisiones con perfil gaussiano sino en emisiones multimodal. En la siguiente imagen se quiere mostrar un diagrama de la operación del sistema:

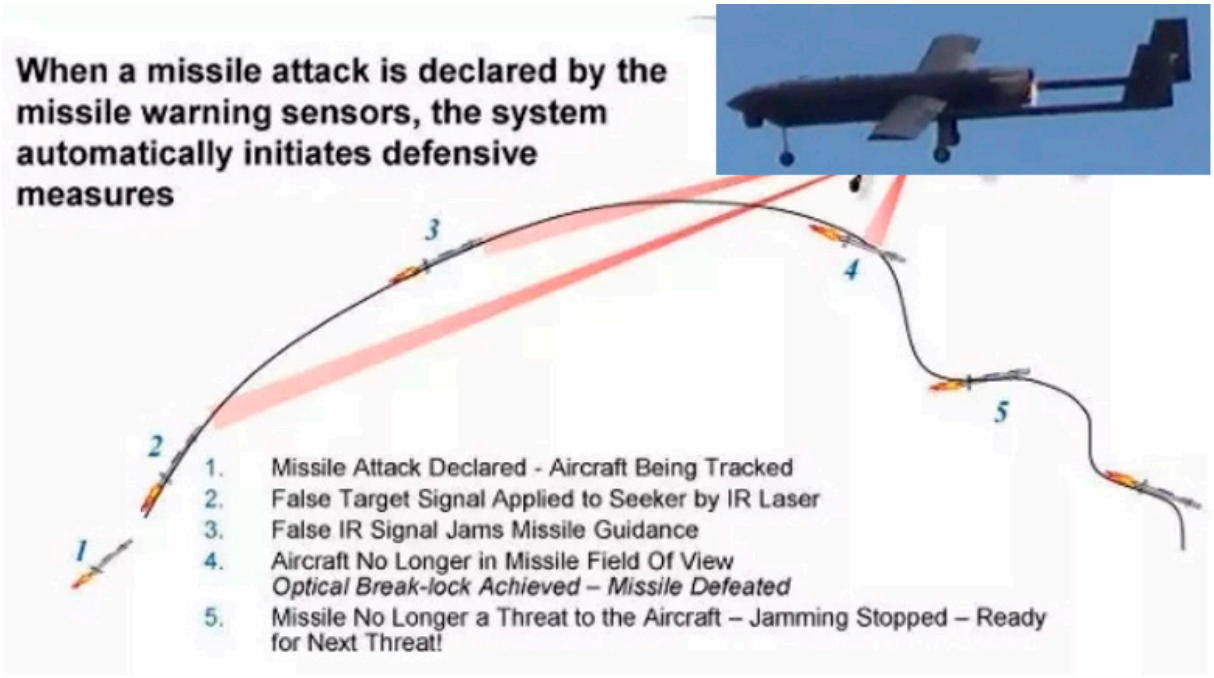


Figura 1. Diagrama conceptual de la aplicación.

El primer punto del desarrollo es fijar y calcular los parámetros que determinan la amenaza a la que se enfrenta los UAV y que debe contrarrestar el equipo en el que se embarcará. Este parámetro se conoce como firma infrarroja. Se debe calcular la emisión que genera el UAV en el que se embarcará el sistema de contramedidas, la radiación que generará vendrá dada por los distintos equipos que tiene instalados la aeronave. El valor de la radiación que generan vendrá dado principalmente por la distancia a la que se observa la radiación y la temperatura que alcanzan los equipos y subsistemas del UAV, principalmente los encargados de la propulsión. Para su cálculo empleamos la ley de Planck:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda K_B T} - 1} \quad (1)$$

El resultado será un valor de potencia por superficie en 2,1µm, este valor conocido como firma infrarroja del UAV es el que debemos contrarrestar con el diodo emisor láser con una potencia superior a este valor calculado.

Como se ha introducido, el mayor foco de radiación serán las partes propulsoras de la aeronave, ya que alcanzarán los niveles más altos de temperatura. Aunque son muchas más fuentes de radiación las que generan el total de la firma infrarroja del UAV, se pueden observar, resumidamente, en la siguiente imagen.

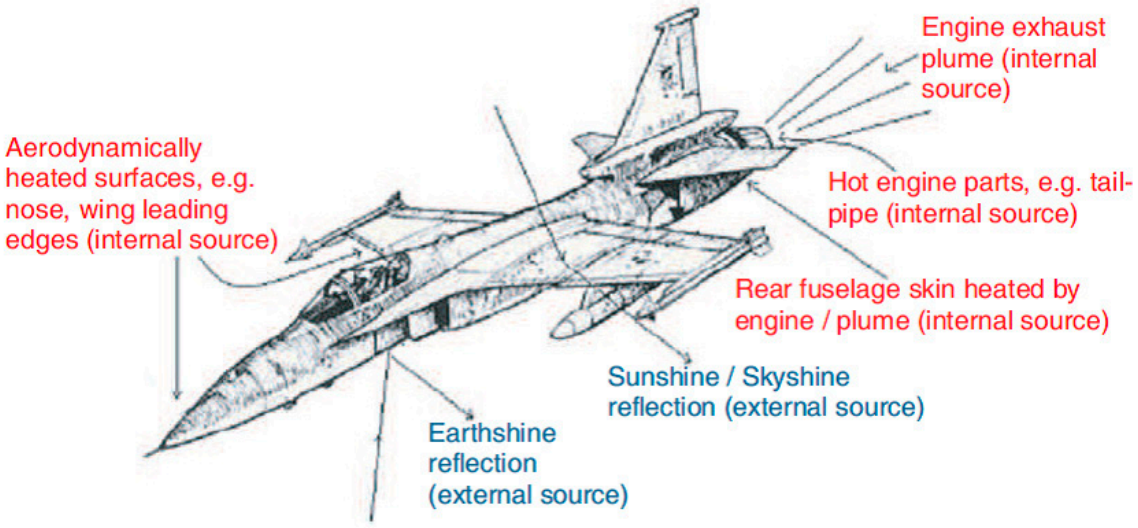


Figura 2. Fuentes de radiación IR en aeronave (2).

En el caso del UAV que se ha utilizado durante el proyecto (TARSIS75), el mayor foco de radiación, el motor, de forma cilíndrica, tiene unas dimensiones de 20 cm de altura y 15 de diámetro.

Para obtener la potencia total emitida se ha calculado para dos temperaturas que se corresponden con 1.900 W/m^2 para 600 ºC y 7.597 W/m^2 para 800 ºC. Teniendo en cuenta las dimensiones, la potencia total emitida por el escape del motor será de 250 W y 1.000 W para 600 ºC y 800 ºC respectivamente. A partir del cual, considerando, emisión isotrópica y homogénea, calcularemos la intensidad equivalente que tendremos a una distancia determinada. Se puede observar en la siguiente imagen.

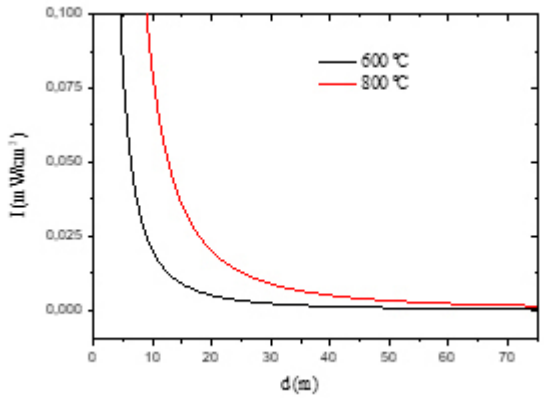


Figura 3. Descripción de la imagen.

2.2. Cálculos: relación de señal con interferencia, J/S

Una vez conocidas y fijados los parámetros que deberá cumplir la solución, (principalmente la intensidad para contrarrestar las amenazas basadas en seguimiento IR) el siguiente concepto que se introduce es el de *Jamming to signal ratio*. Este parámetro medirá la efectividad del sistema de contramedida y fija la proporcionalidad entre la radiación generada por el UAV (en este caso el motor como principal foco) y la radiación que deberá generar el sistema de contramedidas. Existen distintos estudios e investigaciones que analizan el correcto valor a imponer, en nuestro caso se ha determinado

un J/S de 100, es decir, la intensidad generada por el sistema de contramedidas debe ser 100 veces mayor que la intensidad generada por el UAV TARSIS75 (en este caso, nos hemos centrado en su principal fuente, motor).

3. Desarrollo

En este punto y tras un intenso análisis del mercado y búsqueda de distintos componentes ideales para la aplicación se proponen las siguientes soluciones, resumidas en que se emplearán dos soluciones distintas para el emisor láser, una primera basada en VECSEL y otra basada en microdiodos láseres comerciales, ópticas basada en espejos customizada para cada solución, sistema de refrigeración a partir de célula de *peltier*, electrónica de control basada en GaN FET, materiales ligeros de bajo coste, etc. A continuación, se analizan cada una de estas soluciones elegidas para cada subsistema. A continuación, se recogen los diseños y soluciones en que se basa cada subsistema y se analiza en detalle el principal elemento, el diodo emisor basado en microdiodos bombeado ópticamente.

3.1. Análisis conceptual previo

El punto de partida es el hecho de que el microdiodo será integrado en un gimbal instalado en un UAV, peso ligero y reducido tamaño son requisitos indispensables y una potencia de emisión suficiente, (de varios watios), para conseguir tras las etapas de filtrado óptico el nivel de potencia exigido para el sistema >0,5 w, con la calidad del haz deseado en 2,1 micras.

Las fuentes de láser en este rango de longitud de onda son principalmente láser de estado sólido y láser de diodo. Cada uno con sus ventajas y desventajas. Si bien el láser de estado sólido puede proporcionar haces de alta calidad y alta potencia, también son más pesados que los diodos.

Por el otro lado, los diodos proporcionan una fuente compacta, alta eficiencia de conversión eléctro-óptica, y diseñados para emitir en una determinada longitud de onda. El haz de baja calidad es la principal desventaja que presentan. De hecho, los diodos con una potencia menor que 200 mW trabajan en multimodo lateral que conduce a una gran divergencia, alto factor M2 y alto astigmatismo.

Sin embargo, en los últimos años se ha avanzado mucho en el desarrollo de diodos láser que emiten en el rango de longitud de onda de alrededor de 2 µm. La eficiencia y la potencia de salida se han incrementado significativamente. Se ha mejorado la calidad del rayo (menor divergencia del haz) y se ha aumentado la vida útil a temperatura ambiente.

Por lo tanto, estos diodos ahora pueden abordar un número cada vez mayor de aplicaciones y su disponibilidad comercial irá aumentando con los años. Dependiendo de las longitudes de onda emitidas y de las potencias de salida, algunos ejemplos de aplicaciones en los que se usan son: detección de gas, telecomunicaciones de espacio libre, aplicaciones médicas, fuentes de bombeo para sistemas láser de estado sólido y, como en nuestro caso, para aplicaciones DIRCM.

Dentro del amplio formato de salida de los diodos láser (modo único, área amplia, láser DFB, etc.), se explicará a continuación el que hemos considerado más adecuado para un sistema de contramedidas en UAV. Los diodos, bombeados ópticamente y el área amplia con revestimiento AR son candidatos para ser parte de un dispositivo de reducido peso y tamaño.

Estas fuentes de luz bombeadas ópticamente combinan las ventajas más importantes de los semiconductores y de los láseres de estado sólido: la posibilidad de diseñar la longitud de onda de emisión, la ganancia típica de semiconductores se combina con la alta calidad de haz y la funcionalidad ofrecida por arquitecturas de cavidades externas. Estas características facilitan la cobertura de una amplia gama de propiedades de emisión, lo que no ha sido posible con otras tecnologías láser.

La arquitectura del tipo de microdiodo bombeado ópticamente es muy específica, y la construcción del láser está más cerca del láser de estado sólido que el diodo láser convencional. Estructuralmente, el microdiodo bombeado ópticamente comprende un espejo altamente reflectante y una región de ganancia de semiconductor, generalmente un espejo altamente reflectante integrado. La típica estructura de espejo es un reflector de Bragg distribuido semiconductor (DBR), aunque los espejos metálicos, dieléctricos o híbridos también se han utilizado en algunos casos específicos. El espesor total de tal estructura de espejo de ganancia es normalmente menor que 10 µm.

Aunque los dichos microdiodos pueden ser bombeados eléctricamente, los sistemas de bombeo presentan algunos problemas que han limitado su desarrollo. Mediante el bombeo óptico se evitan estas limitaciones, que se han incluido en el diseño y fabricación del presente proyecto, con dos diodos en 980 nm. Por nombrar algún inconveniente, cabe destacar que los microdiodos bombeados ópticamente requieren de una compleja gestión térmica, son altamente sensibles en este sentido (aunque este hecho coincide con la mayoría de láseres emisores) y la configuración óptica, también compleja, costosa y basada en espejos.

Por tanto, ya podemos intuir que la solución elegida es una firme candidata para este tipo de aplicaciones la eleccion para el presente proyecto como fuente de 2,1 micras, otra de las características principales de la elección es su propiedad *eyesafe*, dada por la longitud de onda en la que emite. También se ha trabajado durante el proyecto con un diodo láser emisor comercial, con una potencia de emisión de 5,2 w tratando de mejorar su M2 mediante filtrados ópticos, pero que no se alcanzan las propiedades deseadas.

Durante la búsqueda de la opción óptima, comparando las fuentes de láser adecuadas para los objetivos del proyecto, estas pueden dividirse en dos tipos. Fuentes láser que se basan en transiciones de iones terrestres raros, específicamente iones T y Ho. Estas tienen la capacidad de ofrecer una potencia de salida alta con un haz de alta calidad. Sin embargo, la luz emitida por estos sistemas tiene un centro de longitud de onda en 1.850-2.000 nm, y apenas llegan a 2,1 µm, cuando lo hacen, se obtienen bajas potencias y una emisión de láser inestable y de un tamaño demasiado grande para UAV.

Otra opción en 2,1 µm, se basa en diodos semiconductores. Proporcionan un alto rendimiento, alta eficiencia, emisión de longitud de onda sintonizable y fuentes láser compactas, que en principio son muy adecuadas para integrarse en un UAV. Son una solución comercial, más comunes, son compactos y muy eficientes, pero debido a que su emisión es a través de una banda alargada, y trabajan en una operación multimodo, producen un haz con alta divergencia, alto astigmatismo y baja calidad espacial.

Los problemas antes identificados, tienen por tanto que ser resueltos o evitados, por la óptica de la cavidad extra como la circularización del haz y el filtrado espacial, lo que aumenta el tamaño del sistema y disminuye su tolerancia a la vibración mecánica. Esto reduce sustancialmente la potencia, en el caso de soluciones comerciales de diodos láser se deberían utilizar barras de diodo de alta potencia (varios emisores en lugar de uno), con el consiguiente aumento de tamaño y consumo de potencia.

Una de las facetas del diodo es que debe tener un recubrimiento AR para evitar pérdidas intracavitarias y filtrar dentro de esta cavidad, así el haz de salida será de mayor calidad, la energía se aprovecha mejor, es una mejor solución que realizarlo con un filtro espacial en una cavidad externa. Como desventajas, es que parece difícil alcanzar la potencia objetivo de 0,5 W.

En la siguiente tabla se resumen los diferentes tipos de láser de 2,1µm, principal punto de trabajo y de apoyo para la selección de componentes, cierre del diseño y fabricación del prototipo del proyecto.

Fuente	Max Potencia	Calidad del haz	Peso dimensiones	Eficiencia (de electrica a calidad del haz)	Principales ventajas	Principales desventajas
Laser basado en Tm 1,85-2,16 µm	120	Bajo> 25W, cercano a gaussiano < 25 W en SSL. Cercano a gaussiano en fibra	Muy grande. Inaceptable en UAV	Muy baja para potencia baja. Necesita láser de 10 W de bombeo, mayor potencia que la que desea generar	Alta potencia, alta calidad del haz	Tamaño
Laser basado en HO 1,9-2,13 µm	>150	Cercano a gaussiano	Muy grande. Inaceptable en UAV	Moderada	Alta potencia y alta calidad del haz. Óptimo para soluciones *Q-switch*	Tamaño
Diodo PN GaSb 1,85-2,35 µm	1 W con un solo emisor (utilizar *arrays*)	Muy bajo	Bajo. 30 cm, 3kg	Moderada. 8 W para obtener 0,5 W con un haz de buena calidad	Precio bajo. Tecnologia consolidada	Baja calidad del haz, técnicas de empleo de cavidad externa poco efectivas
Diodo PN (AR coated) GaSb 1,85-2,35 µm	40 % de emisor único	Cercano a gaussiano	2 kg Bajo	Muy alta. Aprox 1,3 de bombeo para obtener 0,5 W con buena calidad a la salida	Precio bajo. Tecnología consolidada. Bajo consumo. Correcta calidad del haz,	Poca potencia para un solo emisor en 2,1 µm, max 0,5 W
Microdiodo GaSb 1,9-3 µm	Hasta 7 W	Cercano a gaussiano	Bajo, <1kg. 10 cm	Buena. Con diodos de bombeo de 5W se pueden obtener 0.5W con Buena calidad de haz	Alta potencia. Correcta calidad del haz para pequeño tamaño.	Precio elevado

Tabla 1. Comparativa de tecnologías láser

3.2. Electrónica de control

La función del *driver* o subsistema electrónica de control es generar los niveles de señal necesarios para su correcto funcionamiento: niveles de tensión que se requieren, pulsos eléctricos con el ancho necesario, frecuencia de repetición de los pulsos, nivel de intensidad necesario para cada solución, etc.

El primer paso es identificar los requisitos electrónicos de los prototipos:

1. Ancho de pulso: microsegundos.
2. PRF: 1 KHz.
3. Corriente: >30 amperios.
4. Nivel de voltaje: 1.5 VDC.

La electrónica o *driver* es diseñada y fabricada por AERTEC empleando SW especifico y componentes *hardware* SMD y con las propiedades propias para su instalación en un equipo para UAV, en PCB multicapa y teniendo en cuenta niveles de intensidad requeridos.

Por tanto, el diseño se ha basado en transistores tipo FET, con sustrato de galio, de alta eficiencia y velocidad de conmutación, que acepta tensiones de hasta 100 V, y corrientes máximas de hasta 75 A,

velocidades de conmutación de nanosegundos, permitirá el control térmico, a pesar de estas frecuencias de conmutación y las altas corrientes que lo atraviesan.

El sistema electrónico general de control del láser se subdividirá en varios módulos de potencia que suministran energía a diferentes voltajes. Los componentes electrónicos de control, a través de un microprocesador es el responsable de generar la secuencia de pulsos, que controlará el disparo del láser, estas señales tendrán un orden de varios nanosegundos, suficiente para que el FET de conmutación de nitruro de galio sea activado al circular una corriente alta, proporcionada por la batería de condensadores de descarga. En la siguiente imagen se muestra un diagrama de la solución HW.

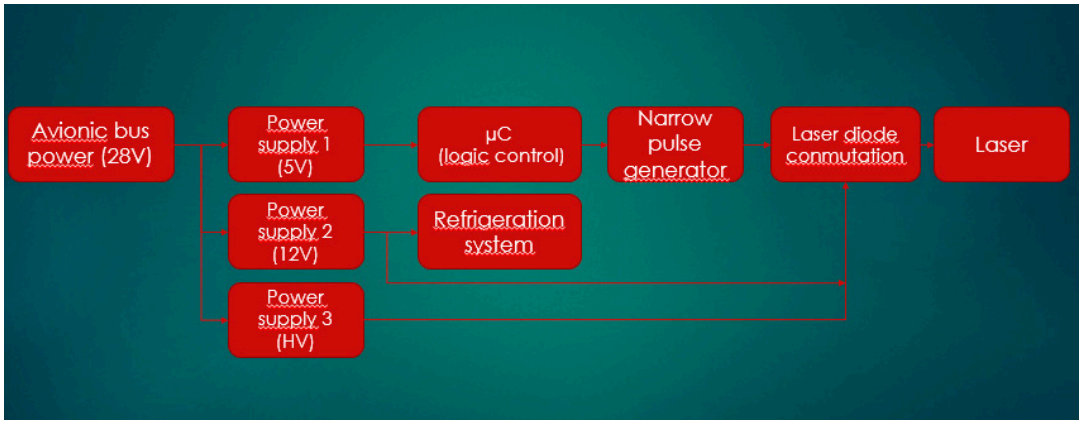


Figura 4. Solución hardware.

3.3. TARSIS75

Una vez llevados a cabo los ensayos en tierra se procederá con los ensayos de vuelo, para ello se ha tenido en cuenta desde el inicio el proceso de montaje y fijación del equipo final en la aeronave no tripulada propiedad de AERTEC. El sistema será instalado en el gimbal que se sitúa en la parte delantera de la aeronave. Las principales características del UAV se recogen a continuación.

1. Máxima peso en despegue: 75 kg. Carga de pago máxima: 12 kg.
2. Tiempo de vuelo máximo: 12 h.
3. Altitud máxima: 5.000 msnm.
4. Alcance operacional: 70/150 km.
5. Dimensiones: envergadura: 5,2 m, longitud: 3,8 m, altura: 0,96 m.
6. Velocidad de crucero: 100 km/h.

TARSIS75 es un RPAS de clase I de alta gama, táctico y compacto en el que se integra el sistema de contramedidas. En la siguiente imagen se muestra el TARSIS75 a disposición del proyecto.

Figura 5. TARSIS 75.

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en las pruebas en tierra sobre el dispositivo desarrollado son satisfactorios cumpliendo con los objetivos establecidos inicialmente en el proyecto, alcanzando el diseño y prototipo de un sistema de fabricación nacional bajo las especificaciones requeridas por la EDA.

Durante los próximos años la evolución de las distintas tecnologías que presentan este desarrollo, principalmente, diodos bombeados ópticamente y electrónica de control basada en transistores FET, irá en aumento y las prestaciones mejorarán, permitiendo entre otras: la reducción del tamaño, peso y coste y dotar al sistema de carácter multibanda para así cubrir el espectro completo de emisión de los vehículos en los que está destinado a instalarse, UAV.

5. Conclusiones

Durante la ejecución del proyecto se ha llegado a la conclusión de que el mercado ha evolucionado en los últimos años y concretamente los microdiodos bombeados ópticamente consideramos que son una apuesta para ser empleados en el futuro en aplicaciones como la que es objetivo del proyecto, sistema de contramedidas para plataformas de pequeño tamaño o similares.

Los prototipos alcanzados, pruebas realizadas y análisis que se han llevado a cabo concluyen que este tipo de solución es firme candidata a su utilización como sistema de contramedidas para la defensa de plataformas aéreas como UAV debido a cumplimiento de la especificación, su bajo peso y reducidas dimensiones.

Referencias

1. *A. Rao, and S. Mahulikar, «Aircraft powerplant and plume infrared signature modelling and analysis», in 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (2005), p. 221.*
2. *S. P. Mahulikar, H. R. Sonawane, and G. A. Rao, «Infrared signature studies of aerospace vehicles». Progress in Aerospace Sciences 43, 218-245 (2007).*

C90 (M3) reutilizable: diseño y desarrollo de un sistema lanzador reutilizable de bajo peso y funcionamiento mecano-eléctrico, compatible con los actuales proyectiles de la familia de desechables C90-CR (M3)

López Laborda, Alfonso[1,*], Espinosa Gracia, Rafael[2], Marco Ortega, Alberto[3] y Muñoz Gámez, Miguel[4].

[1, 2, 3, 4] INSTALAZA, S.A., Calle Monreal 27, 50002, Zaragoza, España.

* Correo electrónico: alopezlaborda@instalaza.es (ALL).

Resumen

Las necesidades del mercado han sufrido variaciones importantes motivadas por los cambios en los ciclos económicos que han afectado al sector de defensa.

Las empresas, dentro de sus planes de innovación, buscan diseñar productos novedosos o introducir mejoras sustanciales en los existentes que permitan ampliar su catálogo.

Los actuales conceptos de diseño y la modificación de escenarios, ha obligado a orientar las investigaciones hacia nuevos desarrollos para adaptarlos a las recientes circunstancias económicas.

Debido al avance de la tecnología, productos que parecían haber cumplido su ciclo de vida están siendo renovados.

INSTALAZA ha diseñado un nuevo producto, «C90 (M3) reutilizable: diseño y desarrollo de un sistema lanzador reutilizable de bajo peso y funcionamiento mecano-eléctrico, compatible con los actuales proyectiles de la familia de desechables C90-CR (M3)» que incorpora los modernos avances de la tecnología.

Manteniendo la filosofía de «lanzador reutilizable» el proceso de I+D+i ha permitido obtener un producto de dimensiones, peso, funcionamiento, seguridades y puntería (visor puramente óptico u opto-electrónico) incorporando elementos de ayuda a la visión y a la estimación de la distancia (visor nocturno y telémetro láser), aprovechando los modernos medios de cálculo disponibles.

El estado del arte, tanto en los avances en la electrónica, facilitando monitorizar la secuencia de disparo, utilizando para ello dispositivos cada vez menos voluminosos y de mayor fiabilidad, como el empleo de materiales dimensionalmente más estables, resistentes a los cambios de temperatura, adhesivos y procesos de fabricación, ha permitido el desarrollo de un nuevo sistema de arma de longitud, peso y ergonomía óptima.

El nuevo concepto ofrece una solución eficaz a una necesidad que surge con creciente incidencia en los recientes escenarios de operaciones.

Palabras clave

C90, reutilizable, peso, longitud, mecano-eléctrico, seguridad.

1. Introducción

La palabra *bazooka*, se usa para designar a un lanza-cohetes anti-carro portátil que impulsa una granada propulsada por un cohete. Surge en la Segunda Guerra Mundial para incrementar la capacidad de fuego del soldado, que se encontraba indefenso ante el empleo de medios acorazados y mecanizados.

Los EE.UU. comenzaron a desarrollar (1941) un lanza-granadas, conocido por *M1* (figura 1), utilizando propulsión por cohete, siendo el arma conocida por *bazooka* por un popular instrumento utilizado en un programa de radio. Alemania adaptó el lanza-granadas americano al calibre 88 mm, denominándolo *Raketenpanzerbüchse Panzerschreck* (terror de los carros) (figura 1).

Es comparable a un cañón portátil sin retroceso y reutilizable que requiere de un equipo compuesto por un tirador que porta el tubo plegado y un proveedor/cargador. El tirador monta el arma, apunta y dispara. El cargador, alimenta el lanza-granadas introduciéndolo por la parte posterior del tubo lanzador una vez que sus dos partes han sido acopladas. En los modelos iniciales el contacto entre el proyectil y el tubo lanzador empleaba un hilo conductor.

Figura 1. M1 Bazooka (USA) y Raketenpanzerbüchse Panzerschreck RPzB (Alemania).

2. Desarrollo del lanza-granadas

2.1. Durante la Segunda Guerra Mundial

El primer modelo *M1 bazooka* tenía un tubo lanzador reutilizable (longitud 1,40 m, calibre 60 mm) con un anillo de acero en su parte posterior. El arma disponía de una empuñadura y gatillo tipo pistola que permitía el paso de la corriente desde una batería por un cable al anillo posterior. El cargador introducía el proyectil, las aletas estabilizadoras tenían que quedar algo salientes y en contacto con el anillo para recibir la electricidad y activar la pólvora propulsora que impulsaba el proyectil. El peso del lanzador era de aproximadamente 6 kg y cada proyectil 2,2 kg con perforación de 100 mm en acero y alcance de 100 m.

En 1943 se procede a una completa remodelación que daría lugar a un nuevo modelo, el *M9* (figura 2), introduciendo nuevo concepto esencial, el arma se podía dividir en dos secciones, facilitando su trans-

porte siendo la longitud total de 155 cm. La batería fue sustituida por un pequeño generador de impulsos. El arma pesaba 6,5 kg y alcanzaba 120 m.

El *Faustpatrone* (figura 2) fue el primer lanza-granadas alemán en entrar en combate en el frente oriental en el verano de 1943. Consistía en un tubo lanzador metálico de 1 m de largo y 33 mm de diámetro. En la boca delantera se colocaba una granada de carga hueca antitanque de 100 mm de diámetro, encajando dentro del tubo lanzador, el tubo propulsor de la granada y un cartucho de pólvora negra. Disponía de un dispositivo percutor que activaba el cartucho y lanzaba la granada a 30 m, perforando teóricamente 140 mm de acero.

Figura 2. M9 Bazooka (USA) y Faustpatrone (Alemania).

Posteriormente aparece un nuevo modelo, el *Panzerfaust* con una cabeza antitanque más eficaz. El arma tuvo gran éxito en lucha urbana, pero la distancia de combate era muy reducida y en 1944 surge el *Panzerfaust 60*, alcance 60 m y el *Panzerfaust 150* con un nuevo lanzador reutilizable y granadas con aletas estabilizadoras que perforaban 200 mm de acero a 150 m.

2.2. Después de la Segunda Guerra Mundial hasta nuestros días

Después de la guerra, el ejército de los Estados Unidos retiene la producción del denominado *superbazooka modelo M20* (figura 3) [alcance y perforación mejorados] hasta la guerra de Corea (1950) en la que los carros de origen soviético resultan impenetrables para el antiguo *bazooka*.

En los años 50, la Unión Soviética se incorpora a la investigación en este tipo de armas, entrando en servicio el *RPG-2* [*Ruchnoi Protivotankovii Granatomet*] (figura 3), con un tubo metálico, alza de puntería hasta 150 m y una sencilla empuñadura. El arma cargada pesa 5 kg y mide 1,20 m, siendo capaz de perforar 180 mm de acero y será fabricado en la mayoría de los países de la órbita soviética.

Figura 3. Superbazooka modelo M20 (USA) y RPG-2 (Unión Soviética).

Posteriormente, en prácticamente todos los ejércitos se extendió el uso de lanzadores reutilizables, ya fuera de origen americano o de origen ruso, surgiendo gran variedad de variantes, aunque basados todos ellos en el diseño del *bazooka* o del *RPG*.

Tras el desmembramiento de la URSS y sus países satélites aparecieron en el mercado una gran oferta de sistemas de dudosa procedencia y escasa fiabilidad, ofrecidos a bajo precio, que evidentemente no satisfacen unos requisitos mínimos. Actualmente los clientes requieren sistemas fáciles de usar y alta fiabilidad. En la tabla 1 (punto *3.3*) se comparan los principales sistemas reutilizables existentes.

3. Diseño y desarrollo de un sistema lanzador reutilizable

3.1. Primer diseño y desarrollo: lanza-granadas reutilizable de 88,9 mm

Consecuencia de la necesidad de disponer de un sistema lanza-granadas desechable de fabricación nacional que permitiera no depender del mercado exterior, en 1953 INSTALAZA S.A. acomete el diseño del primer lanza-granadas reutilizable (*bazooka*), *modelo 53 de 88,9 mm* (figura 4). Posteriormente se desarrolla el *modelo 65* (figura 4) que introduce mejoras sustanciales con respecto a su predecesor, p.e. eliminación del faldón de protección del tirador, debido a los avances en los sistemas de propulsión de los cohetes.

Figura 4. Modelo.53, Modelo.58 y Modelo.65, calibre 88,9 mm.

El lanzador reutilizable, utilizado por el «tirador» era alimentado por detrás por el «cargador» pudiéndose usar con diferentes tipos de munición (por lo que era obligatorio el empleo por dos operadores) según su finalidad. El lanzador se disparaba por medio de un mecanismo de disparo, tipo pistola y se utilizaba un generador de corriente (dinamo) para el encendido del cohete.

A principio de 1980 los nuevos conceptos referentes a, sistemas de menor peso y longitud, utilizables por un solo usuario, de fácil despliegue en situaciones variables de uso, hizo que los sistemas reutilizables, voluminosos y pesados, quedaran obsoletos siendo sustituidos por sistemas de un único disparo (sistemas desechables, *fire and dispose*).

Para satisfacer las necesidades del mercado INSTALAZA S.A. acometió el diseño y desarrollo de la familia de *sistemas desechables (C90)* y su posterior evolución con *sistemas mejorados (M3)*, o los *sistemas disparables desde recinto cerrado (CS)* y la familia *ALCOTAN-100 (M2)* dotado con *dirección de tiro VOSEL (M2),* opto-electrónica de alta tecnología con calculador balístico, telémetro láser, brújula y visión nocturna incluidos (figura 5).

Figura 5. C90 (M3), C90-CS (M3), C90 (M3) Reutilizable y ALCOTAN-100 (M2).

3.2. Diseño y desarrollo actual: C90 (M3) arma reutilizable

En los últimos años, con la reducción de fondos disponible para proyectos de I+D, las empresas han tenido que conducir sus esfuerzos de investigación hacia productos que ya eran conocidos por el usuario e iniciar procesos de mejoras y rediseños, es decir mantiene el concepto, pero incorporar todos los avances tecnológicos actuales; electrónica, visión nocturna-diurna, guías universales para adaptación de telémetros, mecanismos de control, medios de producción, etc.

El proceso I+D+i realizado, está fundado en un producto ya conocido, pero del cual únicamente toma la filosofía de ser un «lanzador reutilizable», en el cual se utilizan los nuevos medios de cálculo mediante *software* específico, fabricación y métodos de ensayo de acuerdo a normas militares (NM, STANAG, MIL-STD).

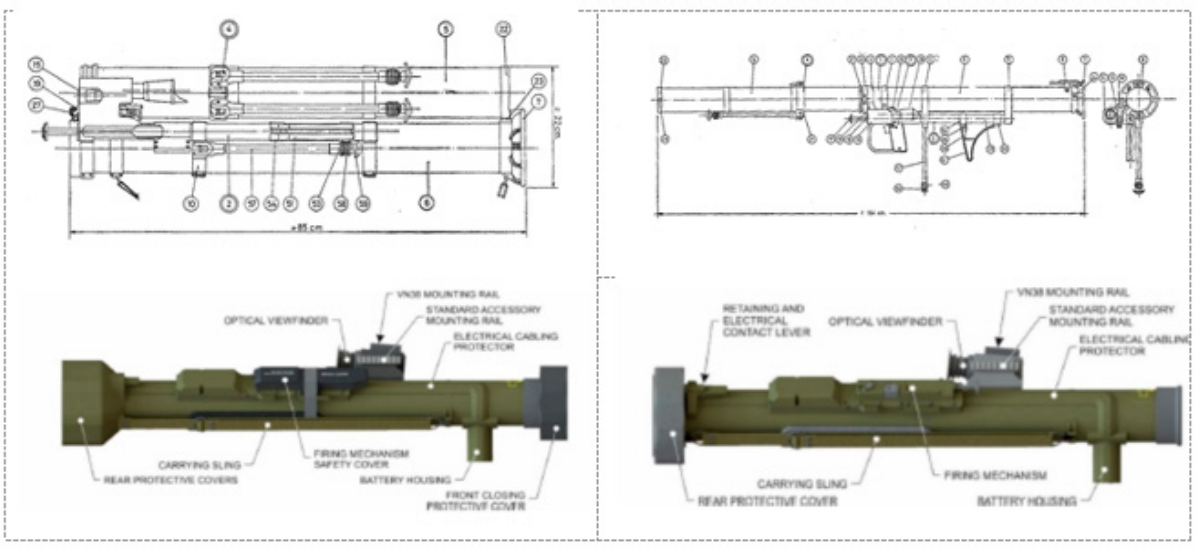


Figura 6. Modelo.65 y C90 (M3) Arma Reutilizable.

3.2.1. Retos de diseño más significativos

Como retos establecidos en el desarrollo del proyecto se establecieron los siguientes:

1) Diseñar un tubo lanzador que elimine el tubo del arma en dos partes, optimizando longitud y peso.

Formado por un tubo de calibre 90 mm para poder adaptarlo a las municiones ya existentes (*munición anti-tanque / anti-personal [AM], munición fumígeno-incendiaría [FIM] munición anti-tanque [RB], munición anti-bunker / anti-tanque [BK]*) (figura 7).

Figura 7. Municiones C90 (M3) Arma Reutilizable.

El empleo del motor de propulsión del proyectil *C90-CR (M3)* permite reducir la longitud del lanza-granadas, ya que al mantener las propiedades del propulsante, se garantiza el quemado de la pólvora en el interior del tubo lanzador, permitiendo conseguir la velocidad deseada.

En el mercado existen tubos lanzadores híbridos (aluminio + fibra de carbono) pero con diferente sistema de lanzamiento, donde toda la presión interna debe ser resistida por el tubo. En la configuración del lanza-granadas reutilizable, la presión de lanzamiento es soportada por el cuerpo motor del proyectil, fabricado en acero templado de alta resistencia y calculado para aguantar una presión máxima de operación (MOP), muy superior a la máxima presión proporcionada por el propulsante en las condiciones más extremas de uso.

La máxima presión de operación que ha de soportar el tubo lanzador junto con su elevada resistencia al desgaste permite su fabricación en aluminio de alta calidad en el nuevo sistema lanzador reutilizable.

2) Mantener la configuración externa y de funcionamiento del mecanismo de disparo (figura 8).

Como requisito primordial que se establece en el diseño del nuevo arma reutilizable, está el conservar la misma configuración que el mecanismo de disparo del sistema *C90-CR (M3)*.

El conocimiento del tirador de la secuencia de manejo del mecanismo de disparo no incrementa los tiempos de entrenamiento y mantiene la seguridad en su manejo.

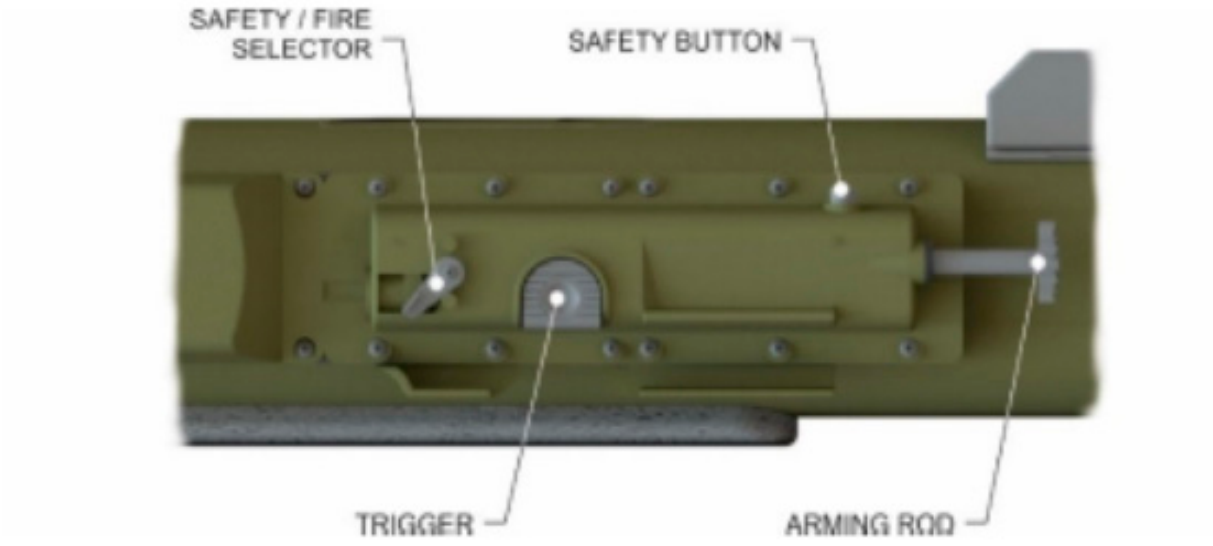


Figura 8. C90(M3) Arma Reutilizable. Mecanismo de disparo.

3) Diseñar un mecanismo de disparo con diferentes contactos electro-mecánicos de modo que tienen que activarse cada uno de ellos por una acción diferente.

Empleando los mismos movimientos mecánicos utilizados por el usuario en la secuencia de armado y no armado del mecanismo de disparo del sistema *C90-CR (M3)*, se han configurado cuatro pulsadores electrónicos y uno mecánico de tal forma que, si no se sigue la secuencia correcta, nunca pueda producirse el disparo y evitar que en cualquier etapa pudiera originarse un disparo no deseado. Un circuito electrónico de control controla la activación de un relé de seguridad que da el pulso necesario para hacer funcionar el sistema de encendido del propulsante de la munición al completar una secuencia de fuego correcta pulsando finalmente el pulsador de disparo. La monitorización de los mismos, permite que si la secuencia de activación no es la correcta corte el paso de corriente de la batería al iniciador.

4) Desarrollar un sistema de retención y contacto eléctrico (figura 9).

El sistema de retención y contacto tiene una doble función: sujetar la munición dentro del tubo lanzador y proporcionar contacto eléctrico entre el arma y la munición para suministrar la energía necesaria en el momento del disparo para lanzar la munición.

5) Arillo toma corriente y encendido motor cohete (figura 9).

El arillo toma corriente, aunque es un componente de la munición, ha sido considerado como parte crítica del diseño del arma, ya que es la *interface* por la que se transmite el pulso eléctrico del disparador ubicado en el arma al inflamador situado en la munición. Incorpora un seguro de corto circuito que mantiene la munición segura hasta el instante de carga y disparo.

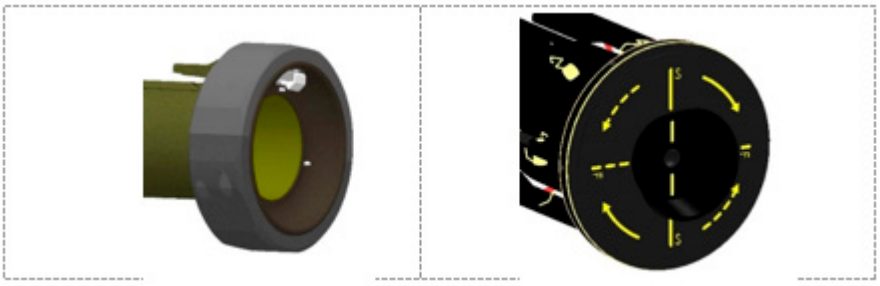
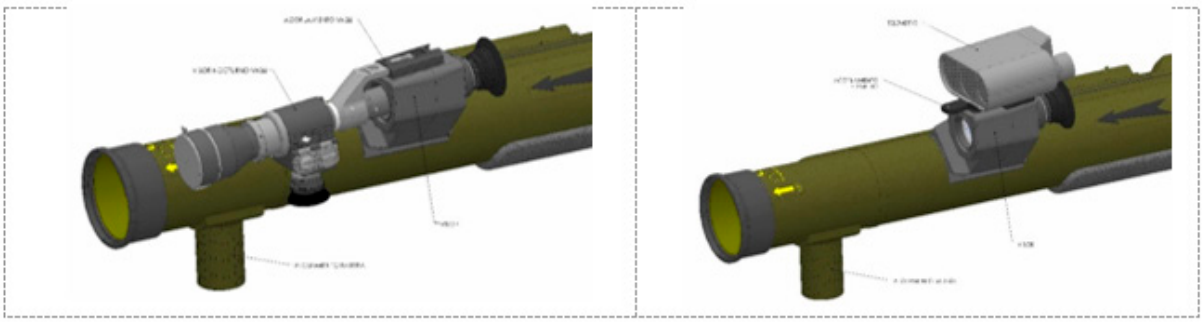


Figura 9. Sistema de retención y arillo toma corriente.

6) Permitir el acoplamiento de un visor nocturno, un telémetro láser, incorporando además una guía Picatinny, de acuerdo a las normas MIL-STD-1913 o STANAG 2324, para cualquier equipo existente en el mercado que adopte tal sistema de fijación (figura 10).



3.3. Comparativa con los lanza-granadas actuales disponibles en el mercado

Disponer de un sistema lanzador reutilizable de desarrollo nacional permite a la industria de defensa española mantenerse competitiva dentro del mercado, ofreciendo un producto diseñado con los nuevos avances tecnológicos.

Existen gran variedad de sistemas lanza-granadas reutilizables, pero de entre todos ellos destacan los que se indican a continuación.

	ESPAÑA	FEDERACIÓN RUSA		SUECIA		ALEMANIA
	C90(M3) Arma Reutilizable	RPG-7	RPG-29N Vampir	Carl Gustaf M2	Carl Gustaf M3	Fanzerfaust 3
Fabricante	**INSTALAZA S.A.**	OJSC, Bazalt y otros	Bazalt FSUE/SRPE	Ordnance Factory Board		DND
Calibre	**90 mm**	40mm / 105mm	105mm	84 mm		60mm / 110mm
Peso lanzador	**3,9kg**	7,5kg	11,5kg	15 kg	10,5kg	2,5kg - 6,5kg
Peso munición	**2,8kg – 3,3kg**	2kg – 5kg	6,1kg	2,7kg - 4Kg	2,7kg – 4kg	10,5kg – 12kg
Alcance eficaz	**300m - 700m**	250m	300m - 500m	400m - 600 m	400m – 600mm	400m - 600m

Tabla 1. *C90(M3) Arma Reutilizable: comparación con otros lanzagranadas reutilizables.*

4. Resultados y discusión

El producto complementa la gama de la familia de sistemas desechables *C90-CR (M3)* y *C90-CS (M3)* [recinto cerrado] y la familia *ALCOTAN-100 (M2)* dotado con dirección de tiro *VOSEL (M2)* opto-electrónica de alta tecnología con calculador balístico, telémetro láser, brújula y visión nocturna incluidos.

Partiendo de un producto ya conocido se ha procedido al diseño de un sistema reutilizable ligero con 3,9 kg de peso (sin munición), sin retroceso y menos de 1 m de longitud, extremadamente cómodo y fácil de usar.

Se han realizado ensayos en condiciones estáticas y/o dinámicas de los diferentes prototipos fabricados para comprobar que las hipótesis consideradas en los cálculos/simulaciones han sido adecuadas, y que los prototipos cumplen los exigentes requisitos solicitados.

Los ensayos de validación realizados durante el I+D y demostraciones en presencia de cliente han resultado satisfactorias confirmando que las hipótesis de diseño han sido adecuadas.

5. Conclusión

Los requisitos internos establecidos, la información proveniente de productos previos similares [*C90-CR (M3)*], la exploración de mercado, la normativa aplicable, el estudio de materiales, cálculos teóricos/simulaciones por ordenador de diferentes modelos y componentes para fabricación de prototipos y pre-series, así como la ejecución de ensayos necesarios han permitido obtener un nuevo producto que satisface los exigentes requisitos de los usuarios

El esfuerzo de I+D+i ha permitido introducir en el mercado un nuevo producto, de desarrollo 100 % nacional y completamente competitivo, tanto en precio como en prestaciones, en comparación con los sistemas lanza-granadas reutilizables existentes.

Agradecimientos

- Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) dependiente del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad por su colaboración en la financiación del proyecto de I+D+i: *C90 (M3) reutilizable: diseño y desarrollo de un sistema lanzador reutilizable de bajo peso y funcionamiento mecano-eléctrico, compatible con los actuales proyectiles de la familia de desechables C90-CR (M3).*

Referencias

1. *Paul Huard, The bazooka: A History, 2015.*
2. *Encyclopaedia Britannica, Bazooka weapon: M9A1 Rocket Launcher, 2011.*
3. *INSTALAZA S.A., Manual de descripción y mantenimiento del lanza-granadas Mod.65, 1977*
4. *INSTALAZA S.A., http://instalaza.com/, http://instalaza.com/producto/c90-reutilizable/*
5. *IHS Jane´s Weapons, Infantry, 2014-2015.*
6. *INSTALAZA S.A., C90 (M3), SHOULDER-LAUNCHED REUSABLE WEAPON SYSTEM, USER´S MANUAL, 2018.*

Sistemas embarcados de captura de datos 3D georreferenciados

LIDAR RouteScene LidarPod y Mobile Mapping Maverick, David Cruz Josa[1], Miguel Ángel Sacristán[2], Paloma Mier Gutiérrez[3]

1 Área de Metrología y Simulación 3D, Grafinta S.A. Av. Filipinas, 46. 28003 Madrid. david@grafinta.com

2 Director técnico, Grafinta S.A. Av. Filipinas, 46. 28003 Madrid. m.angel@grafinta.com

3 Director comercial, Grafinta S.A. Av. Filipinas, 46. 28003 Madrid. paloma@grafinta.com

Resumen

La ponencia versará acerca de dos sistemas de captura de datos 3D georreferenciados: un sistema LIDAR embarcado en drones y un sistema Mobile Mapping embarcado en vehículos terrestres. En particular se mostrará el funcionamiento y las características técnicas de cada uno de los sistemas, exponiendo los condicionantes de su adaptación en las distintas plataformas, los parámetros de influencia en la precisión de los datos tomados y sus ventajas respecto de otros sistemas de captura masiva de datos georreferenciados. También se mostrará algunas de sus aplicaciones en casos reales.

Palabras clave

LIDAR, Mobile Mapping, drones, nube de puntos, Maverick, Terrasystem-LidarPod,

1. Introducción

Entre los diversos sistemas embarcados de captura masiva de datos geométricos georreferenciados cabe destacar los sistemas LIDAR y los sistemas Mobile Mapping. Ambos sistemas se basan en la tecnología LIDAR y nos permiten la captura masiva de datos geométricos georreferenciados mediante un barrido láser de una serie de puntos del terreno que denominaremos «nube de puntos».

Este tipo de dispositivos tienen una larga trayectoria en su implantación en aviones y helicópteros, lo que confiere a esta tecnología un largo desarrollo y experiencia de uso. Circunstancia que ha beneficiado enormemente en su adaptación en diversas plataformas, tanto aéreas con los sistemas LIDAR embarcados en drones como terrestres con los sistemas Mobile Mapping.

Gracias a la incorporación de los drones en el panorama profesional se han realizado importantes avances en la adaptabilidad de estos dispositivos, facilitando su incorporación en multitud de plataformas y posibilitando la obtención masiva de datos geométricos georreferenciados mediante procedimientos muy sencillos, con costes sustancialmente menores y resultados más eficientes. En este momento podemos decir que la aplicación de la tecnología LIDAR es totalmente adaptable tanto a plataformas aéreas como terrestres. Podríamos decir que los sistemas Mobile Mapping son una adaptación de los sistemas LIDAR aerotransportados en plataformas terrestres.

2. Desarrollo

2.1 Características de los sensores LIDAR

La palabra LIDAR es un acrónimo del inglés «Light Detection and Ranging», cuya tecnología está basada en la utilización de un sensor láser activo. Esto quiere decir que el sensor emite un pulso láser hacia un objeto o superficie, normalmente el terreno y calcula la distancia mediante el tiempo que tarda este pulso en reflejarse y volver a ser captado por el sensor, tal y como se puede ver en la figura 1.

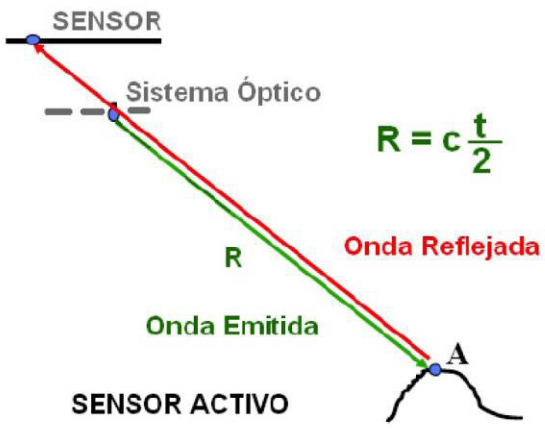


Figura 1. Medición de distancia con LIDAR.

Los componentes básicos de un sensor LIDAR son un transmisor, un receptor, una unidad de tiempo y un sistema mecánico para su rotación. De esta forma podemos emitir y recibir el pulso laser en un ángulo de rotación de 360º.

Tanto los sistemas LIDAR aerotransportados como los sistemas Mobile Mapping se basan en la utilización de sensores LIDAR. La nube de puntos se obtiene a partir de medidas de distancia desde la plataforma, aérea o terrestre, en la que va embarcado el sensor. Por tanto, la posición (X, Y, Z) desde la que se miden las distancia al terreno debe ser conocida tan bien como la distancia entre el sensor LIDAR y el terreno. En otras palabras, los puntos 3D de la nube de puntos solo se pueden calcular si en cualquier instante se conoce la posición y orientación del sensor LIDAR.

Para ello, tanto los sistemas LIDAR aerotransportados como los sistemas Mobile Mapping terrestres, se complementan con un dispositivo de posicionamiento que proporciona su correcta georreferenciación durante la toma de datos.

2.2 Ventajas de los sistemas LIDAR aerotransportados y Mobile Mapping

En particular, los principales puntos fuertes de los sensores LIDAR aerotransportados son:

1. Alto nivel de detalle en los datos georreferenciados obtenidos.
2. Alta precisión respecto a las tecnologías tradicionales.
3. Adaptabilidad y superación de los límites orográficos.
4. Aumento de la seguridad en zonas de riesgo para los operadores.
5. Reducción de los tiempos de toma de datos.
6. Reducción de costes, etc.

Una gran ventaja de la utilización de estos sistemas LIDAR aerotransportados es la seguridad. Con el sistema RouteScene-LidarPod es posible realizar tareas de captura de datos en zonas donde la orografía impediría su aproximación o sería peligroso para el personal encargado de la captura.

Figura 2. Sistema LIDAR «RouteScene-LidarPod» aerotransportado en un octocóptero.

Los sistemas Mobile Mapping nos permiten la obtención de datos geométricos georreferenciados desde prácticamente cualquier plataforma terrestre, lo que nos proporciona varias ventajas claramente destacables respecto a otros sistemas:

1. Sencilla adaptabilidad a las plataformas terrestres.
2. Alta precisión de los datos geométricos obtenidos con alto nivel de detalle.
3. Integración sencilla de imagen de alta calidad (360º o panorámicas).
4. Reducción del tiempo de toma de datos.
5. Reducción de costes.

En particular, el sistema Mobile Mapping Maverick es un sistema totalmente integrado, sin componentes externos, que nos permite una adaptabilidad muy sencilla en cualquier plataforma terrestre gracias a su bajo peso y volumen.

Figura 3. Sistema Mobile Mapping «Maverick» implementado en un vehículo quad.

Tanto el sistema RouteScene-LidarPod (figura 2) como el sistema Maverick (figura 3) son soluciones totalmente integradas «llave en mano» que nos permite aumentar significativamente la rentabilidad del trabajo de campo respecto al resto de procedimientos de captura convencionales como la topografía clásica y la fotogrametría.

2.3. Parámetros de influencia en la precisión

Tanto los sistemas LIDAR aerotransportados como los sistemas Mobile Mapping están compuestos principalmente por un sensor LIDAR, un receptor GNSS incorporado en la plataforma aerotransportada y una unidad de navegación inercial (INS).

Tanto en el sistema RouteScene-LidarPod como en el sistema Maverick, los tres componentes (sensor LIDAR, unidad de navegación inercial y receptor GNSS) se encuentran integrados dentro de un mismo dispositivo, por lo que la calibración del sistema se realiza durante su fabricación y no cada vez que el sistema es embarcado en una plataforma.

Esta circunstancia no solo facilita su manejo, integración y adaptabilidad en distintas plataformas sino que aumenta considerablemente su precisión, ya que no requiere de una nueva calibración en cada integración.

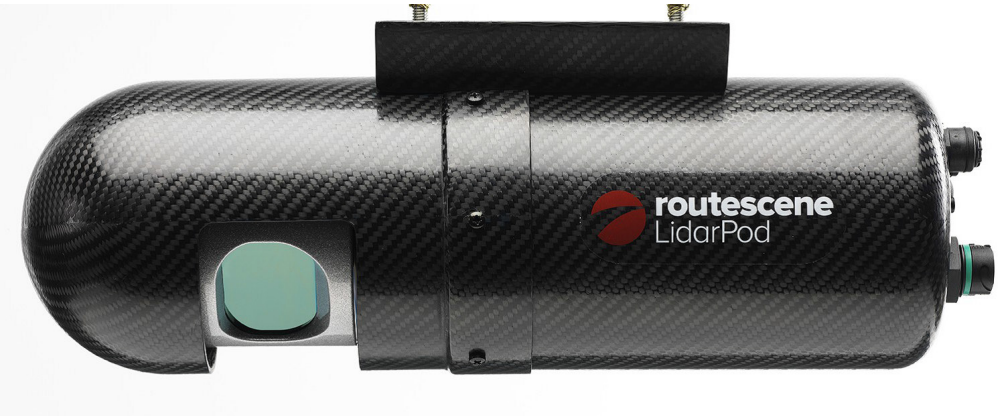


Figura 4. Sistema integrado «TerraSystem-LidarPod».

Los componentes del sistema **RouteScene-LidarPod** se encuentran integrados dentro del mismo dispositivo (figura 4 y A en figura 5) de tan solo 2,5 kg y 32 x 10 cm de tamaño, que permite una rápida adaptación a la plataforma aérea directamente en campo.

Cabe destacar el sensor LIDAR integrado Velodyne HDL-32e. Capaz de obtener hasta 700.000 puntos por segundo gracias a sus 32 pares de sensores láser en un rango máximo de 100 m. Por supuesto, estos sistemas están diseñados para trabajar a la intemperie, con una protección contra el polvo y humedad IP 67.

En cuanto a los componentes del sistema de posicionamiento GNSS\INS, se trata de una integración de un sistema GNSS RTK (Real Time Kinematic) y un sistema de navegación inercial (INS – Inercial Navigation System) que proporciona la velocidad, la aceleración y la orientación en las condiciones más exigentes, apoyando la determinación del rumbo en dos antenas GNSS instaladas en los extremos de una línea base, (B en la figura 4). Este completo sistema de posicionamiento proporciona información precisa y fiable de navegación y orientación, con precisiones de hasta 1 cm.

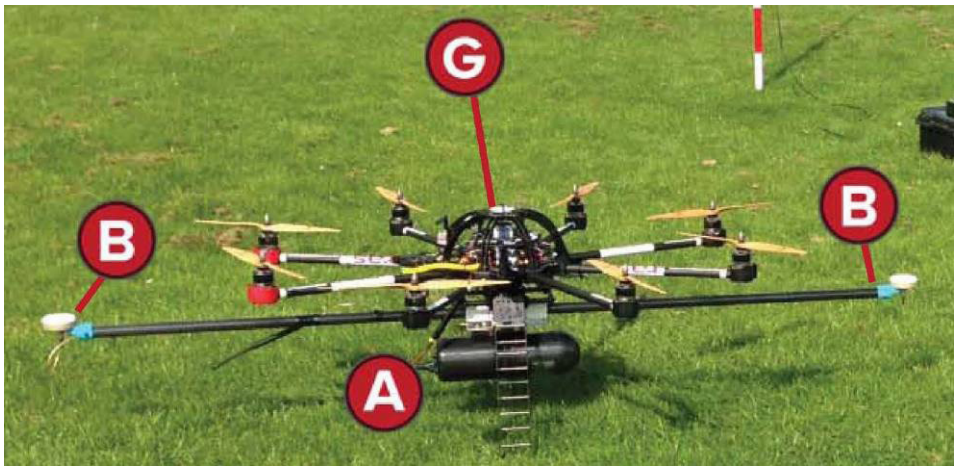


Figura 5. Componentes del sistema «TerraSystem-LidarPod».

El control en vuelo del sistema TerraSystem-LidarPod se realiza desde la estación en tierra «Ground Station». Este es un componente esencial del sistema, ya que garantiza las correcciones de posición RTK GNSS que se transmiten al sistema LidarPod y el control de su estatus. Como unidad de almacenamiento de datos se incorpora un disco duro capaz de almacenar 130 Gb de datos, que equivaldría aproximadamente a unas 13 horas de vuelo.

En cuanto a la influencia de cada uno de estos componentes en la precisión final de la nube de puntos georreferenciada, se deben tener en cuenta tres aspectos esenciales: la precisión en el posicionamiento

GNSS/RTK, la precisión en la determinación de la distancia obtenida por el sensor LIDAR (rango) y la precisión en la orientación del sistema inercial INS.

Dependiendo de la altura de vuelo, la influencia del error de orientación producido por el sistema inercial será mayor. Con el sistema TerraSystem-LidarPod se pueden obtener nubes de puntos del terreno con una precisión de 4 cm a unos 20 m de altura de vuelo y unos 6 cm a 40 m, en cuyo caso se obtendrían aproximadamente 312 puntos por m^2.

El sistema **Maverick**, fabricado por la compañía Teledyne Optech (figura 6), es un sistema especialmente diseñado para su sencilla implementación en vehículos terrestres. Con un peso inferior a 9 kg y unas dimensiones de 36 x 34 x 21 cm, puede ser fácilmente instalado y manipulado por un solo operador. El sistema tan solo requiere alimentación 12-23 VCD, que puede ser proporcionada directamente de la batería del vehículo o de una batería incorporada al sistema.

Gracias a esta circunstancia, el sistema Maverick se puede implementar en una gran variedad de plataformas terrestres: *segways*; trenes; mochilas; vehículos 4x4; turismos; furgonetas... En la base del sistema (figura 6) también se incorporan dos unidades de almacenamiento de 1 TB cada una.

Durante la toma de datos tendremos un control total del sistema desde un dispositivo *Tablet*, en el cual, mediante una conexión *Wifi*, podremos realizar las labores de configuración y control de la toma de datos, además de visualizar en un mapa la trayectoria del vehículo y los datos que se están tomando.

Al igual que el sistema RouteScene-LidarPod, entre sus componentes cabe destacar el sensor LIDAR integrado Velodyne HDL-32e con las características antes mencionadas.

Para su correcto posicionamiento, el sistema Maverick incorpora una unidad GNSS\INS NovAtel SPAN-IGM-S1. Esta unidad proporciona la posición del sistema en todo momento con precisiones que van desde unos 60 cm cuando el sistema trabaja de forma autónoma, hasta 2 o 3 cm + 1 ppm cuando utilizamos las opciones de postprocesado RTK, que mediante las correcciones GNSS suministradas por una base GNSS pública nos permite mejorar la trayectoria generada por el sistema y así aumentar su precisión en el posicionamiento.

El sistema se complementa con una cámara 360º Ladybug 5, que con sus 6 sensores nos va a proporcionar una imagen panorámica de 30 MP que abarcará el 90 % de la esfera. Gracias a este dispositivo seremos capaces de obtener imágenes en las posiciones que consideremos adecuadas mientras avanzamos con el vehículo. Posteriormente se puede aplicar el color de la imagen a la nube de puntos, facilitando en gran medida las tareas de identificación de elementos en la propia nube de puntos.

Figura 6. Sistema Teledyne Optech «Maverick».

En resumen, la precisión de los datos obtenidos con el sistema Mobile Mapping Maverick, al igual que en el sistema RouteScene-LidarPod, va a estar influenciada por el error en rango del propio sensor LIDAR, el error de posicionamiento de la unidad GNSS y la precisión en la orientación del sensor INS. Tras una labor de postprocesado de los datos, con el sistema Mobile Mapping Maverick podemos obtener nubes de puntos georreferenciadas con precisiones muy aproximadas a las obtenidas con el sistema RouteScene-LidarPod.

3. Resultados

3.1. Edición de los datos obtenidos

Los resultados obtenidos con ambas tecnologías serán las anteriormente mencionadas «nubes de puntos». Las nubes de puntos son un conjunto de vértices (puntos) identificados por su posición (coordenadas X, Y y Z) en un determinado sistema de coordenadas y que representan la superficie del terreno y cualquier elemento que esté ubicado en el mismo escenario.

Tanto en el sistema RouteScene-LidarPod como el sistema Mobile Mapping Maverick, todo el procesado y almacenamiento de los datos se realiza de forma automática. Una vez finalizada la captura, los datos se pueden visualizar y editar en los paquetes de *software* suministrados y desarrollados por cada fabricante. «Lidar Viewer» (figura 7a) en el caso del sistema RouteScene-LidarPod y Distillery (figura 7b) en el caso del sistema Mobile Mapping Maverick.

En estos paquetes de *software* se realizarán las tareas de control de calidad, ajuste, filtrado, diezmado, selección de detalles y exportación de la nube de puntos entre otras.

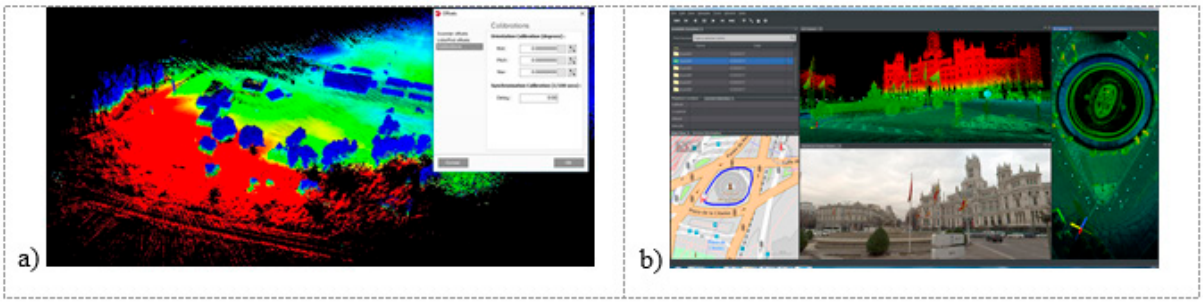


Figura 7. Paquetes de software «LidarViewer» y «Distillery».

3.2. Aplicaciones y ejemplos reales

La utilización de sensores LIDAR tanto en plataformas aéreas como terrestres han cambiado sustancialmente los procedimientos de captura de datos geométricos georreferenciados del terreno, apareciendo nuevas aplicaciones y aumentando la productividad en las aplicaciones ya existentes. Entre ellas cabe destacar:

Topografía y cartografía:

La utilización de tecnología LIDAR permite una considerable reducción de los tiempos de captura de datos además de facilitar el acceso a zonas de complicada orografía que con los métodos tradicionales sería imposible. El procesado de datos LIDAR es también más sencillo y más rápido que con las metodologías tradicionales.

Cuando requerimos de datos geométricos para la realización de levantamientos cartográficos en zonas urbanas, los sistemas Mobile Mapping como Maverick nos dan la posibilidad de obtener la geometría de cualquier elemento urbanístico de una manera ágil y eficiente. Tanto los elementos verticales como fachadas, elementos horizontales, túneles o puentes no son un problema para este sistema, obteniendo datos geométricos georreferenciados de cada uno de ellos.

Carreteras, vías férreas e ingeniería civil:

En las autovías, autopistas y carreteras, la gestión de activos a lo largo de la vía para construir, mantener y vigilar la infraestructura supone grandes inversiones en tiempo y dinero. En estas tareas es necesaria la captura de gran cantidad de datos geométricos para controlar diversos factores como son el estado del pavimento, el alumbrado público, señalización, mobiliario urbano, control de viaductos, puentes, deslizamientos de tierras, seguridad… Dependiendo de las circunstancias de cada aplicación, podemos utilizar sistemas aerotransportados o terrestres para la captura de estos datos geométricos (figura 8).

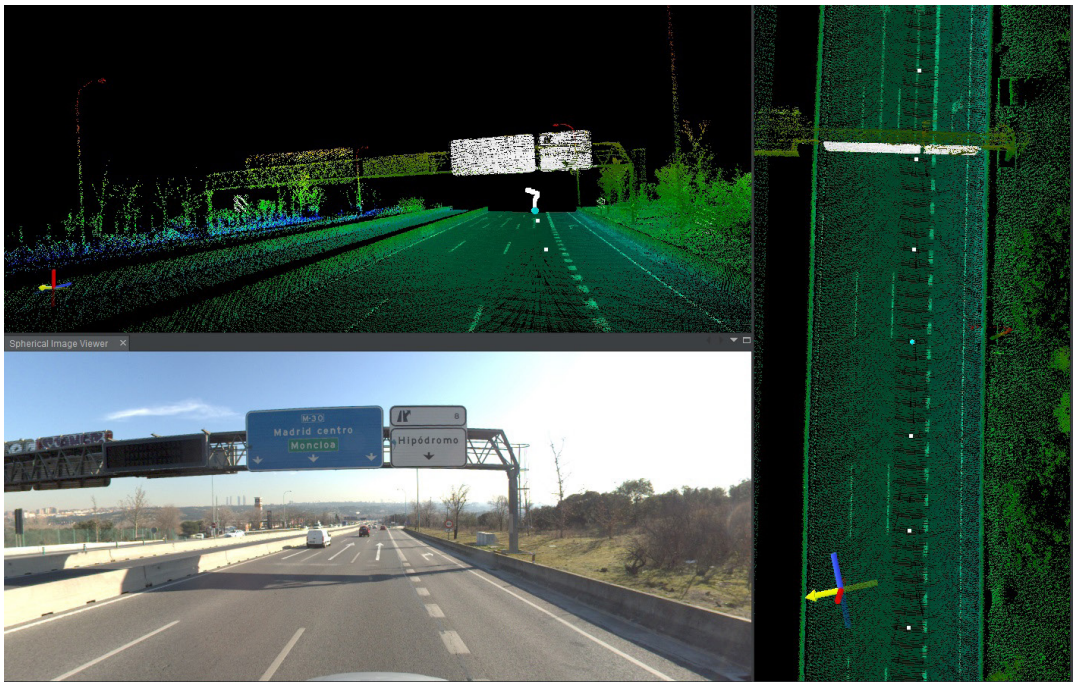


Figura 8. Autovía tomada con el sistema Mobile Mapping Maverick.

Gestión forestal:

Con este tipo de tecnología es posible la gestión de espacios forestales facilitando las tareas de protección, accesibilidad, cálculo de biomasa, planificación del drenaje e incluso el estado de salud del bosque (figura 9). Una gran ventaja de la tecnología LIDAR es la penetrabilidad en áreas de bosque, que nos permite obtener datos precisos del suelo forestal.

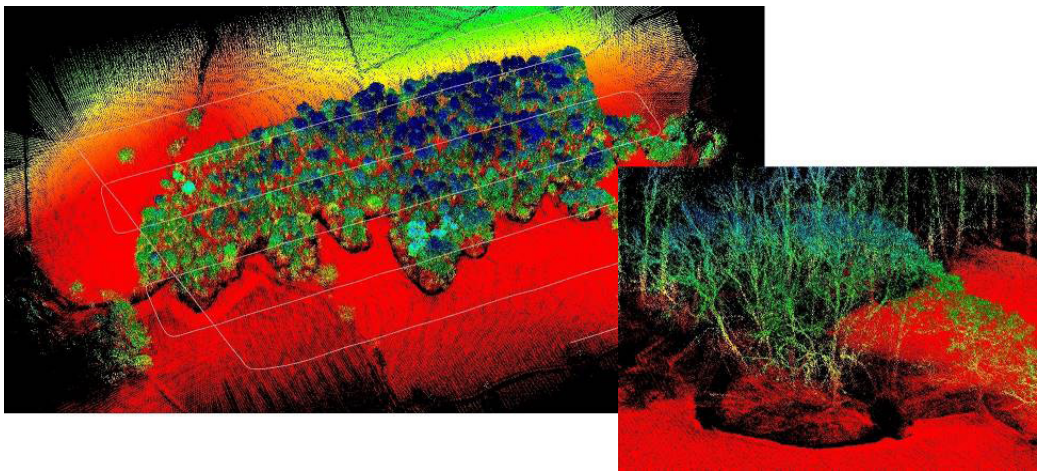


Figura 9. Masa forestal tomada con el sistema RouteScene-LidarPod.

Fuentes de energía e infraestructuras energéticas:

Una de las mayores demandas de estas tecnologías se encuentra en la inspección y vigilancia de infraestructuras energéticas y fuentes de energía. Estas infraestructuras son puntos de especial sensibilidad por lo que es determinante la obtención de datos actualizados en cortos periodos de tiempo (figura 10).

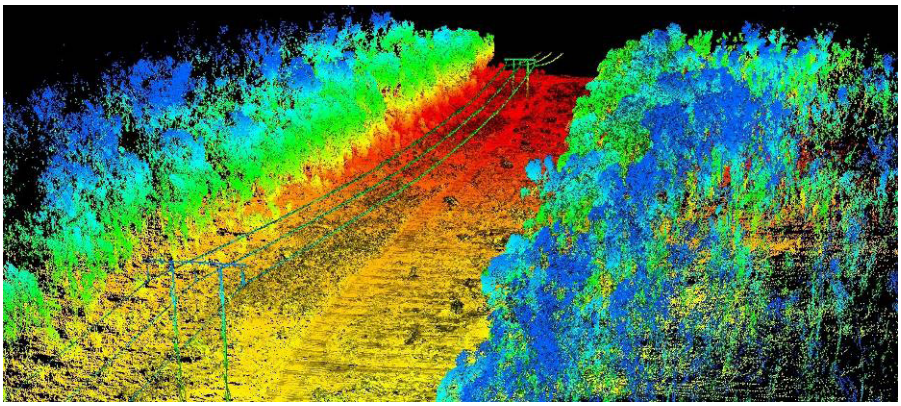


Figura 10. Red eléctrica tomada con el sistema RouteScene-LidarPod.

Además de las anteriores aplicaciones mencionadas, no debemos olvidar la principal ventaja de la tecnología LIDAR y Mobile Mapping: la adquisición rápida, fácil e inmediata de gran cantidad de datos geométricos georreferenciados. Por lo tanto podemos afirmar que cualquier labor que tenga la necesidad de obtención de gran cantidad de datos geométricos georreferenciados y que por su ámbito de trabajo posibilita la utilización de plataformas aéreas o terrestres es particularmente susceptible de la aplicación de esta tecnología.

Bibliografía

1. RIEMESRSMA, G. «Experiences and potential of UAV LIDAR surveys». Edimburg: Routescene.
2. TAPADINHAS, A. «Disruptive 3D mapping solutions». Edimburg: Routescene.
3. IGN-CNIG. (2016) «Curso de teledetección, fotogrametría, Lidar y ocupación del suelo». Madrid, España.
4. TELEDYNE OPTECH. «Optech Maverick Mobile Mapping System».

Los láseres pulsados ultraintensos

Roso Franco, Luis[1]

[1] Centro de Láseres Pulsados, CLPU, Parque Científico, 37184.

Email: roso@clpu.es

Resumen

La tecnología láser está avanzando de forma espectacular en las últimas décadas. Los láseres intensos se han posicionado como una alternativa de futuro a los sistemas defensivos convencionales dada su capacidad de disparo, la velocidad a que se propaga que lo hace instantáneo y el necesitar munición. Este avance reciente viene acompañado por una mejor eficiencia energética de los sistemas y un desarrollo más compacto y fiable. Lo que los van consolidando como alternativa en muchas situaciones. Sin embargo el objetivo final de un láser de defensa es el de dañar o destruir un objetivo. Pensado como un problema de física eso se traduce en un problema de interacción luz-materia. A baja intensidad esa interacción es bien conocida, pero de poco interés en el presente contexto. Además, la contramedida obvia es el espejado de las superficies que pueden ser atacadas. Cuando vamos a intensidades mayores los efectos son muy diferentes, especialmente cuando consideramos láseres muy intensos. Existen regiones distintas y fenomenologías variadas. En base a la experiencia adquirida en el CLPU se pretende analizar este problema desde una visión actualizada. Adicionalmente, en Salamanca hemos estudiado la propagación de láseres pulsados intensos en aire y las limitaciones que se tienen. El Centro de Láseres Pulsados, CLPU, es una infraestructura científico técnica singular (ICTS) adscrita a la Administración General del Estado y que está especializada en láseres pulsados de duraciones muy breves (sub-picosegundo) y muy intensos. El elemento principal es el láser VEGA, un láser de Petavatio (30 J/ 30 fs) capaz de disparar una vez por segundo y que es uno de los muy pocos sistemas de Petavatio operativos en el mundo que llegan a esta cadencia de disparo. El objetivo de esta presentación es dar a conocer las capacidades del CLPU para poder transferir adecuadamente este conocimiento.

Palabras clave

Láseres de pulso corto, láseres intensos, efectos no lineales, fotoablacion con pulso corto.

1. Introducción

El Centro de Láseres Pulsados de Salamanca, CLPU, es la instalación nacional de referencia en láseres pulsados intensos. Los láseres más potentes de España están en el CLPU. Además, la interacción de esos láseres con materiales (metálicos, dieléctricos, etc…) es muy diversa dependiendo de las intensidades alcanzadas y de las duraciones de los pulsos. El CLPU es especialista en láseres intensos y en interacción láser-materia. El objetivo de esta ponencia es dar a conocer las posibilidades de las tecnologías de láseres pulsados más avanzadas.

Figura 1. Vista del Centro de Láseres Pulsados, CLPU.

Si nos remontamos a los orígenes, es bien sabido que el primer láser lo construyó Theodor Maiman en 1960, como consecuencia de los trabajos de una serie de científicos encabezados por Charles Townes. Al principio el láser ni siquiera se denominaba así, sino que se denominó máser óptico. Máser es un acrónimo de las palabras inglesas «Microwave Amplification by Stimulated Emision of Radiation» (amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación), que es una manera muy gráfica de indicar lo que realmente es un sistema así, pues se amplifica la luz por el efecto cuántico conocido como emisión estimulada de radiación.

Desde la realización del primer láser, la idea de obtener pulsos de luz cada vez más potentes y más cortos ha sido un campo de constante interés y desarrollo. Pocos años después del desarrollo de los primeros láseres se vio el interés por generar pulsos cortos e intensos, es decir, por concentrar la energía en el tiempo de la misma forma que una lupa al focalizar nos permite concentrar la energía en el espacio. Las primeras técnicas de generar pulsos se basaban en un brusco cambio del denominado factor de calidad de la cavidad, para lograr una especie de estado sobreexcitado que radiase de golpe al hacer la cavidad suficientemente buena. Estas técnicas se suelen denominar *Q-switching*, indicando que se modifica sú-

bitamente (se conmuta) el factor de calidad, *Q*, de la cavidad. El *Q-switching* no permite ir más abajo del nanosegundo.

Combinando muchos modos de la cavidad láser con diversos sistemas para bloquear la fase relativa de los diferentes modos, se obtuvieron los láseres con *mode-locking*, o láseres con anclaje de modos. Los láseres *mode-loking* han permitido obtener con relativa facilidad pulsos muy cortos y han representado durante más de tres décadas la frontera de los láseres. Desde hace más de veinte años se obtienen láseres de picosegundo. Como pulso ultracorto implica banda de frecuencias muy ancha, la investigación ha ido hacia la búsqueda de medios activos para láseres que tengan una banda de emisión cada vez más amplia. Inicialmente se trabajó con moléculas orgánicas de colorante. Durante las últimas décadas se han empleado muy diferentes materiales buscando bien la anchura de banda o bien las características del cristal o del vidrio. Hace dos o tres décadas la estrella era el Neodimio, bien en una matriz cristalina (granate de ytrio y aluminio, YAG, la más habitual, o otras muchas más) o en un vidrio. Ahora la moda son los láseres vibrónicos de estado sólido, y entre ellos el ti:zafiro, un cristal de zafiro (corindón) sintético dopado con titanio, es el más usado, pero hay muchos nuevos cristales en desarrollo.

Desde el arranque de la tecnología láser se intentó poner más y más energía en el haz de luz. Evidentemente la energía del haz puede ser infinitamente grande si se espera un tiempo infinitamente largo, pero eso no es lo interesante. El reto consiste en poner toda la energía que sea posible en una fracción de segundo (a escalas de nanosegundo o menos) de duración.

2. Los láseres pulsados ultraintensos

Los láseres han ido evolucionando de forma constante durante más de medio siglo. Sin embargo hacia 1985 se produjo un cambio drástico, la tecnología CPA (de *Chirped Pulse Amplification*). Esta tecnología, propuesta por Gerard Mourou y Donna Strickland, entonces en la Universidad de Rochester, NY, consiste en amplificar un pulso de picosegundo o femtosegundo a base de hacerlo pasar por un medio dispersivo que lo estire (habitualmente un factor mil o diez mil). Al repartir su energía en el tiempo nos alejamos del umbral de daño y podemos amplificarlo más. Finalmente hemos de re-comprimir el pulso empleando un segundo sistema dispersivo contrario al anterior (de forma que las frecuencias que antes tenían una velocidad de fase mayor ahora tengan una velocidad menor, y viceversa). El resultado es una nueva tecnología que ha revolucionado la amplificación de los láseres pulsados. Los elementos clave de un sistema CPA son pues el oscilador –el láser propiamente dicho que genera los pulsos ultracortos–, el estirador (*stretcher*) –que expande el pulso un factor superior a mil– el/los amplificador/es –que aumentan la energía del pulso, empleando habitualmente el mismo medio activo que el oscilador– y el compresor –que es un sistema «simétrico» al estirados y que recomprime del pulso hasta su duración inicial–.

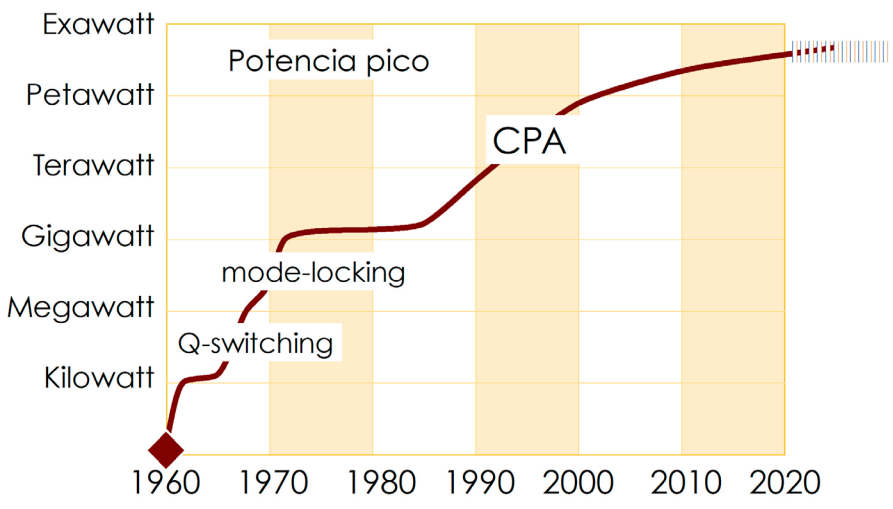


Figura 2. Evolución de la potencia pico de los láseres con los años.

El éxito de los trabajos del grupo de Gerard Mourou fue el de diseñar sistemas de compresión que volviesen los pulsos a su duración inicial. Aunque el teravatio se había alcanzado ya antes, estos trabajos fueron muy notables porque permitieron considerar la idea de un láser así de potente en un laboratorio medio en lugar de en un gran laboratorio nacional. A esa tecnología se le denominó durante su primera década tecnología *Table Top Terawatt* [1]. Eso, tres décadas después, ha abierto el camino a sistemas ultrapotentes como el láser petavatio de Salamanca o a sistemas menos potentes (a nivel de gigavatio) pero extraordinariamente compactos.

La figura 2 muestra la evolución de la potencia pico de los láseres con los años. La tecnología CPA representó en los años ochenta, un avance extraordinario. Ahora parece que la tecnología CPA empieza a saturar y se está considerando seriamente la búsqueda de alternativas para las próximas décadas. Con la tecnología actual no es posible pasar de 100 PW, en un único haz.

3. Interacción láser materia

Los pulsos ultracortos ultraintensos han cambiado nuestro conocimiento de la interacción luz-materia. Se ha visto que el parámetro clave no es solamente la energía depositada por unidad de superficie (julios/cm^2). La velocidad con la que se deposita esta energía (vatios/cm^2) es tanto o más fundamental, es decir, la fenomenología viene dada también por la intensidad. En la superficie de la tierra recibimos aproximadamente (en la latitud de España en un mediodía de verano) 100 W/cm^2, podemos utilizar ese valor como referencia. Hasta intensidades del orden de 10^{10} W/cm^2 se tiene una respuesta dominada por el calentamiento del material sobre el que incide el láser. Sin embargo a partir de ese valor empiezan a aparecer efectos de ionización, que son absolutamente dominantes por encima de 10^{16} W/cm^2. A intensidades aproximadamente de 10^{16} W/cm^2 (para láseres de infrarrojo cercano al visible) el campo eléctrico del láser es suficiente para arrancar los electrones externos de cualquier átomo de la tabla periódica. Sin entrar en detalle, y generalizando algunos conceptos, por encima de esa intensidad al ionizarse los átomos se forma un plasma de electrones e iones positivos. La nube de electrones ionizados se dispersa inmediatamente y el exceso de carga positiva tiene una repulsión explosiva (explosión de Coulomb) que acaba destruyendo el punto del material donde ha incidido el láser.

Quizás el valor 10^{16} W/cm^2 pueda parecer extraordinario, pero no lo es. Se puede llegar a esa intensidad focalizando convenientemente un pulso de pocos mJ de energía a potencias de GW. Por encima de ese valor la dinámica de la ionización es más compleja. A 10^{18} W/cm^2 , para láseres en el infrarrojo cercano, los campos eléctrico y magnético del propio láser son tan intensos que los electrones pasan en femtosegundos de reposo a velocidades relativistas. Eso queda ya fuera del ámbito del presente escrito, pero hemos de decir que es un régimen de trabajo en el que estamos habitualmente en Salamanca, hasta 10^{21} W/cm^2. El récord mundial está alrededor de los 10^{16} W/cm^2. Obsérvese que damos un valor aproximado por que el problema mayor es la propia medida directa de esas intensidades tan extraordinariamente grandes.

Figura 3. Láseres pulsados.

En la figura 3 se muestra esquemáticamente un láser pulsado, para resaltar gráficamente la idea que representa. Un láser de 30 femtosegundos que emita 10 pulsos por segundo, emite un pulso de 10 micras y emite el siguiente de otras 10 micras cuando el anterior está a treinta mil kilómetros. Es evidente que

no se puede llegar a intensidades extremas de forma continua. Un laser de GW en contínuo es inviable, por eso se tienen láseres con potencias medias de kW a decenas de kW como mucho.

En conclusión, el efecto de un láser sobre la materia puede ser desde calentamiento (para pulsos largos) hasta fotoionización (para pulsos muy cortos) pasando por una serie de fenomenología intermedia. El el CLPU de Salamanca se tiene experiencia en diversos regímenes con diversos materiales y se tiene herramientas para analizar y prever muchas situaciones (duración de pulso frente a características del material sobre el que se ha de disparar).

En el caso de que aparezcan varias imágenes se introducirán en una tabla con bordes invisibles como las del ejemplo de la figura 2**.**.

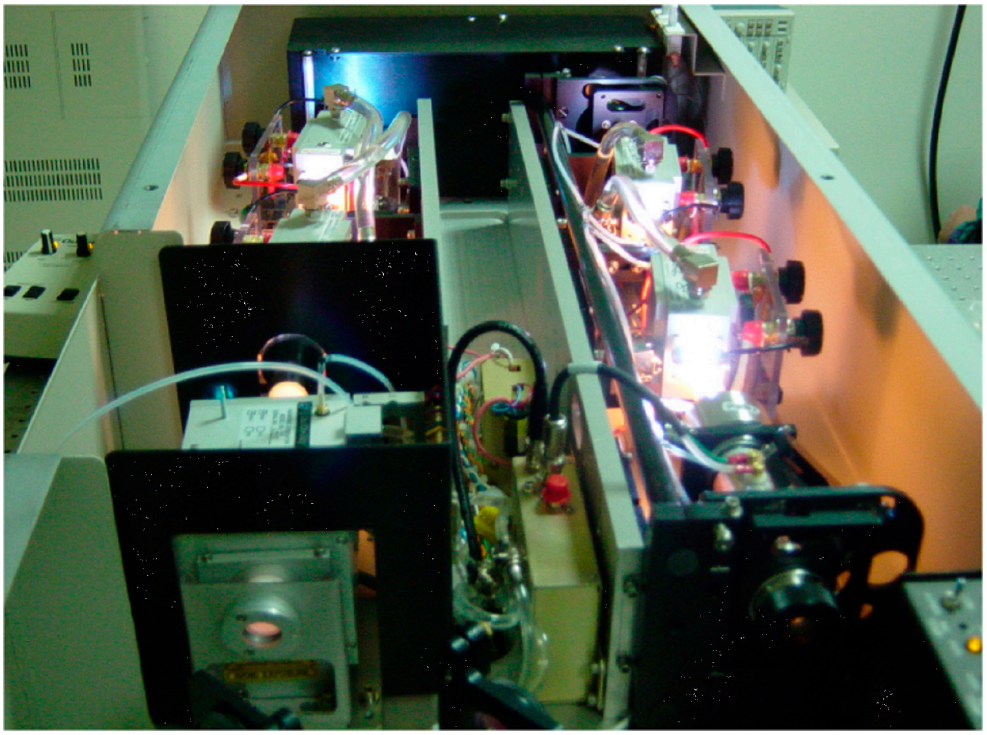


Figura 4. Láser Q-Switch de Nd:YAG.

La figura 4 muestra un láser *Q-switch* de Nd:YAG bombeado por lámparas de flash a un disparo por segundo. Hay dos módulos láser intracavidad (a la derecha de la imagen y otros dos extra-cavidad (a la izquierda de la imagen, al fondo). Al frente a la izquierda se aprecia un sistema de doblado de la frecuencia de los fotones, que convierte dos fotones de 1.064 nm (infrarrojo) en un foton de 532 nm (verde). Este láser verde es como los que se usan para bombear el titanio:zafiro. Los láseres *Q-Switch* como este emiten en pocas decenas de ns y tienen muchas otras utilidades industriales y científicas.

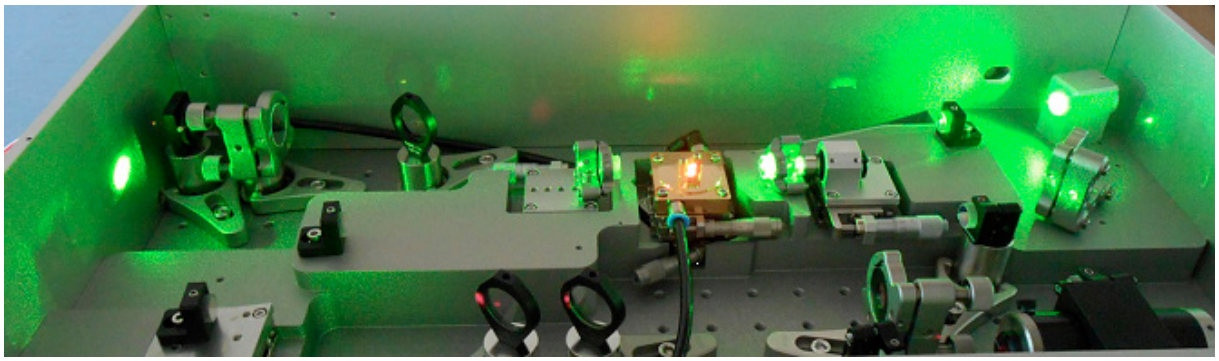


Figura 5. Interior de un láser con mode-locking.

La figura 5 muestra el interior de un sistema láser con *mode-locking* de titanio:zafiro similar al oscilador de nuestro laser. El cristal de titanio:zafiro es el elemento central (colocado en una montura de cobre para su refrigeración). El bombeo es luz de un laser de neodimio doblado en frecuencia.

Figura 6. Amplificador final del sistema de PW (VEGA-3) de Salamanca.

4. El sistema VEGA de Salamanca

VEGA es el primer láser de España que llega a la potencia pico de petavatio, eso es una potencia brutal que se consigue a base de conseguir pulsos muy cortos amplificados al límite. Un Vatio es un Julio en un segundo. Si tuviésemos que tener un PW en continuo necesitaríamos decenas de miles de veces la potencia eléctrica de toda España. Evidentemente no se trata de un láser continuo si no un láser pulsado (de ahí el nombre de nuestro centro láser).

El laser VEGA tiene diversas etapas de amplificación. La ultima etapa, mostrada en la figura 6, es la que permite llegar al PW de potencia pico. Además dispone de dos salidas adicionales sincronizadas (ya que provienen de un mismo pulso del oscilador), una a 20 TW (VEGA-1) y otra a 200 TW (VEGA-2). Estos dos últimos dan hasta 10 disparos por segundo. El PW llega solamente a producir un disparo cada segundo. Esto puede parecer un valor escaso, pero representa la vanguardia del conocimiento a nivel mundial. En todo el mundo solo hay operativos en este momento, que tengamos constancia, tres láseres de PW a un disparo por segundo (uno en Berkeley, California, otro en Dresden, Alemania y nuestro laser en Salamanca). Hay otros sistemas en construcción que se unirán a esta lista en breve.

VEGA	Potencia	Energía	Duración	Cadencia
VEGA 1	20 TW	600 mJ	30 fs	10 / sec
VEGA 2	200 TW	6 J	30 fs	10 / sec
VEGA 3	1 PW	30 J	30 fs	1 /sec

Tabla 1. Especificaciones técnicas del sistema láser VEGA

En la tabla 1 se muestran los principales parámetros del láser VEGA de Salamanca. VEGA tiene tres salidas que proceden de un pulso común y que por ello pueden sincronizarse de forma muy eficiente.

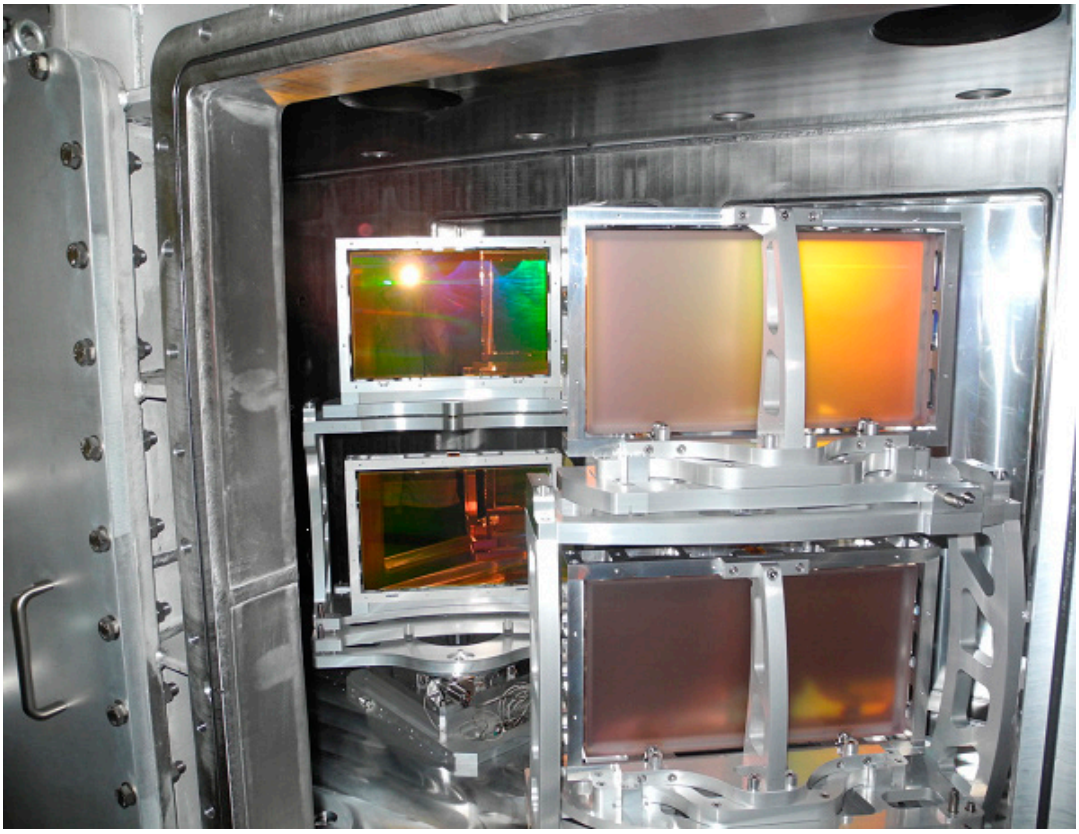


Figura 7. Detalle del interior del compresor de PW.

La figura 7 muestra el interior del compresor en vacío del láser de PW (VEGA-3). El compresor consiste en dos parejas de redes de difracción (recubiertas de oro, de ahí su color). Cada una de ellas es de más de 50 cm de anchura. A la salida del compresor el haz se ha de propagar en vacío ya que es tan potente que ionizaría el propio aire.

5. Conclusiones

Hemos visto que los láseres pulsados son una herramienta tecnológica muy diferente a los láseres convencionales, y esta diferencia es tanto más destacada cuanto más corta es la duración del pulso.

En el CLPU de Salamanca están operativos los láseres más potentes de España, y en concreto el laser VEGA, un láser infrarrojo que llega al Petavatio de potencia pico.

El láser VEGA y los demás láseres del CLPU están a disposición de los usuarios científico-técnicos. A lo largo de los años, el CLPU ha desarrollado un importante *know how* propio tecnológico y está en condiciones de desarrollar láseres *ad-hoc* para aplicaciones concretas. El CLPU también está en disposición de avanzar en la interacción de láseres extremos con materiales diversos y en ver las condiciones de pulsos mas efectivas para ablación.

Es importante destacar que VEGA es un láser que no se prevé sea directamente útil como efector laser. Sin embargo, hay muchos elementos tecnológicos desarrollados alrededor de VEGA que posiblemente sean de aplicación en este sector.

Por último indicar que con 100 fs y pocos mJ por disparo (nuestro sistema «menor» al que denominamos HRR, de *High Repetition Rate*, pues emite mil disparos por segundo), en condiciones de trabajo adecuadas se puede perforar, con un número conveniente de disparos, absolutamente cualquier material. Es imposible encontrar un material imperforable, o por lo menos, estamos convencidos de eso y retamos a quien lo desee a traer un material que no podamos perforar (insistimos en condiciones de laboratorio, no de campo).

Agradecimientos

El equipo investigador ha recibido financiación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del proyecto PALMA FIS2016-81056-R, de Laserlab Europe IV Grant No. 654148, y de la Junta de Castilla y León, CLP087U16. Se reconoce la financiación parcial del Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER.

Referencias

1. *Mourou G. A., Barty Ch. P. J. y Perry M. D., Ultrahigh-Intensity Lasers: Physics of the Extreme on a Tabletop, Physics Today, Enero 1988, p. 22.*

Desarrollo de sistemas para aplicaciones LIDAR

Rodríguez-Cortina, Mónica[1,*], Adamiec, Pawel[1], Machón, Álvaro[1], Perez-Serrano, Antonio[2], Esquivias, Ignacio[2], Barbero, Juan[1] y López, Demetrio[1]

[1] Alter Technology TÜV Nord, Tres Cantos, Madrid, Spain.

monica.rodriguez@altertechnology.com: (MRC), pawel.adamiec@altertechnology.com: (PA) , alvaro.machon@altertecnology.com: (AMB), juan.barbero@altertechnology.com: (JBG), demetrio.lopez@altertechnology.com: (DLM).

2 CEMDATIC-ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid. ignacio.esquivias@upm.es: (IEM), antonio.perez.serrano@upm.es: (APS).

* Mónica Rodríguez Cortina; monica.rodriguez@altertechnology.com: (MRC).

Resumen

La técnica LIDAR es una poderosa herramienta que usa la luz láser para detectar diferentes elementos, calcular la distancia a un objeto o determinar las propiedades físicas de la materia debido a la interacción de la radiación con el objeto. El principio de medida consiste en enviar uno o varios haces láser en determinadas longitudes de onda y analizar la señal de retorno después de impactar con el objetivo a evaluar. Es utilizada ampliamente en aplicaciones meteorológicas, espaciales, de aviación o militares.

En este marco, ALTER TECHNOLOGY TÜV NORD S.A.U. (ATN) ha participado activamente en dos proyectos europeos (BRITESPACE y HOLDON) en el desarrollo de sistemas LIDAR para detectar y cuantificar la concentración de los gases de efecto invernadero. En BRITESPACE, ATN ha desarrollado una unidad de estabilización de frecuencias debido a que los sistemas «Integrated Path Differential Absorption» (IPDA) LIDAR requieren una excelente estabilización de la frecuencia para una estimación precisa de la concentración de la molécula de gas. En HOLDON, ATN está inmerso en el desarrollo de un sistema de emulación de ecos LIDAR en las regiones de infrarrojo cercano (NIR)/visible (VIS)/ y ultravioleta (UV) para caracterizar los parámetros ópticos críticos de un «Avalanche PhotoDetector» (APD) basado en HgCdTe. En este último tema, ATN ya ha realizado un emulador de ecos LIDAR en el NIR y está inmerso en expandirlo a VIS y UV. Este sistema ofrece la posibilidad de dar forma a los pulsos de luz permitiendo emular diferentes blancos, tales como la vegetación, las nubes o la absorción de gases.

En el campo de la defensa y la seguridad, esta tecnología está despuntando por su gran utilidad para detectar elementos que utilizan técnicas de ocultación (*stealth*), la mayoría usadas en aviones y barcos, para hacerlas menos visibles al radar, pero perfectamente visibles para un LIDAR.

Palabras clave

LIDAR, estabilización de frecuencia, emulador, láser, IPDA, HgCdTe APD.

1. Introducción

En la actualidad, la técnica LIDAR es una poderosa herramienta que se utiliza en un amplio campo de aplicaciones. Desde sistemas que detectan y cuantifican la concentración de gases de efecto invernadero o la contaminación en la Tierra, hasta sistemas que realizan el mapeado de la superficie terrestre o la profundidad submarina. Esta técnica se puede implementar tanto en naves tripuladas como en sistemas móviles no tripulados (UAV). También existen sistemas LIDAR que miden la velocidad y dirección del viento, por tanto, son útiles para que los generadores eólicos se alineen adecuadamente en función de la velocidad y de sentido del viento optimizando la captación de energía. Una de las aplicaciones donde el LIDAR se ha convertido en una tecnología muy importante es en la fabricación de vehículos autónomos.

La técnica LIDAR se basa en utilizar la luz láser para la detección de diferentes elementos, calcular la distancia a un objeto o determinar las propiedades físicas de la materia debido a la interacción de la radiación con el objeto. En un sistema LIDAR las partes más críticas son los emisores y receptores, y recientemente, también la rapidez en el procesado de datos sobre todo para las aplicaciones LIDAR en tiempo real.

Para trabajar de forma cómoda y segura con los sistemas LIDAR, se ha establecido una limitación en la parte emisora, es decir, la potencia máxima del láser se debe limitar a los niveles seguros para los ojos humanos. Esto implica la necesidad de desarrollar detectores muy sensibles, capaces de detectar cada fotón útil, y de diseñar sistemas LIDAR con láseres de baja potencia, telescopios más pequeños, lo que lleva a soluciones compactas, fiables y asequibles.

En este marco, ALTER TECHNOLOGY TÜV NORD S.A.U. (ATN) ha participado activamente en dos proyectos europeos (BRITESPACE [1] y HOLDON [2]) en el desarrollo de sistemas LIDAR para detectar y cuantificar la concentración de los gases de efecto invernadero. En este artículo se detallan en profundidad los sistemas que se han desarrollado para aplicaciones LIDAR en los proyectos citados anteriormente.

2. Unidad de estabilización de frecuencias (FSU)

2.1. Principio de funcionamiento

Uno de los proyectos en los que participó ATN fue BRITESPACE (fuentes basadas en láser de semiconductor de alto brillo para aplicaciones espaciales en la observación de la Tierra) [3] [4] [5]. El objetivo de este proyecto fue demostrar la viabilidad de una fuente de láser basada en un láser semiconductor con estructura integrada «Master Oscillator Power Amplifier» (MOPA) para ser utilizado como un transmisor en un sistema LIDAR de absorción diferencial de camino integrado (IPDA) para observar y controlar las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. El término absorción diferencial se refiere a la diferencia de absorción de un par de líneas láser con longitudes de onda ligeramente diferentes: la longitud de onda en línea (*On Line* ONL) está cerca del centro de una línea de absorción de CO_2, mientras que la longitud de onda fuera de línea (*Off Line* OFFL) se establece cerca de la misma línea de absorción

(fig.1a), pero fuera de ella. Por lo tanto, la absorción relativa de las moléculas de CO_2 se puede calcular por la relación de potencia de las señales retrodispersas al final de la ruta óptica (fig. 1b).

El diseño de un LIDAR IPDA completo consta del transmisor láser, la óptica para la transmisión y recepción del haz, y la electrónica de control. ATN participó activamente en el desarrollo de uno de los módulos del sistema final, una unidad de estabilización de frecuencias (FSU). Para una estimación precisa de la concentración de gas, los sistemas LIDAR IPDA requieren una muy buena estabilización de frecuencia, pues la intensidad de potencia detectada es muy sensible a la posición de la frecuencia emitida respecto a la línea de absorción, especialmente en el caso de la ONL. En nuestro caso, la línea de absorción elegida es cercana a 1.572 nm, debido a su alta absorción y su baja interferencia con las líneas de H_2O.

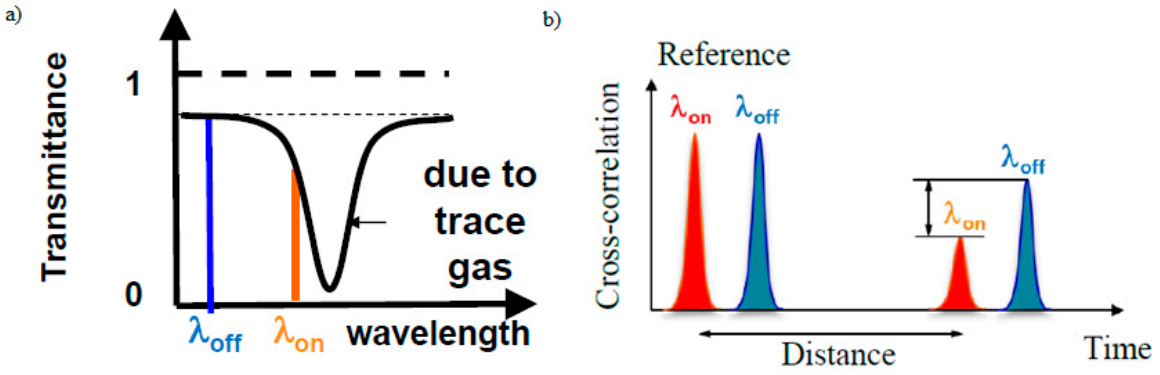


Figura 1. (a) Longitud de onda en la línea de absorción de CO2 (online) y fuera de línea (offline), (b) Relación de potencia de las señales retrodispersas al final del camino óptico.

La técnica de estabilización de frecuencia se basa en la implementación de un circuito en lazo cerrado para controlar una variable que modifica la longitud de onda real emitida por el láser que se va a estabilizar. Por lo tanto, la exactitud de la estabilización de la longitud de onda dependerá, al menos, de la precisión de control de la variable seleccionada y de la frecuencia del bucle, pero también de la respuesta temporal de la longitud de onda del láser a los cambios de esta variable. Es decir, cada tipo de láser tendrá un límite en la estabilización de longitud de onda alcanzable.

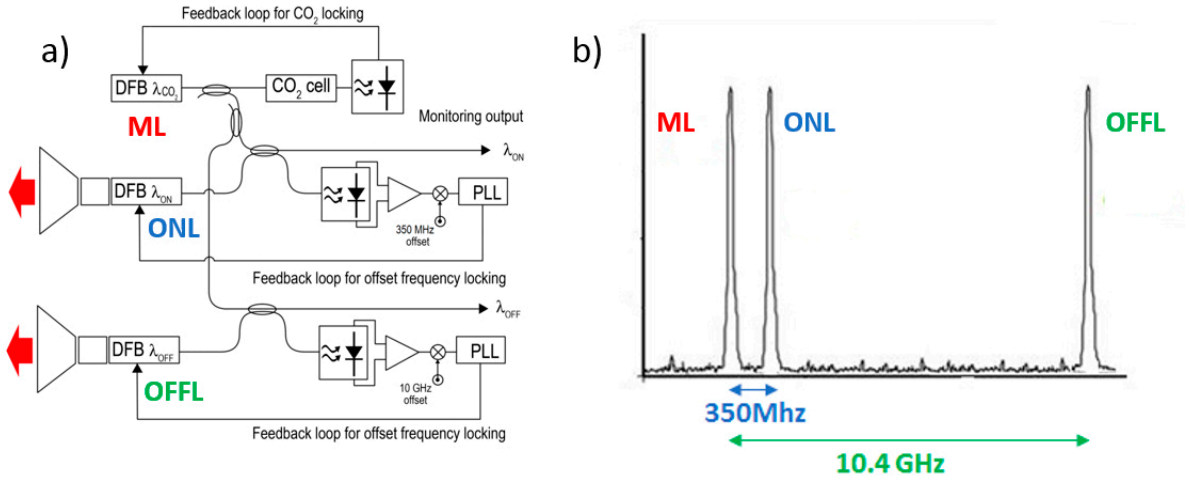


Figura 2. (a) Esquema de la FSU y (b) Ilustración de los picos de emisión de los tres láseres.

El sistema está formado por tres láseres de realimentación distribuida (*Distributed Feedback laser*, DFB) como se muestra en la fig. 2a. Un láser maestro (ML) que está bloqueado en la línea de absorción de CO_2 seleccionada utilizando una celda de referencia de CO_2 de paso múltiple y un circuito de realimentación

personalizado basado en un equipo de bloqueo de frecuencia láser disponible comercialmente. La luz emitida por el láser maestro se inyecta en los bucles de bloqueo de frecuencia ONL y OFFL y se usa para estabilizar las dichas señales con respecto a la frecuencia del láser maestro, con una separación de frecuencia ajustable de hasta 350 MHz en la ONL y de 10 GHz en la OFFL (fig. 2b)

2.2. Fabricación

En la fig. 3 se observa todos los componentes que integran el sistema final de la FSU. Las principales secciones y componentes se enumeran a continuación y se indican en la imagen: (A) tres láseres DFB (maestro y dos esclavos), (B) celda de CO_2, (C) fotodiodo de InGaAs en línea, (D) fotodiodo de InGaAs fuera de línea, (E) sección de RF (amplificadores, mezcladores y entradas del generador de señales), (F) sección óptica (fibras ópticas, acopladores y aisladores), (G) entradas LD y TEC, salidas de enclavamiento, (H) Entrada para los MOPA; y finalmente, (I) salida de monitor ON y OFF.

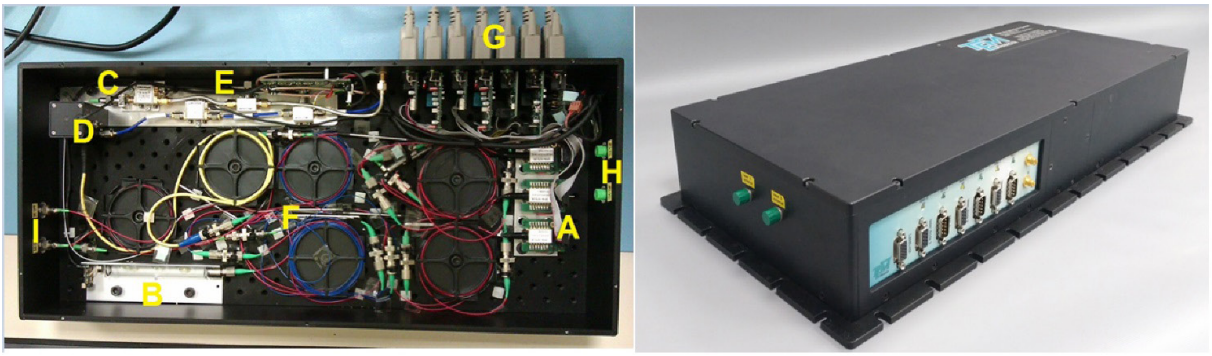


Figura 3. Sistema final de la unidad estabilizadora de frecuencia (FSU).

2.3. Resultados

Como la estabilización del láser ONL y OFFL son totalmente dependientes del láser maestro, nuestro objetivo principal es estabilizar todo lo posible el láser maestro. En mediciones realizadas en el laboratorio se ha conseguido una estabilización de aproximadamente 18 kHz en el intervalo de 23 s y se mantiene alrededor de 20 kHz hasta 50 s (fig. 4b). Esto determina el límite inferior de la estabilización para el láser ONL con este sistema. Como hemos mencionado anteriormente, la estabilización de esta línea es más importante que la de ONL porque se encuentra en la pendiente del pico de absorción del CO_2.

Se han realizado mediciones adicionales en las instalaciones del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) para obtener la estabilidad de los láseres en la FSU. Es importante tener en cuenta que la celda de gas en la FSU no está estabilizada en temperatura, por lo que los cambios en la temperatura en el laboratorio han influido significativamente en la estabilidad. Los tres láseres DFB incorporados se bloquearon y la salida de la FSU se conectó a un amplificador EDFA y luego se usó como entrada del IPDA LIDAR para el sistema desarrollado por la Universidad de Bristol (UBRIS) [3][4][5]. El LIDAR estaba operativo y se puede ver en la fig. 4a. En paralelo con el LIDAR de UBRIS, también el sistema CHARM-F [6] estaba midiendo el CO_2 en la misma dirección que el sistema UBRIS. Los resultados de la estabilización se muestran en la fig. 4c, donde se pueden ver picos significativos en los datos que se originan en el sistema UBRIS. Desaparecen si el LIDAR está apagado y pueden filtrarse por medio del aislador óptico. La estabilización en este caso fue de 240 kHz a 0,7 s (fig. 4d), lo que se debe a que la ventana se abrió y la celda de presión experimentó cambios rápidos de temperatura. Por lo tanto, se confirmó una vez más la necesidad de estabilizar la celda de CO_2 que se utiliza como referencia para el bloqueo del láser maestro. Sin embargo, los buenos resultados en las pruebas de la FSU con el IPDA confirman que el sistema es idóneo para la aplicación. Una vez que se pongan en marcha algunas mejoras que se han detectado durante las pruebas y se optimice el sistema puede utilizarse con éxito como fuente de luz para cualquier IPDA LIDAR.

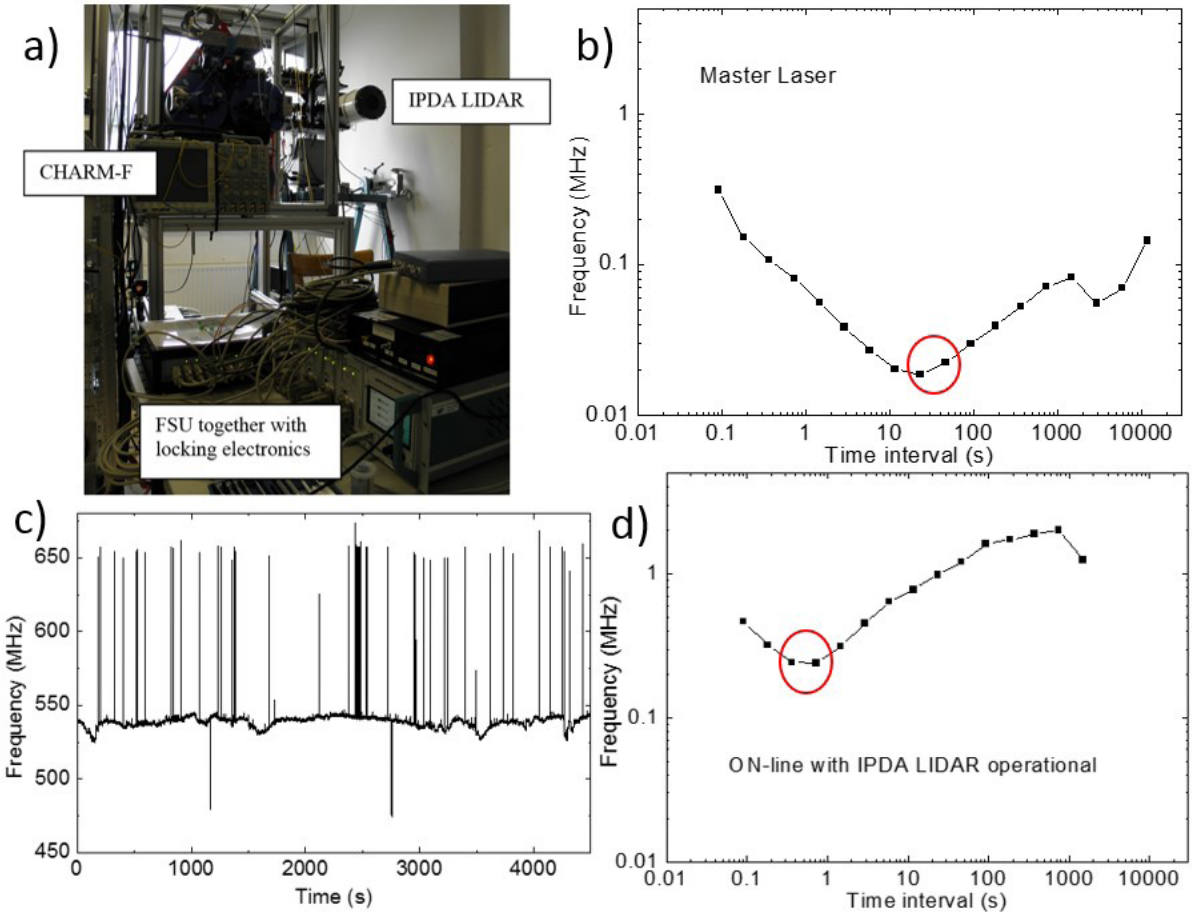


Figura 4. (a) Sistema de medición de CO2: FSU junto con IPDA LIDAR y CHARM-F, (b) Desviación Allan para el láser maestro, (c) Estabilización de ONL y (d) Desviación Allan de ONL.

3. LIDAR ECHO EMULATOR (LEE)

3.1. Requisitos

El objetivo principal del programa HOLDON es desarrollar y demostrar una cadena de detección LIDAR de alta sensibilidad, alto rango dinámico y gran versatilidad, basada en un nuevo detector APD de HgCdTe [7] [8] [9], que permitirá detectar señales con una relación señal a ruido limitada por el ruido de fotones en todo el rango dinámico óptico de 60 dB (rango dinámico de LIDAR espaciales), lo que es una mejora sustancial del estado actual de la tecnología, ya que se ha alcanzado los 46 dB hasta el momento [10] . Para caracterizar correctamente el rendimiento de este APD se establecieron los siguientes requisitos: se deben emular dos ecos (retornos) producidos por una fuente de luz en la longitud de onda de 1.064 nm: (i) eco largo con un ancho de 270 µs (equivalente a una trayectoria atmosférica de 40 km) y potencia de pulso ajustable de 0,1 a 25 pW, además la forma del eco largo también debe ser ajustable; (ii) eco corto con un ancho de hasta 10 ns que se debe superponer al eco largo; el nivel de potencia debe seleccionarse dentro del rango de 0,2 a 200 nW. Por lo tanto, la combinación de ambos ecos permite caracterizar el APD en todo el rango dinámico de los LIDAR espaciales (60 dB). La tasa de repetición está en el rango de 100 Hz a 500 Hz. Otro parámetro importante, la caída en la cola del eco corto con respecto al pico que debe tener una dinámica de 50 dB dentro de 10 ns. La posición relativa de los ecos debe ser ajustable con un paso de 2 ns. Como se puede apreciar los requisitos son bastante estrictos, sobre todo el eco corto.

3.2. Fabricación

El subsistema de generación de luz consta de dos LD: uno para eco corto y otro para eco largo, accionado por medio del conjunto OPM-LD-ps (un controlador láser y el generador de guía de onda arbitraria) disponible en el mercado. Cada láser se controla por separado. La señal óptica generada se divide en dos ramas: una rama de supervisión para controlar las formas de onda y niveles de la señal y otra rama de salida donde la señal se atenúa a los valores deseados. El nivel de potencia de salida se controla mediante atenuadoras variables eléctricos, lo que permite un ajuste de más de 42 dB dentro del rango de 0-5 V. Finalmente, ambos canales se combinan con un acoplador óptico y la salida está disponible desde el panel frontal del sistema (fig. 5b). El subsistema de visualización consiste en un fotodiodo rápido y un amplificador logarítmico con el mismo fotodiodo que se utiliza para la supervisión directa de cada uno de los ecos. Las señales eléctricas se envían a un osciloscopio USB integrado en el LEE. Para garantizar una adquisición rápida, se utilizó USB 3.0. Los fotodiodos están polarizados inversamente, y se usa una batería para minimizar el nivel de ruido.

El *software* de control se realizó mediante LabView. En él se define la configuración de cada láser, que incluye controles de seguridad incorporados para no sobrecargar los láseres y configurar correctamente los parámetros para cumplir los requisitos mencionados anteriormente. En la pantalla de monitorización está disponible ver la dinámica de los pulsos como se observa en la fig. 5a.

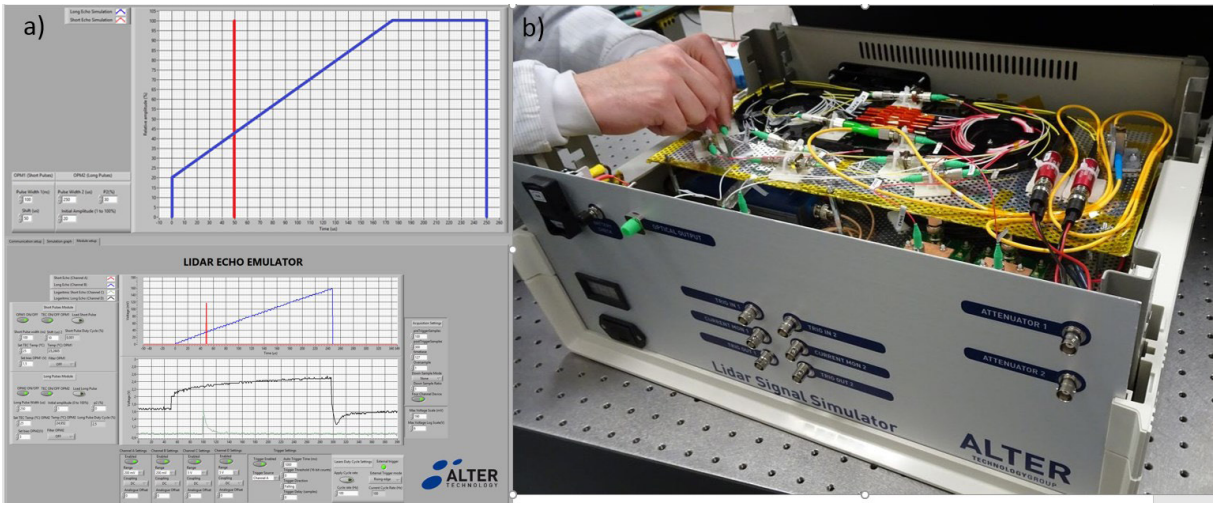


Figura 5. (a) Software de control (LabView) y (b) Sistema final del LEE.

3.3. Resultados

El LEE puede producir los pulsos de luz que emula el retorno de un LIDAR real. Para poder ver simultáneamente los dos ecos en la fig. 6a se configura el eco largo con 1 µs (realmente los requisitos establecen 270 µs) y el eco corto a 10 ns. También se puede ajustar con distintos valores la amplitud inicial (p1) y la parte plana del pulso (p2) en el eco largo (figura 6, línea azul), pudiendo alcanzar un diente de sierra al establecer la amplitud inicial en 1 % y la parte plana en 0 % y un eco cuadrado al configurar con el 100 % los valores p1 y p2. Ambos ecos tienen un retardo de aproximadamente 80 ns con la señal de disparo externa. Existe la posibilidad de ajustar las corrientes utilizadas para controlar ambos láseres. Se ha comprobado que no hubo retrasos en el pulso óptico en comparación con el pulso de corriente (al menos dentro del ancho de banda del osciloscopio - 1 GHz) y que los pulsos ópticos reprodujeron los pulsos de corriente con un nivel de confianza del 98 %. En la fig. 6b se muestra la respuesta del amplificador logarítmico (LA) para el eco largo con 270 µs de ancho (trazo superior) y su medición directa (traza inferior). El nivel bajo en la traza superior es de aproximadamente 1,16 V que corresponde a la corriente de 10 nA que pasa a través del PD. El nivel alto de 2,46 V corresponde a la corriente de aproximadamente 6 mA, lo que da como resultado casi seis órdenes de magnitud entre el nivel alto y bajo, por lo que se observa

una dinámica de más de 50 dB en la corriente (potencia). La cola en las corrientes más bajas (niveles nA) corresponde a la disminución del ancho de banda de LA (hasta cientos de Hz).

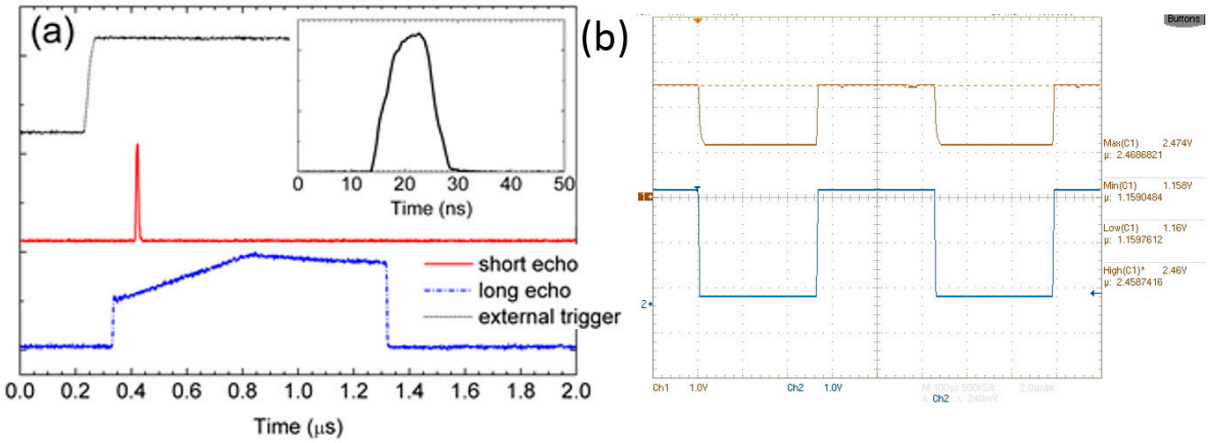


Figura 6. (a) Eco corto de 10 ns y eco largo con p1=50 % y p2=50 % y (b) eco largo de 270 μs: arriba - amplificador logarítmico; abajo - medición directa.

4. Desarrollo futuro en aplicaciones LIDAR

En el proyecto HOLDON, se requiere que el funcionamiento de este dispositivo se extienda en el rango visible (532 nm) y UV (355 nm). Dado que no hay un diodo láser emitiendo a temperatura ambiente en estas longitudes de onda, el escenario más probable es desarrollar un láser de estado sólido bombeado por diodo (DPSS) para ambas longitudes de onda. El desafío de esta tarea reside en el rango de UV, puesto que la cola de caída de eco corto debe ser de 50 dB dentro de los 10 ns y que las fibras ópticas tienen una fuerte atenuación en este rango de longitud de onda.

5. Conclusión

En este artículo se ha plasmado el resultado de la creación de dos sistemas completos para aplicaciones LIDAR. Por un lado, se encuentra el estabilizador de frecuencias, en el que se ha conseguido una estabilización de hasta 18 kHz en el láser maestro. Además, en las mediciones de la FSU con el IPDA realizadas en las instalaciones de DLR se han obtenido buenos resultados y se confirma que el sistema es adecuado para la aplicación. Aunque se deben realizar algunas mejoras para optimizar el sistema y así poder utilizarlo con éxito como fuente de luz para cualquier IPDA LIDAR. Por otro lado, se ha desarrollado un emulador de ecos en el infrarrojo medio para caracterizar los parámetros ópticos del nuevo detector APD de HgCdTe. Este sistema cumple los estrictos requisitos que se pedían: rango dinámico óptico de 60 dB y una cola de caída en el eco corto de 50 dB dentro de los 10 ns. Además, se ha creado un programa mediante Labview con el que poder controlar todos los parámetros del sistema de manera sencilla e intuitiva. Este sistema no solo es útil para la tarea que se ha creado, sino que da la posibilidad de dar forma a los pulsos de luz permitiendo emular diferentes objetivos como la vegetación, las nubes, el suelo o la absorción de otros gases.

ATN se encuentra inmerso en el desarrollo del emulador de ecos en el rango VIS y UV, para así poder caracterizar el APD de HgCdTe y comprobar la versatilidad, la sensibilidad y el rango dinámico en estas regiones.

Referencias

1. *BRITESPACE - EU Project [Internet]. [cited 2018 Sep 4]. Available from: https://www.britespace.eu/*
2. *HOLDON [Internet]. [cited 2018 Sep 4]. Available from: http://holdon-h2020.eu/*

3. *Pérez-Serrano A, Vilera M, Esquivias I, Faugeron M, Krakowski M, Van Dijk F, et al. Atmospheric CO_2 remote sensing system based on high brightness semiconductor lasers and single photon counting detection. In: SPIE Remote Sensing. 2015.*
4. *Ai X, Pérez-Serrano A, Quatrevalet M, Nock RW, Dahnoun N, Ehret G, et al. Analysis of a random modulation single photon counting differential absorption lidar system for space-borne atmospheric CO_2 sensing. Optics Express. 2016 Sep 5;24(18):21119.*
5. *Quatrevalet M, Ai X, Pérez-Serrano A, Adamiec P, Barbero J, Fix A, et al. Atmospheric CO_2 Sensing with a Random Modulation Continuous Wave Integrated Path Differential Absorption Lidar. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2017 Mar;23(2):157–67.*
6. *Quatrevalet M, Amediek A, Fix A, Kiemle C, Wirth M, Büdenbender C, et al. CHARM-F: The Airborne Integral Path Differential Absorption Lidar for Simultaneous Measurements of Atmospheric CO_2 and CH_4. In: 25th International Laser Radar Conference. 2010.*
7. *Ashcroft A, Baker I. Developments in HgCdTe avalanche photodiode technology and applications. In: Infrared Technology and Applications XXXVI [Internet]. International Society for Optics and Photonics; 2010 [cited 2018 Sep 4]. p. 76603C.*
8. *Rothman J, Lasfargues G, Delacourt B, Dumas A, Gibert F, Bardoux A, et al. HgCdTe APDS for time resolved space applications. In: International Conference on Space Optics — ICSO 2016 [Internet]. International Society for Optics and Photonics; 2017 [cited 2018 Sep 4]. p. 105623F.*
9. *Sun X, Abshire JB, Beck JD, Mitra P, Reiff K, Yang G. HgCdTe avalanche photodiode detectors for airborne and spaceborne lidar at infrared wavelengths. Optics Express. 2017 Jul 10;25(14):16589.*
10. *Sun X, Abshire JB, Beck JD. HgCdTe e-APD detector arrays with single photon sensitivity for space lidar applications. In: Advanced Photon Counting Techniques VIII [Internet]. International Society for Optics and Photonics; 2014 [cited 2018 Sep 4]. p. 91140K.*

Transceptores ópticos de alta velocidad para aplicaciones militares y aeroespaciales

Peroglio, Giorgio Maria[1,*], Lopez Molina, Demetrio[1], Barbero, Juan[1], Spuma, Alina[1]

1 ALTER TECHNOLOGY TÜV NORD S.A.U., C/ La Majada 3, 28760 Tres Cantos – Madrid, España. gm.peroglio@altertechnology.com (GMP), demetrio.lopez@altertechnology.com (DLM), juan.barbero@altertechnology.com (JB), irina.alina@altertechnology.com (AS).

* Giorgio Maria Peroglio; gm.peroglio@altertechnology.com (GMP).

Resumen

Los sistemas de aviónica actualmente requieren comunicaciones de Gb/s por el gran número de sensores y equipamientos que están integrados a bordo. Estos sistemas están inmersos en ambientes con condiciones hostiles y necesitan altas prestaciones, en donde un fallo de comunicación entre módulos puede llevar, en el peor escenario posible, a una pérdida de seguridad y riesgo humano. En este marco, los dispositivos optoelectrónicos basados en tecnología de fibra óptica denominados «transceptores ópticos» permiten la transmisión y recepción de datos en dichas condiciones ambientales. La peculiaridad de un transceptor óptico está en una primera conversión de una señal eléctrica en una óptica, no solo para la transmisión de información sino también para su procesado con los llamados circuitos ópticos integrados, y una sucesiva reconversión para permitir el procesamiento y volcado de los datos a un sistema electrónico clásico. La transmisión de la señal se efectúa por fibra óptica, por lo tanto, estos dispositivos se aprovechan de las ventajas que la tecnología en fibra ofrece, como la reducción de masa de un sistema por la eliminación de interconexiones puramente eléctricas, un bajo consumo de potencia, una elevada resistencia a entornos hostiles y una mayor velocidad de transmisión de datos. La validación y la calificación mediante ensayos estrictos diseñados especificadamente para entornos militares y aeroespaciales resulta necesaria para asegurar un correcto funcionamiento bajo diferentes condiciones ambientales. La caracterización óptica de estos componentes se hace antes, durante y después de cada ensayo (térmico, mecánico, radiación, etc.) teniendo en cuenta sus propiedades y características ópticas como por ejemplo la tasa de error de bit y diagrama de ojos, parámetros muy importantes para transmisión de datos.

Palabras clave

Transceptor óptico, fibra óptica, fotónica.

1. Introducción

En los últimos años ha aumentado la demanda de procesamiento y envío de datos por parte de los equipos presentes en aviones y satélites. Actualmente, estos sistemas requieren velocidades de comunicaciones de decenas de Gbps (1) en ambientes con condiciones de funcionamiento extremas, por lo que pueden insurgir fallos de componentes y, en consecuencia, pérdida de información o de seguridad. Los principales candidatos para operar en ambientes tan hostiles son circuitos integrados optoelectrónicos para la transmisión y recepción de datos en fibra óptica, teniendo especial interés los transceptores ópticos. La peculiaridad de estos dispositivos es la conversión de un pulso eléctrico en óptico gracias a una fuente de luz láser integrada, cuya modulación está dedicada a un circuito de control. Una vez que la señal ha sido transmitida por fibra óptica, la parte de recepción de datos integra un fotodiodo semiconductor y un circuito de amplificación para la conversión del pulso óptico recibido en un nuevo pulso eléctrico. Esta tecnología presenta numerosas ventajas, como la reducción de masa de un sistema por la eliminación de interconexiones puramente eléctricas y cableado pues las fibras ópticas fabricadas en silicio pesan mucho menos que el cobre, requieren un bajo consumo de potencia, reducen el espacio de carga, se pueden detectar eventuales daños a la fibra óptica(2), son inmunes a interferencias electromagnéticas (3) y son muy resistentes a entornos hostiles como radiación y vibración. Además, permite un alto ancho de banda para transmisión de datos, que puede llegar a 150 Gb/s por particulares tipos de fibra (4). Estas capacidades hacen esta tecnología madura en un entorno donde la seguridad es imprescindible, tanto en el control de sensores en sistemas de misiles y de municiones (5) como en sistemas de comunicaciones entre satélites (6).

Los transceptores ópticos diseñados para aplicaciones militares y aeroespaciales requieren una calificación más estricta respecto a los comerciales, además de que estos dispositivos trabajan con equipos muy caros y potencialmente peligrosos por lo que no es admisible un error de funcionamiento debido a las condiciones críticas del entorno ambiental. Las caracterizaciones térmicas, mecánicas y resistencia a radiaciones (estas últimas necesarias para ambiente espacial) son cruciales para validar el diseño y los componentes de un transceptor óptico, y así asegurar que son adecuados para aplicaciones militares.

2. Transceptores ópticos: parámetros de relevancia

Los transceptores ópticos, introducidos en la sección precedente, están compuestos de componentes y circuitos integrados que actúan en la conversión de energía eléctrica-óptica (y viceversa). Básicamente, un transceptor óptico puede ser dividido físicamente en tres partes (figura 1): un subconjunto de trasmisión óptica (*Transmitter Optical Sub Assembly*, TOSA), una fibra óptica para la propagación de la señal y un subconjunto de recepción óptica (*Receiver Optical Sub Assembly*, ROSA).

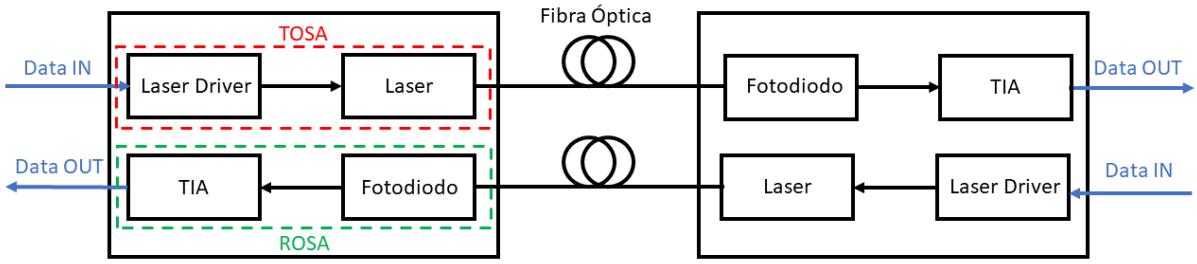


Figura 1. Esquema general de un sistema de comunicación entre dos transceptores ópticos en configuración full-dúplex.

El módulo TOSA está compuesto principalmente de dos elementos: un láser, componente que se encarga de convertir el pulso eléctrico en un pulso óptico, y su driver, necesario para controlar la corriente que circula en él y su correcto funcionamiento. Uno de los parámetros más importantes a la hora de elegir los componentes de un módulo de transmisión láser es su longitud de onda central, la cual representará la banda de ondas utilizada para la transmisión de la señal. Actualmente se utilizan principalmente tres longitudes de onda centrales para los módulos transceptores de fibra óptica: 850, 1.310 y 1.550 nm. La elección de la longitud de onda determinará el tipo de fibra y de fotodiodo más adecuados a la aplicación en cuestión. Otro parámetro de interés es la potencia de transmisión óptica: cuando se conectan dos transceptores ópticos, la potencia óptica de un extremo debe estar dentro del rango de sensibilidad de recepción en el otro extremo.

La fibra óptica conecta físicamente los módulos TOSA y ROSA al fin de permitir la transmisión de la señal óptica entre largas distancias. Las fibras se clasifican básicamente en: multimodo (MM) y monomodo (SM). Las fibras multimodo poseen típicamente diámetros de núcleo en el rango de 50 a 62,5 micrómetros, diámetros de núcleo sustancialmente más grandes que las fibras monomodo, que son del rango de 8 a 9 micrómetros. A causa de estas propiedades físicas, las fibras MM permiten que varios modos de luz se acoplen a la fibra, propagándose a velocidades ligeramente diferentes en el medio de transmisión. El resultado es una «propagación» de pulsos conocida como dispersión modal, que limita en mayor medida la distancia de transmisión alcanzable sobre la fibra MM en comparación con la fibra SM. Las fibras MM se usan en mayor medida en aplicaciones basadas en efectos no lineales y de alta potencia ya que son capaces de soportar más energía óptica sin ser dañadas.

El módulo ROSA se encarga de la conversión del pulso óptico que llega desde la fibra óptica, compuesto de un fotodiodo, necesario para la transducción física de la energía, y de un amplificador eléctrico, típicamente un circuito integrado en configuración de amplificador de transimpedancia (*Trans-Impedance Amplifier*, TIA). La selección del fotodiodo depende de dos factores: la primera es la optimización de la conversión de energía de la radiación electromagnética del láser, mientras la segunda está relacionada a la sensibilidad de recepción del fotodiodo, o sea la potencia a la que el receptor de un transceptor de fibra óptica puede recibir señales ópticas dentro de un rango de tasa de errores de bit (*Bit Error Ratio*, BER) típicamente igual o inferior a 10^{-12}.

Desde un punto de vista más general, un parámetro fundamental de un transceptor óptico es la frecuencia a la cual el dispositivo debe asegurar su funcionamiento en un determinado entorno. Las velocidades de intercambio de datos hoy día alcanzan en sistemas calificados para el espacio varios Gbps por cada línea de comunicación, hasta 6,25 Gbps (7) o 10 Gbps (1) para aplicaciones militares (no espaciales).

3. Material y métodos

Los transceptores ópticos necesitan una calificación distinta respecto a dispositivos que operan en un entorno ambiental controlado ya que deben permitir un correcto funcionamiento de transmisión y recepción de datos bajo condiciones que se pueden definir críticas. La validación del diseño del dispositivo resulta de este modo necesaria, y se consigue mediante una caracterización del dispositivo trabajando

en dichas condiciones extremas según distintas normas promulgadas por diferentes entes (ESA, NASA o US Department of Defence).

En las siguientes secciones se ilustrarán y explicarán los principales ensayos que típicamente se realizan para una calificación y validación de un transceptor óptico. Básicamente, la validación de estos módulos se subdivide en ambiental, construcción y prueba de vida, siendo la validación ambiental la más exigente. Para la correcta caracterización de los componentes se suele medir la tasa de error de bit o BER y además mostrar el diagrama de ojo de cada dispositivo para determinar la influencia de las condiciones ambientales en la correcta transmisión de datos, detectando así los componentes del transceptor óptico que no resisten a dichas condiciones de trabajo.

3.1. Ensayo de ciclos térmicos (CT)

La caracterización mediante CT consiste en estresar térmicamente el dispositivo según un determinado patrón, en el cual la temperatura varía típicamente entre un valor mínimo y uno máximo (usualmente -55 y 125 ºC) con una velocidad de variación entre los dos extremos que depende de la norma a la cual se hace referencia. Esta campaña de ensayos es necesaria para evaluar indirectamente la vida útil del transceptor ya que se acelera drásticamente la degradación de las prestaciones por efectos térmicos.

3.2. Ensayo de ciclos térmicos en vacío (CTV)

El ensayo CTV básicamente es igual al ensayo previamente citado, pero en este caso la presión del ambiente circundante es en el orden de los 10^{-8} bar, de manera tal que se puedan recrear las condiciones de vacío espacial.

3.3. Hermeticidad (HE)

La caracterización mediante HE evalúa si el componente se puede considerar hermético, es decir si este último está aislado del entorno sin que puedan entrar ni salir partículas de la cavidad que lo conforma. Existen distintas modalidades para la validación de hermeticidad, una de estas (según la noma MIL-STD 883 1014.14) afirma que el transceptor debe ser colocado en un ambiente rico de helio a una determinada presión y tiempo. Sucesivamente está la fase de medición del flujo de átomos de helio que se libera, determinando si el componente es hermético o no. Esta caracterización es necesaria para evaluar intrínsecamente si el transceptor puede operar en ambientes con atmosferas ricas de partículas que pueden afectar el funcionamiento del componente si se introducen dentro de la cavidad de este.

3.4. Ensayo de estrés mecánico

Los ensayos de estrés mecánico de un transceptor óptico están hechos para determinar los efectos que eventuales vibraciones mecánicas o choques podrían aportar al correcto funcionamiento de trasmisión y recepción de datos. Las vibraciones mecánicas se pueden simular a través de equipos que generan patrones de vibración, con módulos de aceleración hasta 50 g_{RMS}, mientras los choques se generan por una onda media sinusoidal de en torno a 3.000 g a 10 kHz.

3.5. Ensayo de estrés por radiación

El ensayo de estrés por radiación se utiliza para determinar la susceptibilidad de un componente optoelectrónico en presencia de un ambiente con radiaciones, típico de un entorno espacial. Los efectos de una radiación dependen de la cantidad total o dosis que se irradia, y se pueden estimar a través de los cambios de parámetros eléctricos de un dispositivo. Típicamente las radiaciones utilizadas para este tipo de caracterización son de tipo γ, generadas por fuentes de Co_{60} (como en figura 2), o derivados por protones/iones pesados.

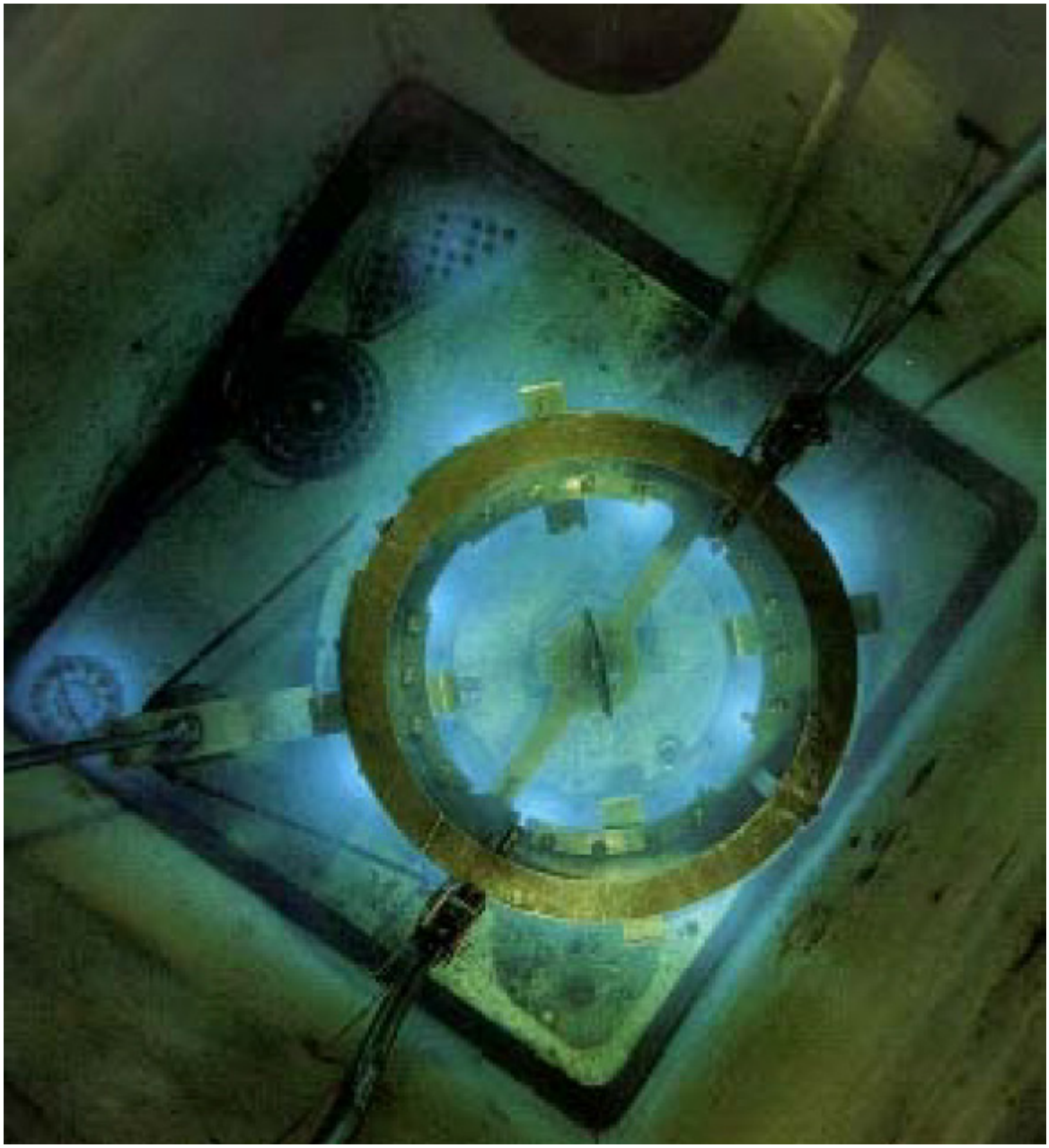


Figura 2. Fuente de radiaciones γ Co60 que se utiliza para caracterizar un transceptor óptico (fuente situada en el centro de investigación CIEMAT).

4. Proyectos pasados ALTER Technology Group

ALTER Technology Group gracias a sus instalaciones y equipamientos, ha participado en diferentes proyectos internacionales para la fase de test y validación de componentes optoelectrónicos. ALTER participó al proyecto ESA *SpaceFiber Fibre-Optic Data Link* (7) cuyo objetivo era el desarrollo de un prototipo de un transceptor óptico al fin de ser integrado a bordo de satélites de telecomunicaciones. ALTER se encargó de la completa caracterización y evaluación de las prestaciones de los transceptores.

5. Estado actual y roadmap de ALTER Technology Group

En el estado actual, ALTER Technology Group está involucrada al proyecto H2020 de ORIONAS para el desarrollo del primer transceptor óptico basado en circuitos fotónicos integrados (*Photonic Integra-*

ted Circuit, PIC) calificado para ambiente espacial. La participación del grupo ALTER en este proyecto es debida a Optocap, empresa que realizará el encapsulamiento de todos los componentes fotónicos y optoelectrónicos.

Además, ALTER está inmerso en un proyecto ARTES para la implementación en un sistema de comunicación intra-satélite de transceptores ópticos de 25 Gbps por cada línea de transmisión.

Referencias

1. *Catanzaro B, Kuznia C. Multigigabit optical transceivers for high data rate military applications. In: 2012 IEEE Aerospace Conference. 2012. p. 1–7.*
2. *Ahadian J, Kusumoto K, Bachta P, Wong M, Pommer D, Hagan R, et al. BIT-enabled VCSEL-based parallel optic transceivers. In: IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Digest CD. 2012. p. 32–3.*
3. *Kuznia C, Pommer R, Ahadian J, Hagan R, Tabbert C. Harsh environment transceivers for the post-module ERA. In: 2011 IEEE Avionics, Fiber- Optics and Photonics Technology Conference. 2011. p. 19–20.*
4. *Karppinen M, Tanskanen A, Ollila J, Westbergh P, Gustavsson J, Larsson A, et al. Multi-gigabit intra-satellite interconnects employing multi-core optical engines and fibers. Proceedings International Conference on Space Optics. 2016;269.*
5. *Kuznia C, Tabbert C. Board-to-board optical interconnects within aerospace and missile/munitions systems. In: 2009 IEEE Avionics, Fiber-Optics and Phototonics Technology Conference. 2009. p. 70–1.*
6. *Venet N, Sotom M, Gachon H, Foucal V, Pez M, Heikkinen V, et al. High-throughput optical inter-board interconnects for next-generation on-board digital transparent processors. In: International Conference on Space Optics — ICSO 2014. International Society for Optics and Photonics; 2017. p. 1056337.*
7. *Karppinen M, Tanskanen A, Ollila J, Molina DL, Barbero J, Polo CB, et al. Radiation Tolerant Optical Transceivers for SpaceFibre Data Links. In: 2018 International SpaceWire Conference. p. 1–5.*

Sistema de electrónica y control de cámara integrada estándar para microsatélites. Filosofía COTS

Larburu, Maider[1,*]; Conde, Aitor[1]; Cordovilla, Ruben[1]; Dasí, María[1]; Ocerin, Eider[1]

[1] SATLANTIS MICROSATS S.L. Edif. SEDE, Parque Científico, Campus UPV BIZKAIA, Barrio Santsoena, 14D – 2.ª planta, 48940 LEIOA (Bizkaia). E-mails: conde@satlantis.com (C., A.), cordovilla@satlantis.com (C., R.), dasi@satlantis.com (D., M.) y ocerin@satlantis.com (O., E.).

Email:

* Autor principal y responsable del trabajo; larburu@satlantis.com (L., M.).

Resumen

Este artículo presenta el estado actual de la cámara integrada estándar para pequeños satélites (*SmallSats*) desarrollada por SATLANTIS: **iSIM** (*integrated Standard Imager for Microsatellites*). Esta cámara diseñada para la observación terrestre se caracteriza por ser capaz de proporcionar imágenes RGB+NIR hasta 1m de resolución (GRD), cubriendo un campo de 7,5 km a bordo de microsatélites LEO. Además, iSIM puede tomar imágenes de manera continua, sin necesidad de estabilizar el satélite. Como resultado, iSIM es la solución idónea para la monitorización de estructuras lineares irregulares sobre la superficie de la Tierra, tales como líneas de costa, gasoductos o fronteras.

En particular, el presente artículo se centra en describir el sistema de electrónica y control (*Electronic and Control System*, ECS) que, integrado junto con la estructura optomecánica, forman la carga útil iSIM. Los principales elementos del ECS son la unidad de detección de imágenes, y la unidad de control y procesado, la *SmartCIA*. A fin de reducir al máximo el tiempo de desarrollo y, por tanto, de acceso al mercado, SATLANTIS ha optado por una solución de diseño híbrida. Concretamente, ha apostado por un diseño con componentes COTS (*Commercial Off-The-Shelf)*.

El uso de componentes eléctricos, electrónicos y electromecánicos (EEE) COTS se está extendiendo, especialmente en el ámbito del *NewSpace*. Permite una reducción tanto en plazos como en coste, si bien las limitaciones de este tipo de tecnología están relacionadas con una vida más reducida en condiciones de operación y su falta de herencia en vuelo.

Palabras clave

COTS, *NewSpace*, cámara, microsatélites, observación terrestre (EO).

1. Introducción: NewSpace, una nueva filosofía de diseño

A lo largo de los últimos años, los avances tecnológicos, –en particular, los recientes desarrollos en electrónica para dispositivos móviles–, han supuesto un impacto directo en la filosofía de diseño y fabricación de los sistemas espaciales en áreas como las comunicaciones por satélite, la observación de la Tierra, los lanzadores, los vuelos espaciales tripulados e incluso el turismo espacial.

La industria espacial tradicional, dominada por agencias gubernamentales y grandes multinacionales aeroespaciales, ha estado asociada con diseños de alta fiabilidad y robustez, largos ciclos de fabricación y alto coste de producción y ejecución. Actualmente, esta industria está dando paso a tecnologías más flexibles, con tiempos de comercialización reducidos, tasas de reposición elevadas y costes de producción bajos, impensables hasta hace pocos años.

Por ejemplo, dentro del área de las comunicaciones por satélite están surgiendo un gran número de propuestas para el despliegue de constelaciones en órbitas medias y bajas, que sustituirán en mayor o menor medida los servicios ofrecidos hasta hoy por los grandes satélites geoestacionarios, abaratando el coste del ancho de banda. Otro dominio de máxima importancia es el de los lanzadores, en el que compañías como SpaceX –gracias a la reutilización (parcial) de los cohetes [5.1.1.1] –, están reduciendo los costes de lanzamiento por kilogramo, con el objetivo de reducirlos a la mitad en los próximos años. Estas y otras muchas soluciones innovadoras creadas por compañías privadas están suponiendo una nueva revolución del sector espacial.

Como resultado, el escenario en el que se desarrolla la actividad espacial está evolucionando hacia un nuevo modelo de negocio y filosofía de diseño que diverge notablemente del tradicional. Este movimiento –llamado *NewSpace* o *Space 2.0*–, donde el acceso a la tecnología espacial empieza a estar en el dominio de pequeñas y medianas empresas, ha supuesto la «democratización del espacio». Es decir, el espacio hoy es accesible no solo a las agencias espaciales y grandes corporaciones, sino también a pequeñas empresas y universidades.

Una de las claves del éxito del *NewSpace* –y su filosofía de diseño– son los *CubeSats* [5.1.1.2], ya que estos han facilitado el acceso al espacio a muchas universidades y pequeñas empresas, las cuales han lanzado sus propios proyectos *CubeSat* con fines educativos o como plataformas de demostración, respectivamente.

Los *CubeSats* son un tipo de satélites cuya estructura está basada en una unidad de volumen con forma de cubo y de dimensiones estandarizadas. Una unidad de *CubeSat* mide 10x10x10 cm^3, y, combinando varias unidades, pueden formarse *CubeSats* de varios tamaños. Esta nueva **filosofía de diseño** (de reducción y estandarización de dimensiones) conlleva, entre otras ventajas, una disminución en los tiempos de fabricación (~2 años, en comparación con ~10 años para satélites tradicionales) y la reducción de costes de manufactura y lanzamiento (entre uno y dos órdenes de magnitud menor que para satélites tradicionales). Además, ejemplifica la idea subyacente del enfoque *NewSpace*: la utilización de componentes electrónicos *Commercial Off The Shelf* (COTS) para la fabricación *hardware*.

1.1. Diseño de sistemas electrónicos para el espacio: los componentes COTS

Los sistemas electrónicos orientados a aplicaciones espaciales deben diseñarse para poder operar en un entorno no protegido por la atmósfera terrestre. Esto implica que, una vez en órbita, los dispositivos electrónicos deberán funcionar bajo las condiciones ambientales propias del espacio, viéndose expuestos a ciertos fenómenos que pueden provocar fallos en el sistema, o en el peor de los casos, que dejen de funcionar. Es decir, deberán poder operar: 1) bajo condiciones de **vacío**, pudiendo sufrir fenómeno de *outgassing* o desgasificación; 2) a **temperaturas extremas** –tanto frías como calientes– y, 3) expuestos a **altos niveles de radiación**, principalmente procedentes de la actividad solar y los rayos cósmicos, fenómenos que tienen un impacto negativo en la electrónica.

Por tanto, a la hora de diseñar un nuevo sistema electrónico para uso espacial, una de las principales cuestiones que se plantea es qué tipo de componentes deberían utilizarse: componentes **RHESE** (*Radiation Hardened Electronics for Space Environments*), dispositivos Rad-Tol (*Radiation-Tolerant*) o Rad-Hard (*Radiation-Hardened*) lo suficientemente robustos para soportar las exigencias de radiación y condiciones de temperatura dentro del entorno espacial, y/o **COTS**, a priori no diseñados para operar en el entorno relativamente hostil del espacio.

Pese a que el entorno espacial puede ser particularmente dañino para los dispositivos COTS, el uso de componentes comerciales para aplicaciones espaciales está actualmente en pleno auge, especialmente en los dispositivos diseñados bajo la filosofía de *NewSpace*. Este auge se ve impulsado, particularmente, como respuesta a la **falta de flexibilidad en el diseño** que imponen los **componentes espaciales**. Algunas de las desventajas que presentan los componentes espaciales son:

1. *Tecnología antigua/obsoleta y prestaciones limitadas:* para convertirse en componentes espaciales, los dispositivos electrónicos deben ser ampliamente probados y sustentar herencia de vuelo, lo que requiere mucho tiempo y esfuerzo. Consecuentemente, componentes Rad-Tol y/o Rad-Hard anticuados, no pueden proporcionar las prestaciones que facilitan los componentes COTS, de última generación.
2. *Son caros*: en comparación con electrónica de consumo habitual en otros sectores (industria, automoción) el reducido mercado de componentes espaciales encarece su precio.
3. *Los plazos de entrega* de los componentes calificados para espacio son muy largos, siendo de varias semanas e inclusos meses, debido al reducido tamaño del mercado espacial.
4. *Las referencias disponibles son muy limitadas*, lo que implica que, a menudo no es posible encontrar un componente que cumpla con las especificaciones del diseño deseado.

Finalmente, cabe destacar que el uso de componentes COTS se vuelve cada vez más atractivo si se tiene en cuenta que los componentes espaciales no siempre permiten implementar ciertas arquitecturas embebidas. Asimismo, y en comparación con los componentes espaciales, los componentes COTS permiten mayor número de iteraciones y cambios de diseño, sin penalizar el tiempo de desarrollo y, consecuentemente, los costes del proyecto.

2. SATLANTIS iSIM: una cámara para EO potente, pequeña y ágil

SATLANTIS [5.1.1.3] es una PYME tecnológica española que desarrolla cargas útiles ópticas para satélites pequeños involucrados en actividades de observación de la Tierra (EO) en todo el mundo. La compañía cuenta con una combinación de conocimiento y patrimonio en astrofísica, espacio, ingeniería y negocios. Gracias a su tecnología única y avanzada, SATLANTIS aspira a liderar el mercado de las cargas útiles para EO, conectando los 3 vértices del «triángulo del conocimiento» –universidades, industrias y agencias gubernamentales–, al mismo tiempo que facilitar un mayor acceso al espacio y a la tecnología espacial a gobiernos, instituciones y empresas.

La tecnología central detrás de los productos de SATLANTIS, es decir, las cargas útiles ópticas para satélites pequeños, es iSIM (*integrated Standard Imager for Microsatellites*). La cámara de alta resolución iSIM [5.1.1.4] combina un diseño opto-mecánico simple y compacto que trabaja al límite de di-

fracción, con detectores CMOS de última generación y algoritmos de procesado de imágenes altamente avanzados. iSIM está formada por dos subsistemas diseñados para optimizar su operatividad conjunta como sistema integrado: el opto-mecánico y el de electrónica y control (ECS). La figura 1 muestra la arquitectura conceptual de la cámara iSIM.

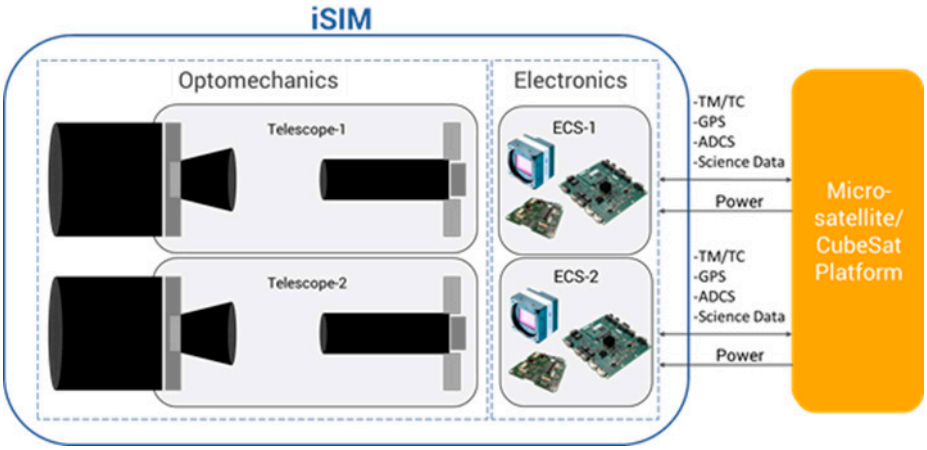


Figura 1. Arquitectura conceptual de la cámara iSIM.

La optomecánica, –compuesta por las ópticas y la estructura mecánica que las sustenta–, se divide en dos canales ópticos idénticos. Los detectores de imagen están ubicados al final de cada uno de ellos. Asimismo, dos cajas electrónicas acomodan el resto del HW de la ECS (*Electronic and Control System*), a cargo de las operaciones de la carga útil. Cada canal óptico y la electrónica asociada, se conecta por separado e independientemente al satélite a través de líneas eléctricas, líneas de telemetría y control, y líneas de alta velocidad de transmisión de datos.

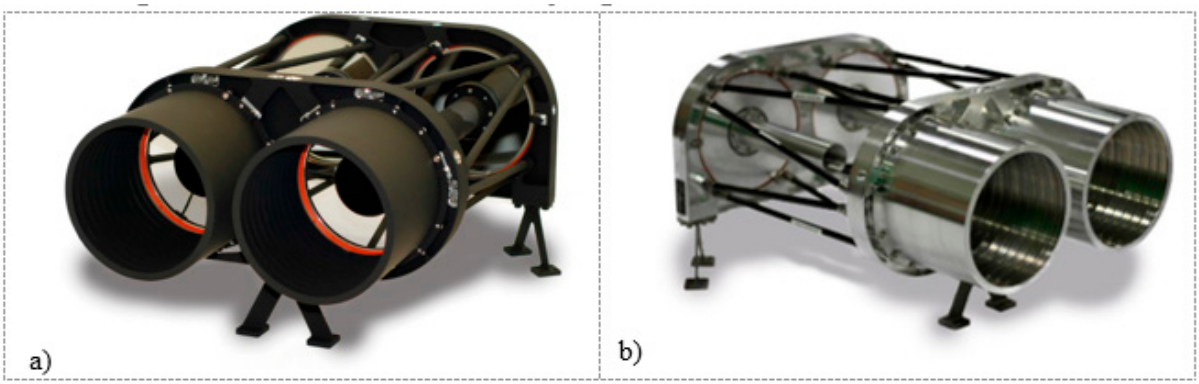


Figura 2. Modelos de iSIM: a) iSIM-170 y b) KUBEKAM.

La figura 2 muestra el subsistema opto-mecánico de los dos modelos iSIM: 1) modelo **iSIM-170** diseñado para su integración en microsatélites con dimensiones 590x490x318 mm^3 y un peso total – incluyendo la electrónica– inferior a 15 kg, y 2) modelo **KUBEKAM**, pensado para su integración en CubeSats, con dimensiones 222x225x128 mm^3 y un peso total inferior a 6 kg.

3. iSIM ECS: sistema de electrónica y control de la cámara iSIM

Como se ha mencionado en la sección anterior, SATLANTIS ha desarrollado el subsistema ECS que junto con la opto-mecánica, dota a la cámara iSIM de la siguiente funcionalidad: 1) detección y adquisición de imágenes, 2) pre-procesado, almacenamiento y compresión de datos *on-board*, y 3) control del sistema y gestión de las comunicaciones.

La figura 3 muestra la arquitectura de alto nivel del ECS, donde se visualizan las **principales unidades del sistema**: la cámara COTS y la SmartCIA. La **cámara COTS**, dotada de un fotodetector CMOS es la unidad encargada de la detección y adquisición de las imágenes, así como de su transmisión hacia la SmartCIA. Por otro lado, la principal unidad del sistema electrónico que alberga el *master control* del ECS, –**la SmartCIA**–, es la encargada del pre-procesado, almacenamiento y compresión de datos *on-board*, así como de la gestión de las comunicaciones. Desde el punto de vista *hardware*, sus principales componentes son un MPSoC basado en FPGA y un MCU, dispositivo dedicado a la supervisión y detección de eventos anómalos que pudieran dañar el *hardware*.

Respecto a las interfaces de comunicaciones (o *Data Handling*), la implementada entre *la SmartCIA y la cámara COTS* es **Dual GigE Vision**. Interfaz bidireccional para la transmisión de señales de control y recepción de las imágenes adquiridas, así como, información de monitorización del estado de la cámara COTS.

Por otro lado, entre la *SmartCIA y el satélite*, las interfaces implementadas son **SpaceWire** (LVDS), **CAN** y **UART** (RS-422). En el caso de las dos últimas, se ha implementado un canal redundante para aumentar la robustez del sistema ante fallos. La interfaz **SpaceWire** se utiliza para la transmisión de los datos científicos (*Science Data*). Estos son imágenes con información adicional anexada, como por ejemplo la localización GPS o el *timestamp*.

Las interfaces **CAN y/o UART** se utilizan para facilitar el intercambio de señales de control, información adicional y la comunicación remota de TM/TC.

Además, se han implementado otras dos interfaces más, –**interfaces de servicio UART (RS-422) y Ethernet**– para monitorización del sistema, depuración del *software* y pruebas de verificación.

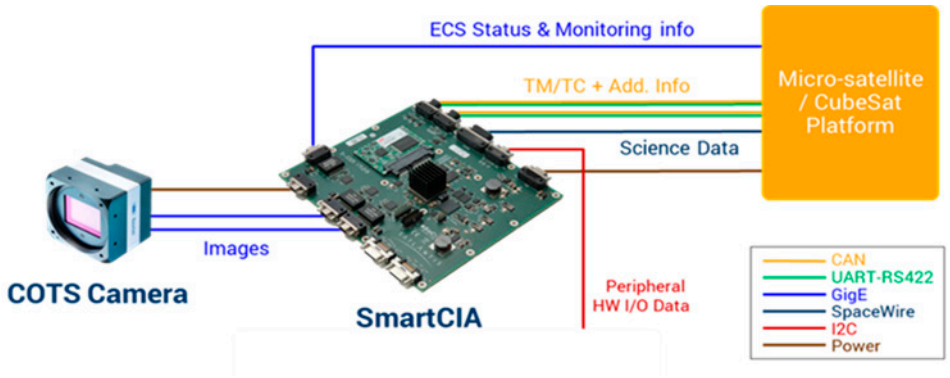


Figura 3. Arquitectura de alto nivel de la iSIM ECS.

Finalmente, cabe mencionar que el rendimiento de los buses de alto volumen puede ajustarse a las necesidades de la plataforma satelital. La cantidad total de datos necesaria para la operación de la carga útil dependerá en la fase de operación y en el ancho de banda disponible para la descarga de datos.

3.1. iSIM ECS: un diseño COTS preparado para el espacio

Siguiendo las bases de la filosofía del *NewSpace*, –tiempos de comercialización reducidos, costes de producción bajos, etc.– y con el objetivo de acceder más rápido al mercado y sus demandas, la apuesta de SATLANTIS a la hora de diseñar y fabricar la electrónica de su cámara iSIM, ha sido optar principalmente por el uso de componentes electrónicos COTS, a excepción de ciertos componentes espaciales, como los conectores o el cableado. Por tanto, el diseño resultante es una hibridación entre ambos tipos de componentes.

Asimismo, con el objetivo de garantizar su correcto funcionamiento bajo las condiciones ambientales del espacio y pese a no incluir componentes *Rad-Hard*, la electrónica ha sido diseñada incluyendo ciertas características, de forma que sobreviva al medio espacial. Es decir, se han implementado varias

medidas adicionales orientadas a minimizar riesgos de malfuncionamiento propios de la naturaleza de los componentes COTS bajo dicho entorno. Estas medidas han sido:

1. Redundancia de componentes: la electrónica ha sido diseñada de manera que incluye múltiples sistemas y circuitería redundante, especialmente en el caso de los componentes más críticos. Por ejemplo, el *hardware* de la iSIM incluye redundancia en memorias; así como en interfaces de comunicación.
2. Implementación de varios **modos de funcionamiento**, tales como el **modo de recuperación** (*recovery mode*), o el **modo seguro** (*safety mode*).
    a. *Recovery mode*: ante cualquier evento anómalo, este modo de funcionamiento permite la recuperación de la electrónica de manera remota, mediante el uso de envío de ciertos comandos de operación enviados desde tierra.
    b. *Safety mode*: el diseño también incluye dispositivos dedicados que, en paralelo a la tarea principal, supervisan continuamente la electrónica. Ante el fallo de algún componente o el comportamiento anómalo de alguna alimentación, los dispositivos de supervisión (*supervisor)* apagan toda la electrónica y la llevan al modo seguro, permitiendo diagnosticar el problema y resolverlo, antes de producirse daños irreversibles.
3. Diseño de las cajas electrónicas para facilitar la disipación de temperatura, y **fabricación** de estas con materiales más resistentes a la radiación.

Adicionalmente, la electrónica ha sido testada de manera exhaustiva, sometiéndola a **pruebas de vibración**, -–para asegurar la supervivencia al lanzamiento en cualquier cohete actualmente en servicio–, como de **ciclado térmico en cámara de vacío**, sometiéndola a las condiciones de temperatura y vacío que sufrirá en órbita.

Finalmente, concluir indicando que, al igual que en el diseño del *hardware*, el ***software*** ha sido desarrollado para minimizar riesgos y garantizar un correcto funcionamiento de la electrónica. Con este propósito, durante la **implementación del *software*** se han incluido **estrategias** para **detección de y recuperación ante fallos**. Además, también existe **redundancia** y **supervisión** del *software*, estando almacenado en memorias paralelas y comprobándose, de manera continua, tanto su integridad como su ejecución sin anomalías.

4. Los EO SmallSats y la demanda del mercado

La observación de la Tierra por satélite está experimentando un crecimiento espectacular, dinamizado por *los gobiernos y las empresas privadas* que también se beneficiarán de él, –según el informe *Satellite-Based Earth Observation: Market Prospects to 2018* publicado por Euroconsult [5.1.1.5].

La creación de constelaciones de pequeños satélites, los *SmallSats*, busca dar respuesta a la creciente demanda de la industria de la observación de la tierra. La previsión de crecimiento en el número de constelaciones –10 % en la última década frente a 56 % en la próxima–, se debe, a su vez, a la creciente popularidad de los *SmallSats*, más baratos, más ligeros y con mayores prestaciones tecnológicas (e. g. tiempos de revisita más altos). De acuerdo con el último informe de Euroconsult *Perspectivas para el mercado de pequeños satélites,* «la significativa expansión en términos de capacidades y demanda se encuentra en marcha en el mercado de los *SmallSats*. Más de 6.200 satélites en esta categoría se lanzarán al espacio en los próximos 10 años, un aumento sustancial respecto a los lanzados en la década anterior. El mercado de *SmallSats* entre 2017-2026 será impulsado por el despliegue de múltiples constelaciones que representan más del 70 % de este total, principalmente para operadores comerciales».

Otro dinamizador del crecimiento de la demanda los *SmallSats* para la observación de la Tierra, *es el mercado de los propios datos* (i.e. las imágenes satelitales) *y el uso de estos*.

La consecuencia directa de esta demanda implica que las misiones actuales estén orientadas a la aplicación. Algunos ejemplos, (clasificados por áreas), son: 1) **medioambientales**: monitorización de desastres marítimos y costeros, pesca ilegal, inventario forestal, prospección geológica, minera y recursos

naturales, prevención de incendios, etc.; 2) **civiles**: cartografía rápida para gestión de emergencias ante desastres naturales, monitoreo de tráfico y de *Smart Cities*, análisis y estudios de optimización del diseño urbano, servicio de mapas de cambios urbanos, planificación territorial, previsiones meteorológicas, agricultura de precisión etc.; y 3) **defensa y seguridad**: geo-inteligencia, vigilancia de tuberías de agua y gas, vigilancia de fronteras y costas, monitoreo de recursos energéticos e infraestructuras críticas como aeropuertos etc.

A su vez, como consecuencia indirecta, el que las misiones satelitales estén orientadas a la aplicación, determina el tipo de satélite requerido. Es decir, para aplicaciones poco exigentes (p. ej. estudios ambientales globales), el satélite será de baja resolución espacial, mientras que para aplicaciones críticas (p. ej. de seguridad y defensa) se requerirán satélites dotados de cámaras con muy alta resolución espacial (hasta centímetros), como en el caso de la iSIM

4.1. iSIM: innovadora carga útil como respuesta al mercado de seguridad y defensa

En línea con las perspectivas del mercado, la tecnología iSIM es la respuesta a la demanda de las aplicaciones con **requisitos de alta resolución** (resolución espacial de iSIM: 0.55m GSD tanto en RGB como en NIR) y **de tiempo casi real** (*Near Real Time*).

Finalmente cabe destacar que, al incluir iSIM entre sus prestaciones la capacidad de **toma de imágenes de manera continua y sin necesidad de estabilización del satélite**, la convierte en la solución idónea para la *vigilancia de estructuras lineales irregulares en la superficie de la Tierra*, incluidas las costas (por ejemplo, efectos ambientales), fronteras (seguridad), oleoductos/gasoductos e instalaciones críticas (seguridad), para detectar cambios a medida que ocurren.

5. Conclusiones

Considerando que el creciente negocio de observación de la Tierra ofrece importantes posibilidades a satélites de bajo coste que proporcionen imágenes de alta calidad, la cámara iSIM se convierte en la solución idónea gracias a sus características innovadoras.

Miniaturización vs. alta resolución: iSIM combina un diseño binocular de difracción limitada, que utiliza pequeñas ópticas y detectores CMOS. Esta tecnología proporciona un diseño compacto, de baja masa (15 kg) y tamaño pequeño, –lo que permite un gran ahorro en los costes de plataforma y lanzamiento–, conservando una alta resolución espacial.

El uso de componentes COTS y algoritmia avanzada: el uso de componentes COTS y un diseño de la electrónica y *software* inteligente permite utilizar tecnología de última generación en órbita, ofreciendo: 1) potencias de cálculo hasta ahora impensables, 2) con consumos de potencia irrisorios, 3) a precios imbatibles y 4) en tiempo récord. El uso de componentes COTS en el espacio es una realidad, sin embargo, no debe olvidarse que la tecnología tiene que ser convenientemente testada en tierra, para asegurar su supervivencia en el ambiente espacial.

Agradecimientos

SATLANTIS agradece a la Universidad de Florida su apoyo económico y tecnológico en las fases iniciales del desarrollo de iSIM.

Referencias

1. *SpaceX, «Falcon 9 Launch Vehicle Payload User's Guide», 2015.*
2. *M. Swartwout, «CubeSat Mission Success (or Not): Trends and Recommendations», in NASA Electronics Parts and Packaging Program, Electronics Technology Workshop, 2015.*
3. *SATLANTIS. [Internet]. Leioa, SATLANTIS MICROSATS S.L. 2018 Sep. Available from: www.satlantis.com*

4. *Ocerin, E.; Guzmán, R.; Aramberri, A.; Boada, L.; Canales, D.; Cordovilla, R.; Fernández, L.C.; Hernani, J.T.; Ituarte, M.; Larburu, M.; Marés, I. & Viaña, J., 'iSIM: «integrated Standard Imager for Microsatellites», (Spain): V Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, 2018, 2017, SATLANTIS.*
5. *Latam. [Internet]. 2017 Jul. Available from: http://latamsatelital.com/mercado-pequenos-satelites-sera-usd30-mil-millones-la-proxima-decada/*

Análisis inteligente de vídeo para inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR)

Rodríguez Artolazábal, José Antonio[1]; Pereira Fernández, Daniel[2]; Nieto Sousa[3], Iván; De la Iglesia Castro, David[4]; Naya Macías, Jorge[5]; García Pardo, Hugo[6]; Machado Fernandes, Vicente[7]; y González Jiménez, Daniel[8]

Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Galicia, GRADIANT.

{jarodriguez[1], dpereira[2],inieto[3], diglesia[4], jnaya[5], hgpardo[6], vmachado[7], dgonzalez[8]}@gradiant.org

Resumen

Los sistemas electro-ópticos (EO) vienen utilizándose en tareas de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) en el terreno militar desde hace décadas. Además, si bien hace años el uso de dichos sistemas estaba limitado a los espectros visible y NIR (*near infrared*), hoy en día la tecnología ofrece alternativas maduras en otras bandas del espectro (*Long Wave Infrared* LWIR, *Medium Wave Infrared* MWIR, e incluso *Short Wave Infrared* SWIR). Esto permite el uso de sistemas electro-ópticos en todo tipo de operaciones, multitud de escenarios (tierra, mar y aire) y en casi cualquier condición (día, noche, lluvia, etc.), hasta el punto que estos sistemas son habitualmente la referencia desde el punto de vista de adquisición de conciencia situacional.

Sin embargo, y a pesar de los avances en análisis inteligente de vídeo, las tareas de monitorización y vigilancia mediante equipos electro-ópticos que dan soporte a ISR siguen muy a menudo ligadas a la intervención directa y manual de un operador.

En esta comunicación se repasa el estado del arte de análisis de vídeo aplicado a ISR con sistemas EO. Además, se presentan los resultados más relevantes de la tecnología de análisis inteligente de vídeo de Gradiant en varios escenarios, y se ilustra cómo dicha tecnología puede ayudar a automatizar tareas de vigilancia, así como dar soporte a nuevos retos operacionales y casos de uso.

Palabras clave

Vídeo análisis, redes neuronales, *Deep Lea*rning, saliencia, multiespectral.

1. Introducción

El análisis de vídeo, entendido como la capacidad para interpretar de manera autónoma una escena tal y como está siendo observada por un sensor en el rango óptico del espectro electromagnético, tiene multitud de aplicaciones potenciales en todo tipo en entornos que van desde el control de calidad industrial, a la monitorización de tráfico o la vigilancia en escenarios militares.

En los últimos años, el avance en dichas capacidades, y por lo tanto en la adopción y uso de los sistemas de análisis de vídeo ha sido muy relevante, y ha venido marcada por la evolución tecnológica en dos frentes: el *hardware*, incluyendo tanto el de adquisición como el de procesado, y los métodos computacionales de análisis de vídeo.

En cuanto al *hardware* de adquisición, en los últimos años se ha pasado de la prominencia casi absoluta del uso de sensores en el rango visible del espectro (a los que habitualmente se les atribuye en exclusiva la denominación de sensores electro-ópticos EO), a la proliferación de sensores, también electro-ópticos, basados en tecnologías ya maduras en otros rangos del espectro. Entre estos últimos, habitualmente agrupados bajo la denominación de *Infrared* (IR), se encuentran sensores en *Near Infrared* (NIR), *Long Wave Infrared* (LWIR), *Medium Wave Infrared* (MIR) y *Short Wave Infrared* (SIR). Además, los principales fabricantes de estas tecnologías han comenzado a proporcionar cámaras que integran múltiples sensores en distintas bandas del espectro óptico [1][2].

En lo relativo a los métodos computacionales, el análisis inteligente de vídeo bebe desde hace décadas de disciplinas establecidas como la visión por ordenador (*Computer Vision*) y el aprendizaje máquina (*Machine Learning*). En los últimos años, las redes neuronales profundas (DNN-*Deep Neural Networks*) se han convertido en las aproximaciones del estado del arte para muchos de los problemas típicos de dichas disciplinas y, por extensión, del análisis inteligente de vídeo. Los avances en el campo de las DNN vienen permitiendo mejorar significativamente el rendimiento de otras aproximaciones, hasta hace poco consideradas estado del arte, en problemas tales como la detección y clasificación de objetos o el reconocimiento de acciones. A su vez, estos avances en DNN han sido posibles en gran medida gracias a los avances en las tarjetas gráficas (GPU).

En este contexto, en los escenarios de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) se ha llegado a una situación en la cual los sensores EO e IR se utilizan en todo tipo de misiones y escenarios y, sin embargo, el uso de métodos de análisis inteligente de vídeo no está tan extendido como los avances en los mismos permiten concebir, de modo que las tareas de monitorización y vigilancia mediante dichos sensores siguen muy a menudo ligadas a la intervención directa, manual y continua de un operador.

Las razones para esta tendencia son principalmente dos. Por un lado, sin bien los avances en técnicas de análisis de vídeo en los últimos años han sido muy relevantes, ni siquiera estas han permitido dar forma a la promesa de parte de la industria, vigente e incumplida desde hace años, de sistemas de vigilancia totalmente fiables, autónomos y desatendidos. El efecto de esta situación ha sido que en escenarios particularmente críticos, como ISR, el análisis inteligente de vídeo se ha descartado por no llegar ofrecer el altísimo rendimiento y fiabilidad que algunos vaticinaban. Por otro lado, la enorme variabilidad de escenarios, en

general y en particular para ISR, susceptibles de ser abordados mediante análisis inteligente de vídeo, hace inviable de desarrollo de sistemas fácilmente pre-configurables y aplicables además a más de uno de entre dichos escenarios, lo cual compromete el modelo de negocio de muchos de los actores implicados.

Existe pues la necesidad de integrar de una manera más efectiva los avances en los métodos de análisis inteligente de vídeo con los avances en *hardware* de adquisición EO/IR y procesado, con el fin de explotar el potencial de dicha integración. Esto permitirá desarrollar herramientas útiles en el entorno ISR que, si bien no eliminen la necesidad de operadores para los sensores EO/IR, sí la minimicen, maximizando además la cantidad y relevancia de la información que estos proporcionan en un entorno que a menudo implica la fusión de dicha información con la de otras fuentes. Este desarrollo ha de pasar invariablemente por la comprensión de las necesidades operacionales de cada caso de uso, del *hardware* y, muy especialmente, del estado del arte relativo a las técnicas de análisis de vídeo, y su adecuación y limitaciones en cada uno de dichos casos de uso.

En este documento, se presentan algunos de los retos actuales más relevantes desde el punto de vista de análisis inteligente de vídeo y se ilustra, a partir de resultados preliminares, como avances en los mismos pueden contribuir a escenarios típicos de ISR.

2. Retos

En este apartado se revisan algunos de los retos actuales más relevantes desde el punto de vista de análisis inteligente de vídeo, y se describen brevemente las aproximaciones más comunes utilizadas para dichos retos.

2.1. Detección de blancos pequeños

Uno de los grandes retos en escenarios ISR es el de la detección de objetos a largas distancias en diferentes entornos. Desde el punto de vista de los sensores ópticos y el análisis de vídeo, este reto ha dado pie a esfuerzos en la línea de detección de blancos a muy baja resolución (*Small Target Detection*), baja relación señal ruido y baja relación señal *clutter* (*Dim Target Detection*). En ISR, a las dificultades inherentes al tamaño de los blancos y a la relación señal ruido o señal *clutter* de los mismos, hay que añadir las derivadas de los escenarios en cuestión. Así, en escenarios marítimos, a menudo es necesario modelar el fondo del mar, lo cual puede llegar a ser complejo. Por su parte, en escenarios de vigilancia aérea, hay que tener en cuenta, además de cambios de iluminación, los efectos de las nubes, y los cambios bruscos del fondo a uno y otro lado de la línea del horizonte.

Con estas consideraciones, y a pesar de que la tecnología *hardware* actual proporciona imágenes con mayor resolución y SNR en el espectro visible, las aproximaciones al problema han venido históricamente basadas en imagen infraroja térmica [3]. Las razones para esto tienen que ver con los escenarios habituales de ISR, que implican a menudo operaciones en condiciones de baja luminosidad u oscuridad. En este punto, es importante señalar que la problemática de las imágenes en los diferentes rangos del espectro son diferentes, y por lo tanto las técnicas para IR no son por lo general extensibles al visible.

Recientemente, a las herramientas más habituales para detección de blancos pequeños en IR, tales como *wavelets* o filtros de realce, se vienen proponiendo otras entre las que cabe destacar las siguientes: En [4] se utiliza filtrado temporal mediante bancos de filtros HMM. En [5] por su parte se presenta una solución basada en la siguiente secuencia de procesados: realce de los objetivos mediante filtros centro-alrededor (*center-surround*), filtrado morfológico, umbralización adaptativa, y finalmente seguimiento (*tracking*) de los objetos detectados. En [6] realiza un preprocesado *top-hat*, seguido de detección mediante fusión de varios métodos de bajo nivel, incluyendo detección mediante *tracking*, realce de contraste, filtrado DoG, blanqueado del espectro de Fourier, y diferenciación *inter-frame*. Por otro lado, se han propuesto además métodos de detección de saliencia visual, orientadas a identificar regiones de la imagen visualmente diferentes del entorno en alguna dimensión perceptual [7] [8].

Alternativamente, existen propuestas en la literatura que utilizan una aproximación diferente, basada en la detección mediante clasificación de objetos, y que a menudo consiste en muestrear mediante ventana deslizante toda la imagen, utilizando algoritmos de clasificación binaria entrenados para el reco-

nocimiento del tipo de objeto de interés. Para dicha clasificación de objetivos de baja resolución, los esfuerzos han venido centrados en el aprendizaje de representaciones de bajo nivel dispersas, tanto de los blancos de interés como de los fondos de la imagen considerados [9][10].

Como ejemplos recientes más representativos del uso de estrategias de clasificación para detección de blancos pequeños, y en concreto de micro-UAV o UAV a larga distancia, cabe destacar el trabajo de [11]. Es este se propone el uso de histogramas de gradientes orientados (HOG) como características de bajo nivel, junto con AdaBoost como algoritmo de clasificación, y *tracking* para filtrar falsas detecciones que no son consistentes con las trayectorias de los UAV detectados en instantes anteriores. En [12], el análisis no es solo espacial, sino espacio-temporal. Es decir en lugar de aplicar un clasificador de aeronaves a distintas sub-ventanas 2D de la imagen, se clasifican un conjunto de sub-ventanas espacio-temporales en el espacio 2D+t, donde t es la dimensión temporal. El muestreo de estas subventanas se hace siguiendo un esquema de ventana deslizante. Para la clasificación, se propone un algoritmo de red neuronal convolucional espacio-temporal (3D CNN). Los resultados son sustancialmente mejores comparados con algoritmos *baseline* de extracción de características de bajo nivel y clasificación del estado del arte basados solo en apariencia 2D. Globalmente, el método consigue una precisión promedio del 85 % en un conjunto reducido de vídeos de test, tanto de micro-UAV como de aviones.

2.2. Explotación y adaptación de los avances en DNN en problemas de VA para ISR

Además de su habitual uso en problemas de clasificación de imágenes [13], las redes neuronales profundas (DNN) también han encontrado utilidad para otros problemas dentro del ámbito del análisis de vídeo. La detección de objetos, por ejemplo, problema muy habitual en escenarios ISR (entendiendo detección como la combinación de la localización del objeto dentro de la imagen y su clasificación en una categoría de entre varias predefinidas) se puede llevar a cabo gracias a una extensión de las arquitecturas clásicas de clasificación que permite generar regiones candidatas y evaluar la probabilidad de que contengan objetos de interés. Tal es el caso de arquitecturas como YOLO [14], Faster R-CNN [15], o SqueezeDet [16]. Entre otras aplicaciones de las DNN podemos encontrar la segmentación de imagen (esto es, otorgar una categoría a cada píxel de la imagen) [17], el seguimiento de objetos móviles en secuencias de vídeo [18] o la superresolución de imagen [19].

El uso de DNN en análisis inteligente de vídeo tiene un grandísimo potencial, pero existen también multitud de retos en los que se debe trabajar para explotar dicho potencial al máximo. Entre estos, cabe destacar la necesidad de encontrar maneras de entrenar estas redes neuronales con bases de datos pequeñas, pues no en todos los ámbitos de aplicación se dispone de las grandes cantidades de datos que habitualmente se necesitan para obtener el alto rendimiento que estas redes tienen la capacidad de ofrecer. En relación con lo anterior, dado que la modalidad de entrenamiento más utilizada en la actualidad es el supervisado, es necesario disponer de datos etiquetados para poder realizar el entrenamiento. Este es un factor a tener en cuenta en aquellas aplicaciones en las que sea necesario crear una base de datos específica, por no existir suficientes datos disponibles con antelación. Estos problemas son particularmente relevantes en escenarios ISR en los que la obtención de conjuntos de datos de entrenamiento es especialmente costosa por razones operativas, o simplemente inviable por no conocerse a priori la naturaleza de los objetos de interés.

2.3. Explotación de información multiespectral

Los avances en el *hardware* de adquisición de imagen, incluyendo la aparición de dispositivos capaces de obtener de modo simultáneo información de diferentes bandas del espectro abre la puerta a nuevas aplicaciones y casos de uso. Esto es particularmente relevante en escenarios ISR, cuya operativa a menudo requiere elementos de vigilancia que estén disponibles en cualesquiera condiciones de luminosidad o climatológicas. Desde el punto de vista del análisis inteligente de vídeo, son necesarias nuevas aproximaciones capaces de integrar, fusionar y explotar toda esta información de cara a maximizar el rendimiento de los sistemas automáticos de ISR.

La aproximación más inmediata para realizar fusión de información multiespectral es llevar a cabo la fusión en el nivel de decisión. Esto es, aplicar de forma separada métodos de análisis específicos a cada una de las bandas espectrales y realizar la fusión de los resultados en el nivel de decisión.

Otros enfoques, sin embargo, optan por llevar la fusión de información a un nivel más bajo. Así, algunos autores [20] proponen generalizar los métodos tradicionales de análisis de imagen RGB para adaptarlos a un número arbitrario de canales. En este caso, es importante que las imágenes correspondientes a cada una de las bandas espectrales estén alineadas. En caso de que el propio sensor de adquisición no proporcione las imágenes alineadas, habrá que tener en cuenta la necesidad de aplicar algoritmos de alineamiento. El uso de DNN para fusión multiespectral admite ambos enfoques, tanto la fusión a nivel de decisión como la fusión a más bajo nivel.

Encontrar la forma más eficaz de combinar las fuentes de información de diferentes bandas espectrales plantea un importante reto ya que, a priori, no existe una fórmula de fusión con igual rendimiento en todos los posibles escenarios de aplicación. Además, no todas las fórmulas de fusión conllevan el mismo coste computacional, lo que puede ser un factor crítico dependiendo del escenario de aplicación.

En Gradiant hemos adoptado el enfoque de fusión multiespectral mediante DNN [21]. La fusión a alto nivel (en las últimas capas de la red neuronal) se ha probado en primer lugar por ser su implementación más directa que la fusión en niveles más bajos. Los resultados obtenidos indican que la fusión a alto nivel ofrece un rendimiento mejor que realizar la fusión en el nivel de decisión, tras haber procesado las diferentes bandas de forma independiente. Entre las líneas futuras está la de evaluar la fusión en las capas inferiores de las DNN, a bajo nivel, ya que su eficiencia y coste computacional prometen ser menores que la fusión a alto nivel.

3. Casos de uso y resultados preliminares

En esta sección se ilustra, mediante resultados preliminares en escenarios ISR, el trabajo de Gradiant en algunos de los retos descritos en la sección anterior.

3.1. Vigilancia marítima desde el aire

En la figura 1 se ilustra un escenario de vigilancia de un entorno acuático desde un UAV equipado con un sensor en el rango LWIR del espectro. Además de las zonas de agua, se observan caminos de tierra y zonas con vegetación. Las zonas terrestres presentan mucho *clutter* debido a rocas y vegetación, y los tamaños en la imagen de los objetos de interés, en este caso personas y pequeñas embarcaciones, sugieren las dificultades de los escenarios de *Small Target Detection* y *Dim Target Detection* descritos en la sección anterior.

En este escenario se han obtenido buenos resultados para la detección de intrusos en el agua mediante la aplicación de técnicas de estimación de saliencia de bajo nivel. En concreto los métodos basados en ecualización en el dominio espectral han demostrado ser adecuados para realce de objetivos a baja resolución. En la figura se observan dos fotogramas en los que se detecta una pequeña embarcación sobre la lámina de agua.

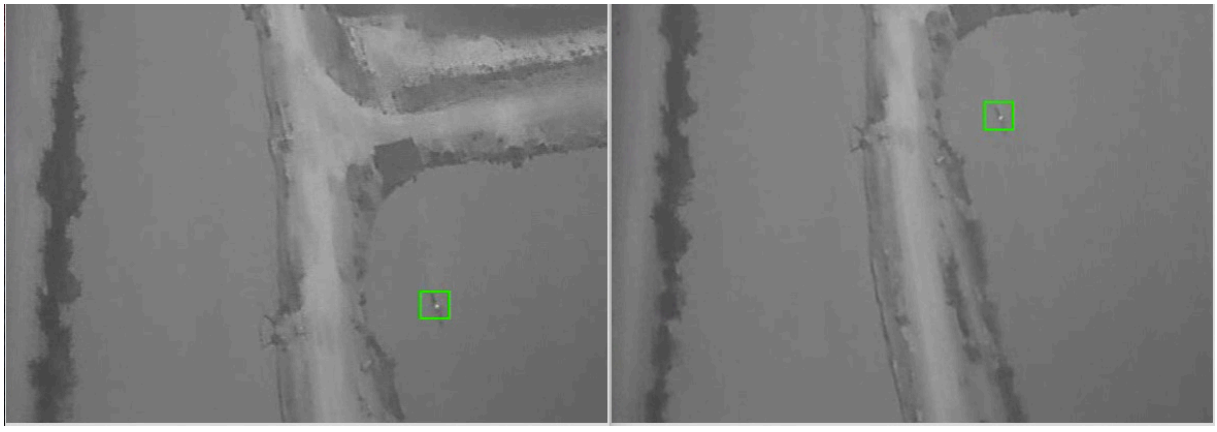


Figura 1. Detección de blancos pequeños sobre el agua en imagen aérea IR.

3.2. Detección de drones

La detección de drones mediante sensores ópticos es un problema complejo debido a multitud de razones. Entre estas, destacan la necesidad de obtener una detección temprana, lo cual requiere de detección de objetos muy pequeños en la imagen, la variabilidad de escenarios y fondos sobre los que dichos drones deben ser detectados, y la existencia de distractores, tales como pájaros y otros elementos, que dan lugar a falsos positivos.

En esta sección se ilustran algunos resultados preliminares obtenidos mediante el uso de técnicas de localización y clasificación basadas en redes neuronales profundas (*Deep Neural Networks* DNN), con arquitecturas de red adaptadas para objetos a baja resolución y a partir de imagen en el rango visible el espectro. En determinados escenarios, se ha observado que la combinación de técnicas de detección de bajo nivel con un clasificador binario basado en DNN puede ser beneficioso, ya que reduce el espacio de búsqueda y permite mejorar la precisión de la localización. Por ejemplo, en escenarios de cámara fija (figura 3, izquierda), se han observado mejoras del rendimiento con el uso de métodos de detección basada en movimiento, mientras que en escenas sobre la línea del horizonte, los mejores resultados se han obtenido mediante métodos de saliencia (figura 3, derecha).

Figura 2. Detección de drones haciendo uso de técnicas DNN.

La figura 2 ilustra algunos resultados de abordar estos escenarios haciendo uso de DNN. La imagen de la izquierda se corresponde a un escenario de detección de un UAV de pequeñas dimensiones por encima de la línea del horizonte con cámara fija. La imagen del centro se corresponde a un escenario de detección del UAV bajo línea de horizonte en una secuencia con *clutter* en el fondo debido al movimiento de la vegetación y vibraciones de cámara. La imagen de la derecha se corresponde a un escenario de detección bajo la línea del horizonte en una secuencia de cámara fija y ausencia de viento y por lo tanto de *clutter* generado por la vegetación.

Los experimentos preliminares sugieren el potencial del uso de esquemas de localización basados en DNN, ya sea por sí mismo o como complemento a otros basados en detección a bajo nivel, ofreciendo así una gama de herramientas muy potente que puede dar respuesta a diferentes escenarios, condiciones, requisitos de coste computacional, etc.

3.3. Vigilancia marítima desde tierra

En esta sección se presentan algunos resultados correspondientes a la detección y seguimiento de embarcaciones desde la costa utilizando información multiespectral proveniente de sensores en los rangos visible y LWIR.

La fusión de información multiespectral para análisis inteligente de vídeo permite explotar las ventajas que ofrecen los diferentes rangos del espectro. Esta aproximación facilita desarrollar sistemas de vigilancia automática operativos tanto de día como de noche, y cuyo rendimiento es superior al de aquellos basados en el uso de información de solo una de las bandas del espectro consideradas. En la figura se ilustra un fotograma, para las bandas visible (RGB, tres primeras) y LWIR (imagen de la derecha), correspondiente a un escenario de vigilancia desde costa a larga distancia, así como las detecciones correspondientes a las embarcaciones en movimiento.

Figura 3. Detección y seguimiento mediante análisis inteligente de vídeo multiespectral.

4. Conclusiones

Los equipos EO e IR se utilizan en todo tipo de misiones y escenarios ISR desde hace años. A pesar de esto, el uso a partir de ellos de métodos de análisis de vídeo no está tan extendido como la proliferación de estos equipos y los avances en estrategias de análisis podrían sugerir.

En este documento se presentan tres de grandes retos en análisis inteligente de vídeo para ISR, en concreto la detección de blancos pequeños, explotación de información multiespectral y aprovechamiento de los avances en DNN. Resultados preliminares del trabajo de Gradiant ilustran el gran potencial de la utilización de los avances en dichos retos en diferentes escenarios de vigilancia.

Agradecimientos

Algunos de los resultados parciales de esta comunicación son resultado del trabajo realizado por Gradiant dentro del proyecto SEERS (Sanpshot Spectral Imager for IR Surveillance), financiado por la comisión europea dentro del programa H2020 con grant agreement N.º 645114.

Referencias

1. *http://www.flir.com/cvs/americas/en/security/view/?id=44260*
2. *http://www.xenics.com/es/camera/meerkat-fusion*
3. *Survey on Dim Small Target Detection in Clutter Background: Wavelet, Inter-Frame and Filter Based algorithms. Procedia Engineering, Vol. 15, 2011, pp. 479-483.*
4. *John Lai; Jason J. Ford; Peter O'Shea; Luis Mejias. Vision-Based Estimation of Airborne Target Pseudobearing Rate using Hidden Markov Model Filters, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.*
5. *T. Zsedrovits, A. Zarandy, B. Pencz, A. Hiba, M. Nameth and B. Vanek, «Distant aircraft detection in sense-and-avoid on kilo-processor architectures», 2015 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD), Trondheim, 2015, pp. 1-4.*
6. *M. Nasiri, M. R. Mosavi and S. Mirzakuchaki, Infrared dim small target detection with high reliability using saliency map fusion. in IET Image Processing, vol. 10, no. 7.*
7. *Robust method for infrared small-target detection based on Boolean map visual theory. Applied Optics, 53(18):3929.*
8. *A. Sobral, T. Bouwmans and E. h. ZahZah, «Double-constrained RPCA based on saliency maps for foreground detection in automated maritime surveillance», 2015 12th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), Karlsruhe, 2015, pp. 1-6.*
9. *Li Z-Z, Chen J, Hou Q, et al. Sparse Representation for Infrared Dim Target Detection via a Discriminative Over-Complete Dictionary Learned Online. Sensors, 14(6).*
10. *Li, Z. et al. Infrared small moving target detection algorithm based on joint spatio-temporal sparse recovery, Infrared Physics & Technology Volume 69:44–52.*

11. *K. R. Sapkota et al., «Vision-based Unmanned Aerial Vehicle detection and tracking for sense and avoid systems», 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, 2016, pp. 1556-1561.*
12. *A. Rozantsev, V. Lepetit and P. Fua, «Flying objects detection from a single moving camera», 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Boston, MA, 2015, pp. 4128-4136.*
13. *Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. Advances in Neural Information Processing Systems NIPS 25. 2012.*
14. *Redmon J, Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. arXiv preprint arXiv:1612.08242. 2016.*
15. *Ren S, He K, Girshick R, Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. Advances in Neural Information Processing Systems NIPS 28. 2015; 91--99.*
16. *Wu B, Iandola F, Peter J, Keutzer K. SqueezeDet: Unified, Small, Low Power Fully Convolutional Neural Networks for Real-Time Object Detection for Autonomous Driving. arXiv preprint arXiv:1612.01051. 2016.*
17. *Long J, Shelhamer E, Darrell T. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015, pp. 3431-3440.*
18. *Wang, Naiyan and Yeung, Dit-Yan. Learning a Deep Compact Image Representation for Visual Tracking. Advances in Neural Information Processing Systems NIPS 26. 2013.*
19. *Dong C, Change C, Tang X. Accelerating the Super-Resolution Convolutional Neural Network. arXiv preprint arXiv:1608.00367. 2016.*
20. *Benezeth Y, Sidibé D, Thomas J. Background subtraction with multispectral video sequences. The IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) workshops. 2014.*
21. *Liu J, Zhang S, Wang S, Metaxas D. Multispectral deep neural networks for pedestrian detection. arXiv preprint arXiv:1611.02644. 2016.*

2D. Sensores y sistemas optrónicos

Desarrollo de un sistema integrado METOC/REA de apoyo a operaciones militares

Ortega Felipe, Alejandro[1,*], Espinosa González-Llanos López, Salvador[1] , Torres García, José Ramón[1], Díaz Hernández, Gabriel[2] , Losada Rodríguez, Íñigo[2], Molina Sánchez, Rafael[3]

[1] Armada Española – Instituto Hidrográfico de la Marina; Plaza San Severiano s/n, 11007 Cádiz aortfel@fn.mde.es (AOF), sespinosa@fn.mde.es (SEGL), jtorgarc@fn.mde.es (JRTG).

[2] Instituto de Hidráulica Ambiental Universidad de Cantabria; Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, C/Isabel Torres, 15. 39011 Santander Cantabria. diazg@unican.es (GDH), inigo.losada@unican.es (ILR).

[3] ETSI Caminos, Canales y Puertos (Universidad Politécnica de Madrid). C/Profesor Aranguren, s/n 28040 Madrid. rafael.molina@upm.es (RMS).

* Autor principal y responsable del trabajo: aortfel@fn.mde.es (AOF).

Resumen

Las operaciones navales cerca de costa requieren conocer con gran exactitud y suficiente antelación el comportamiento general de la dinámica costera (distribución del oleaje, información hidrodinámica de las playas de interés para las operaciones, etc.). Para ello, en el presente estudio se conceptualiza una metodología para la gestión temprana de las condiciones ambientales que debe cubrir todas las áreas de acción de la Armada española, y en concreto para las operaciones anfibias, basada en el acoplamiento de modelos de propagación de oleaje desde aguas profundas hasta la misma zona de desembarco de las unidades, su interacción con la playa y ulterior interpretación de informes automatizados orientados al proceso de asesoramiento (*decisión – making*) con el objetivo final de optimizar y minimizar el riesgo para las operaciones.

El Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHC) han venido trabajando en la definición y desarrollo de uno de los módulos consistente en un sistema operacional específico para operaciones anfibias. Dicho sistema sigue una arquitectura modular, flexible y fácilmente modificable a nuevas necesidades GEOMETOC y absolutamente re-localizable a nivel global.

Durante el primer año de desarrollo del sistema, se han realizado las primeras pruebas en ejercicios reales integrando el método en los sistemas de mando con muy buenos resultados. Este primer paso ha permitido re-ajustar la conceptualización del sistema y establecer nuevas tareas para el desarrollo de una segunda versión que incluya: 1) poner en operacional el actual módulo operaciones anfibias (OA), 2) validar las salidas del modelo OA, 3) una segunda fase de programación para desarrollar los módulos de apoyo a otras unidades de la Armada (MCM, ASUW…), 4) incluir un módulo real de operaciones de apoyo REA (*Rapid Environmental Assesment*) en tiempo real basado esencialmente en el análisis de imágenes georreferenciadas.

Palabras clave

GEOMETOC, REA, sistema operacional, operaciones anfibias.

1. Introducción

El éxito de una operación naval es la suma de un conjunto de procesos y variables concurrentes que, sumados todos ellos, apuntan a que se tenga una alta probabilidad de alcanzar los objetivos previstos. En este tipo de operaciones, el marco meteo-oceánico es un factor predominante. Hoy día la ciencia y la tecnología nos permiten gestionar el riesgo operacional de manera muy precisa y funcional convirtiendo un proceso complejo en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones de fácil empleo, adaptada, precisa y específica para las operaciones navales.

Lo que se va a exponer a continuación es una parte de una herramienta informática que permite generar automáticamente productos METOC de fácil interpretación para apoyo a la decisión de estados mayores (EE.MM.) embarcados en la ejecución de una operación anfibia, pero que forma parte de un proyecto más ambicioso que caso de poder culminarse daría respuesta a las necesidades operacionales navales de la Armada española y en algunos aspectos constituiría un instrumento único en el ámbito de la OTAN.

El SOPROA (Sistema Operacional para Operaciones Anfibias) abarca dos periodos distintos e igualmente importantes: información climática (HINDCAST) y la información de predicción (FORECAST) y ambas complementadas son una capacidad enormemente potente que mejora significativamente la seguridad y operatividad de las operaciones anfibias. Operaciones que se planificaban hasta ahora mediante la pericia y experiencia del personal implicado, ahora se pueden gestionar mediante el desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones en el corto plazo, fiables, precisas, operativas y automatizadas. Estas herramientas también presentan la ventaja de no requerir de personal altamente cualificado, sin conocimiento técnico específico en todo tipo de buques de la Armada española. El módulo del SOPROA es un sistema destinado específicamente al asesoramiento de estados mayores tanto al nivel operacional (planeamiento) como desplegable al nivel táctico (predicción).

El objetivo de este estudio es mostrar los primeros resultados operacionales comparados con datos observacionales del Grupo Naval de Playa (GNP), de la primera versión y que además se dan por alcanzadas otras propiedades inherentes al SOPROA como son la re-localización, versatilidad, robustez, operatividad y un alto grado de automatización en el proceso final.

2. Desarrollo

2.1. Concepto de las operaciones anfibias y parámetros operacionales

Las operaciones anfibias son tan antiguas como la guerra naval. Son numerosos los ejemplos de importantes batallas que se han desarrollado en el mismo lugar del desembarco: Troya, los de Ramsés II contra las costas sirias, Maratón, el de César en Inglaterra (55-54 a. J.C.), el desembarco romano en Asturias (en 19 a J.C.), hasta la época moderna con más de 100 asaltos anfibios en la guerra ruso-japonesa, el conocido desembarco de Normandía en la Segunda Guerra Mundial o los asaltos anfibios en la invasión de Iraq en los puertos de Umm Qsar y Al Faw en 2003. El hecho de una operación tan empleada por una fuerza naval reside en sus propias características: conseguir la superioridad militar en la mar, si es

posible su dominio, para disponer de una completa libertad de acción utilizando la mar como un medio de comunicación y logístico y su denegación al adversario tanto por el desembarco anfibio o mediante el poder aeronaval sobre la costa enemiga. Por tanto, disponer de una potente fuerza anfibia nos permite tomar ventaja de las capacidades propias del desembarco anfibio: capacidad logística, rapidez de movimientos, la flexibilidad anfibia, la diversión de una fuerza militar embarcada con gran capacidad de movimientos y por supuesto, la operación anfibia como una maniobra estratégica.

Pero una operación anfibia, para cumplimentar su misión con éxito, necesita del factor sorpresa dado que medios anfibios son vulnerables, salvo que dispongan del adecuado apoyo y protección. Además de que este tipo de operaciones son muy dependientes del entorno méteo-oceanográfico, el tema que nos ocupa.

Actualmente la Armada española dispone de una de las más importantes fuerzas anfibias de toda Europa, contando con buques anfibios, Infantería de Marina, unidades de apoyo como Grupo Naval de Playa, arma aérea y cuerpos de operaciones especiales, además de volcar enormes recursos de personal y material para un adecuado nivel de adiestramiento.

En un desembarco anfibio, a partir de las plataformas tipo LPD (*Landing Platform Dock*) y LHA (*Landing Helicopter Assault*) es necesario el empleo de unidades menores que permitan una proyección flexible y rápida sobre la zona de operaciones. Las hay de diversos tipos dependiendo del país y fuerza anfibia. En la Armada española los principales medios que se emplean son: lanchas de desembarco anfibio LCM1-E, vehículos de combate anfibios AAV y lanchas semirrígidas Supercats con capacidad de hasta 10 personas, aunque también se emplean diversidad de medios en caso de maniobras multinacionales.

El SOPROA proporciona información medioambiental al proceso de proyección de la fuerza de desembarco mediante medios navales de superficie.

Figura 1. Medios superficie empleados para desembarco anfibio. AAV / SUPERCATS / LCM 1-E.

2.2. Metodología

El SOPROA proporciona productos específicos para las unidades de superficie en operaciones anfibias y se dividen en:

1) *Navegabilidad de las unidades de superficie*: corresponde a determinar las condiciones de viabilidad de navegación de las unidades (AAV, LCM1-E y Supercats) dentro de los límites operacionales determinados en la D-AF-01[1]. Para ello el modelo obtiene los parámetros de Hs [m] y Viento (intensidad m s^{-1} a lo largo del perfil de navegabilidad).
2) Varada – MSI de AAV, Supercats y LCM1 - E: corresponde a la parte final de la playa para el desembarco del personal. Los límites operacionales dependen de múltiples parámetros que son:
   a. Varada AAV – SUPERCATS: altura significante oleaje zona rompientes y periodo medio (Tm).
   b. MSI: altura significante en la zona rompientes, periodo medio, ángulo oleaje – orientación playa, viento playa, corrientes rotura y tipo de rompientes.

1 D-AF-01: Publicación *Manual de Procedimientos Anfibios*. Junio 2005.

(MSI: Hsb (pies)+corriente de rotura (nudos)*3+dirección media oleaje[2]+periodo medio[3]+-viento[4]+tipo rompiente[5]).

La aplicación puede proporcionar estos productos en dos periodos de tiempo diferentes: I) *la fase de planeamiento (HINDCAST)* donde se da respuesta a la parte climática determinando estadísticamente cuáles son los procesos, funcionamiento hidrodinámico de la playa tanto en planta como del perfil y los datos estadísticos específicos ya descritos para operaciones anfibias (MSI, varada y navegabilidad) que nos permiten determinar eficientemente la viabilidad de un desembarco anfibio para el periodo de interés. II) *La fase de apoyo a la decisión (FORECAST)* en la zona de operaciones mediante datos de predicción (REA Cat. IV) a partir de una estructura definida con datos de forzamiento de viento y oleaje, nivel del mar y batimétricos.

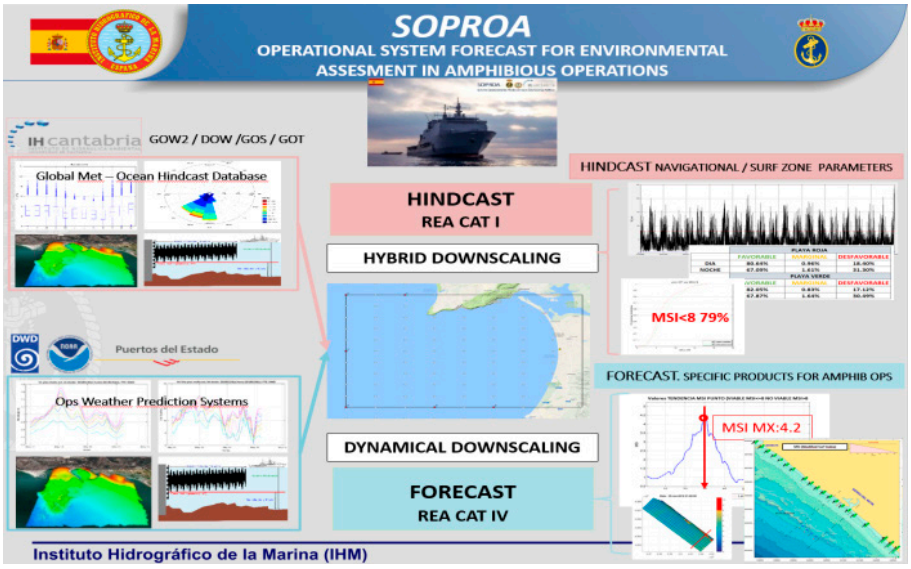


Figura 2. Esquema estructura del SOPROA.

2.2.1. Hindcast. Obtención de la hidrodinámica de la playa. Fase planeamiento

Para la caracterización del funcionamiento hidrodinámico de la playa se debe de obtener la serie temporal de la base de datos de reanálisis caracterizada por los parámetros del oleaje (altura significante del oleaje Hs[m], dirección media θ_m [º], periodo de pico Tp[s] y viento (velocidad viento a 10 metros de la superficie V_{10} y dirección βw). Para el oleaje se parte de las bases de datos de reanálisis que parten de puntos de la malla en aguas profundas desarrolladas en el IHCantabria (GOW2, GOW, DOW), viento con las bases de datos SEAWIND II, ERA INTERIM, SEAWIND NCEP/NCAR y para determinar el nivel del mar: GOT (*Global Ocean Tide*) y GOS (*Global Ocean Surges*).

La metodología aplicada es el *downscaling* híbrido, que consiste en combinar el *downscaling* dinámico mediante modelos numéricos de propagación del oleaje (SWAN) con el *downscaling* estadístico que se basa en la técnica de máxima disimilitud (MAXDISS) basados en *data-mining*. El *data-mining* y *data-clustering* consiste en seleccionar un número reducido de estados de mar de forma que mediante algoritmos estadísticos se pueden agrupar e identificar aquellos estados de mar más representativos de la serie temporal en el punto de control. Como primera aproximación el análisis de 500 a 600 casos es suficiente caracterización. Posteriormente, finalizada la propagación, se reconstruye de nuevo la serie mediante interpolaciones no-lineales basados en la técnica denominada *radial basis functions* (RBFs)[1].

2 Coeficiente ángulo entre dirección oleaje en zona rompientes y orientación playa.
3 Coeficiente obtenido del periodo medio oleaje y Hsb.
4 Coeficiente ángulo del viento y orientación en playa e intensidad en nudos.
5 Coeficiente tipo rompiente en la zona de rompientes.

Esta técnica es de enorme utilidad pues permite obtener datos climáticos en aquellos puntos de interés para el planeamiento de las operaciones, no solamente en la playa, sino también en entradas y salidas de puertos o en zonas de posibles fondeos para las unidades.

Una vez obtenida toda la serie de datos, con los parámetros del oleaje, viento y nivel del mar reconstruidos, el siguiente paso es generar los productos finales de navegabilidad, MSI y varada estadísticos en puntos de interés.

El conjunto de la información obtenida tanto específica de la playa de interés como de su funcionamiento hidrodinámico (intensidades y direcciones de las corrientes de rotura, tipos de rompientes, estados morfodinámicos de la playa, alturas de oleaje significativas (Hs_{12}, Hs_{99},Hs_{50}, Tp, Tm, direcciones medias del oleaje, perfil de equilibro), sumado a la obtenida por los servicios de inteligencia, nos permitirán tener una información clave y precisa en el planeamiento de las condiciones medias de una playa para un desembarco anfibio.

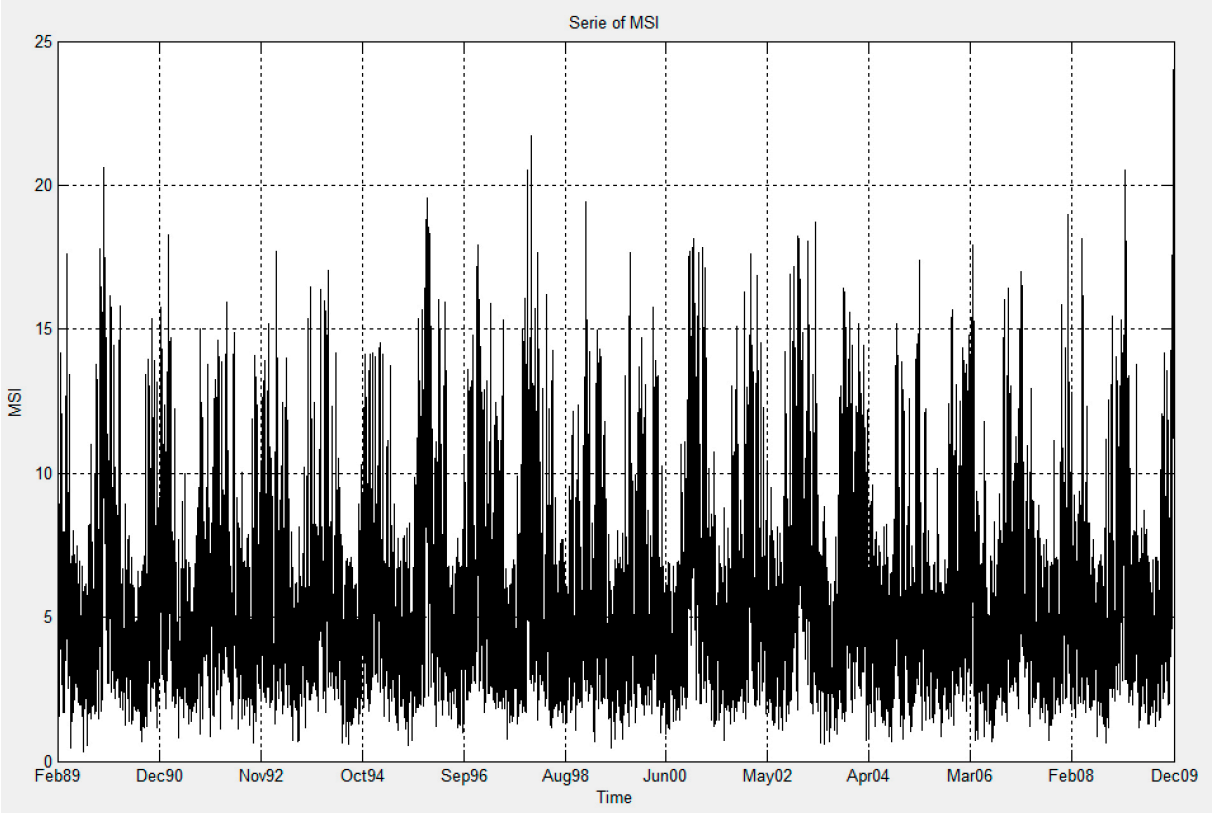


Figura 3. Valores estadísticos MSI (Modified Surf Index) en la playa del Retín.

2.2.2. Forecast. Obtención de la predicción de las condiciones ambientales

La parte del *forecast* operacional surge de proyectos ya aplicados en el ámbito civil y estudios publicados con finalidades muy parecidas al SOPROA, como el estudio desarrollado por el CMRE (*Centre for Maritime Research and Experimentation*)[2] donde se demuestra que la configuración SWAN[3] + SHORECIRC[4] al ser comparado con datos de campo, es perfectamente aplicable incluso con playas con batimetrías complejas o el sistema PATO (Programa de Alerta Temprana de Oleaje)[5] aplicados en el ámbito civil para la construcción de diques civiles como el punta exterior del puerto de Langosteira. Lo que diferencia la parte del *forecast* operacional del SOPROA respecto a los proyectos civiles, como el sistema PATO nombrado anteriormente, son precisamente las características propias de una operación naval, con productos rápidos y muy específicos, de alta automatización y *ad hoc* para las necesidades de la fuerza naval.

Para ello, debe tener un protocolo de obtención de los datos de forzamiento actualizados tanto de viento y oleaje que serán importados posteriormente por la aplicación a través de la GUI (*Graphical User Interface*) tal y como se muestra en la fig. 4.

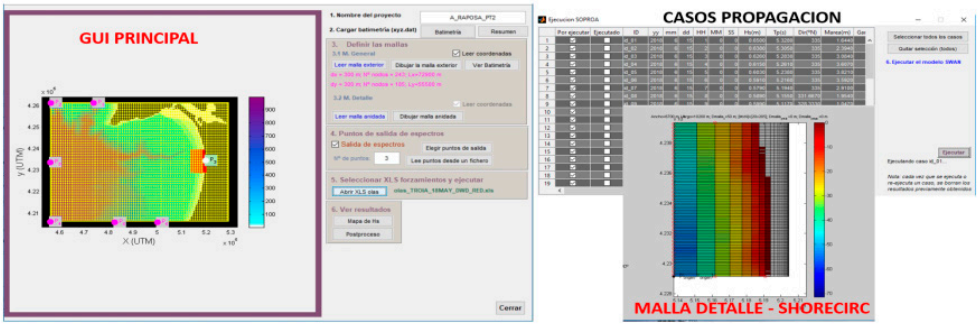


Figura 4. GUI SOPROA v1.0. Forecast Operacional SWORDFISH18.

Una vez introducidos los datos necesarios de oleaje, viento, nivel del mar y la batimetría, se configuran los puntos de interés a través de la interfaz para obtener productos finales para las unidades.

El desarrollo metodológico se puede agrupar en las siguientes fases:

FASE 1. *Obtención automatizada en puntos de interés de la predicción a corto plazo de los modelos de viento y oleaje*

Esta información a día de hoy generalmente no es viable obtenerla directamente desde las unidades de nuestra Armada por dificultades con el ancho de banda necesario de modo que en ese caso debe ser un centro de apoyo quien lo desarrolle y simplifique a archivos formato ASCII de muy poco peso.

FASE 2. *Generar archivo de casos, importación de los datos mediante la interfaz y definición de los puntos de interés*

Este procedimiento está simplificado al máximo para que un operador, con simples conocimientos a nivel de usuario pueda operar y obtener resultados deseados. La metodología aplicada se basa en el *downscaling* dinámico solapando dos modelos numéricos del siguiente modo: el primer lugar propagando el oleaje con el SWAN, modelo espectral validado en múltiples escenarios con resultados contrastados y cuyas características lo hacen idóneo para nuestros propósitos; a continuación acoplando el SHORECIRC un modelo quasi 3D de circulación costera basado en *wave driver* y REF/DIF que nos permiten obtener las corrientes de rotura, entre otros, en la zona de rompientes a partir del tensor de radiación y variación del flujo[6].

FASE 3. *Obtención de los productos finales*

Corresponden a los productos automatizados y específicamente pensados para operaciones anfibias. Se pueden clasificar en la siguiente tabla:

TENDENCIA	HORAS ESPECÍFICAS	PRODUCTOS GEORREFERENCIABLES
Hs, Tp, Dir media	Navegabilidad LCM1-E/SCTS/AAV	MSI
MSI	MSI a lo largo perfil	Varada (AAV / SCTS)
Varada AAV/SCTS	Varada puntos playa	Hsb/Tp/Dir media
		Tipo rompiente

TENDENCIA	HORAS ESPECÍFICAS	PRODUCTOS GEORREFERENCIABLES
PARÁMETROS OLEAJE	NAVEGABILIDAD LCM-AAV-SCTS	MSI
MSI	MSI A LO LARGO PERFIL	VARADA
VARADA AAV - SUPERCATS	VARADA PUNTOS DE PLAYA	Hsb
		PERIODO (Tp)
		TIPO ROMPIENTE

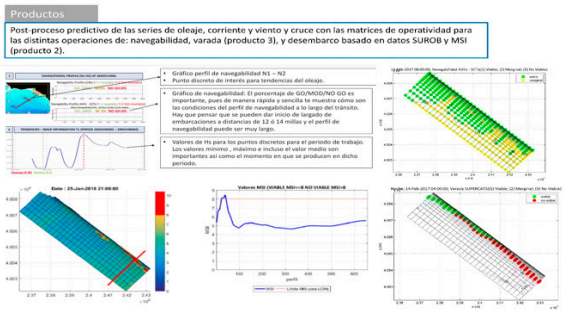


Figura 5. Ejemplos productos obtenidos en el Forecast durante SWORDFISH18.

2.3. Resultados obtenidos en operaciones anfibias

La primera versión del SOPROA se ha estado probando en tres maniobras específicas para operaciones anfibias, dos en territorio nacional en la playa del Retín (MARFIBEX 72, ADELFIBEX 81) y una en Portugal, playa A Raposa (SWORDFISH 18). Los objetivos principales han sido contrastar los resultados con los obtenidos por los mensajes SURFREP que remite el Grupo Naval de Playa y probar otros parámetros del SOPROA como la estructura de comunicaciones, la operatividad y robustez de la aplicación o la bondad de las fuentes de datos usadas (batimetrías y fuentes méteo - oceánicas)

La siguiente gráfica (figura 6) resume y muestra los primeros resultados del SOPROA en las tres pruebas realizadas. Corresponde a los valores del MSI obtenidos por el GNP y el SOPROA en los mismos periodos de tiempo. De acuerdo con los resultados, se puede considerar que las salidas del MSI se encuentran en el mismo orden que las obtenidas por el Grupo Naval de Playa, encontrando mayores diferencias cuanto más energético es el oleaje en la playa. Las tendencias y el comportamiento del MSI se ajustan en ambas salidas aunque hay que observar, en casos puntuales, diferencias significativas de hasta 2,8. Las razones principales son debidas a los valores de Hsb y corriente de rotura que afectan muy significativamente a la suma total del MSI de modo que sutiles diferencias generan valores dispares. En conjunto, se puede observar que las tendencias de ambas fuentes se ajustan adecuadamente en toda la serie y los valores medios y la moda son inferiores a 0,5. Por tanto, los resultados alcanzados hasta ahora son muy esperanzadores, aunque deberán ser corroborados en las pruebas de validación instrumental.

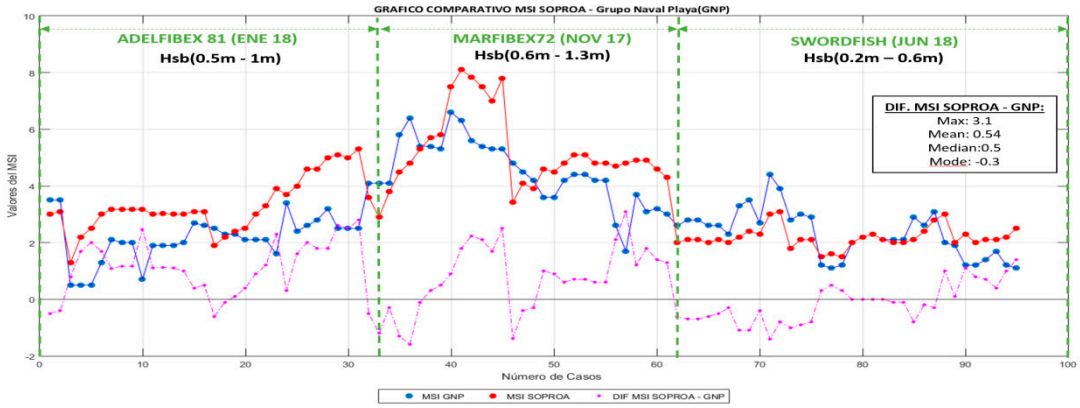


Figura 6. Salidas MSI del SOPROA y del Grupo Naval de Playa en operaciones anfibias.

3. Conclusiones.

Las primeras pruebas han demostrado que el módulo de operaciones anfibias se ajusta perfectamente a las necesidades de un estado mayor desplegable tanto en operatividad, flexibilidad y robustez. Queda no obstante validar las salidas de los modelos mediante la monitorización instrumental de la operación,

principalmente las corrientes de rotura y altura significativa del oleaje en la zona de rompientes, para así acotar los márgenes de incertidumbre.

Con los resultados expuestos, se demuestra que este tipo de aplicaciones responden adecuadamente a las necesidades de las operaciones militares y permiten la inclusión de nuevas capacidades como la adquisición de datos en tiempo real basados en medios aéreos no tripulados que completen la información disponible en desarrollo de las operaciones, proporcionando ventaja operacional y táctica muy valiosa en los EE.MM. embarcados.

Agradecimientos

Al personal implicado en el proyecto del IHCantabria y UPM y al C.F. José Manuel Quijano de Benito, jefe Departamento de Instrucción y Adiestramiento de la Escuela de Hidrografía «Alejandro Malaspina» y al personal del grupo GEOMETOC, por creer desde el principio en este proyecto. Sin ellos, habría sido imposible.

Referencias

1. *Camus P, Méndez FJ, Medina R. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. Coast Eng. 2011;58:851-62.*
2. *Rusu E, Conley D, Ferreira-Coelho E. A hybrid framework for predicting waves and longshore currents. J Marine Syst. 2008;69(1-2):59-73.*
3. *Booij N, Ris RC, Holthuijsen, LH. A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. J Geophys Res. 1999;104(C4):7649-666.*
4. *Svendsen IA, Haas K, Zhao Q. Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC: Version 2.0. Newark, University of Delaware.* http://www1.udel.edu/kirby/programs/nearcom/documents/shorecirc2_0.pdf. *Consultado 15 julio 2018.*
5. *Díaz-Hernández G, Losada IJ, Mendez FJ, (2009). Programa de alerta temprana de oleaje: Improving construction management of port infraestructures using an advanced computer-based systems. Automat Constr. 2017;81:122-133.*
6. *Longuet-Higgins LS, Stewart RW. Radiation stresses in water waves; a physical discussion with applications. Deep-Sea Res. 1964;11(4):529-562.*

Elaboración de una superficie de referencia hidrográfica en las aguas españolas. Aplicaciones cartográficas y en sistemas de información geográfica

Espinosa González-Llanos, Salvador[1,*], Torres García, José Ramón[1], Bernárdez Rodríguez, Patricia[1], Quijano de Benito, José Manuel[1]

[1] Armada Española – Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM); Plaza San Severiano s/n 11007 Cádiz. sespinosa@fn.mde.es (SEGL), jtorgarc@fn.mde.es (JRTG), pberro1@mde.es (PBR), jquide@fn.mde.es (JMQB).

* Autor principal y responsable del trabajo: sespinosa@fn.mde.es (SEGL).

Resumen

La principal dificultad que nos encontramos al integrar información geográfica costera es el uso de sistemas de referencia altimétricos distintos por parte de los servicios cartográficos e hidrográficos. Dos son las principales causas de esta discrepancia: (1) el propósito primordial de la cartografía náutica, que es garantizar la seguridad en la navegación, lo que hace que su referencia sea un valor de naturaleza extrema y distinto en cada zona; (2), el diferente orden de dificultad que ofrecen los medios donde se efectúan las medidas –tierra y mar– que hacen que las precisiones en cada uno de ellos difieran.

Las mejoras que recientemente se han logrado en el cálculo de altura con técnicas GNSS en tiempo real han supuesto que muchos servicios hidrográficos hayan empezado a desarrollar modelos de altura elipsoidal del cero hidrográfico (AECH) en las aguas de su jurisdicción. Esto permite, además de simplificar los trabajos hidrográficos, utilizar una referencia común para las alturas terrestres y las profundidades, y por tanto construir modelos coherentes en las zonas de interfase tierra-mar que, entre otras utilidades, se podrían integrar en sistemas de mando y control de defensa permitiendo aumentar su precisión incorporando capacidades que ahora no podrían tener.

En este artículo se expone un proyecto para elaborar la superficie de referencia hidrográfica oficial de las aguas españolas, de la que el IHM es legalmente responsable, y sus múltiples aplicaciones en otros campos. Como innovación se propone el uso de una metodología basada en cálculos de correlación entre los valores de la ondulación del geoide (N) y los valores de AECH de las estaciones de mareas para la elaboración del modelo de SRH. Esto supondría un ahorro significativo en costes al permitir asignar valores a algunos puntos en la mar de una manera sencilla y sin esfuerzos de observación directa.

Palabras clave

Superficie de referencia hidrográfica (SRH), *Real Time Kinematic* (RTK), ondulación del geoide (N).

1. Introducción

1.1. Los diferentes planteamientos de las altimetrías náutica y terrestre

El uso de niveles de referencia altimétricos distintos en las cartografías náuticas y terrestres viene motivado porque el objetivo prioritario de aquella es garantizar la seguridad en la navegación en un medio mucho más elástico que la tierra. En efecto, se trata de establecer en la mar una cota cero segura (habitualmente el LAT, Lowest Astronomical Tide), válida para cada una de las zonas –relativamente pequeñas– donde se considere que los márgenes de variación de mareas para todo el área estén dentro de valores admisibles. En consecuencia, los servicios hidrográficos han venido calculando el CH (cero hidrográfico) en lugares próximos a las zonas de los levantamientos y señalizándolo con marcas permanentes (clavos geodésicos o *benchmarks*) en el terreno con el fin de poder reconstruir el punto de toma de datos en un futuro sin tener que volver a calcularlo cada vez.

Con el tiempo se ha ido obteniendo un conjunto discreto de puntos a lo largo de la costa que han ido definiendo el CH a partir de series de observaciones de mareógrafos lo suficientemente largas, usualmente más de un año, tal y como recomiendan las normas internacionales[1], como para hacer una predicción fiable del LAT. Cada CH es local y calculado como un valor independiente del resto de CCHH, y queda únicamente ligado a su *benchmark* sin –por así decirlo– «mirar a los demás».

El criterio que sigue la cartografía terrestre es bien distinto. Basta con establecer un único punto de referencia altimétrico para calcular el resto de alturas relativas a este mediante técnicas geodésicas y gravimétricas. Es por ello que en la zona común de interfase tierra-mar ha habido tradicionalmente diferencias entre los dos sistemas cartográficos, cuyas magnitudes dependen básicamente de procesos locales oceanográficos distintos en cada lugar que pueden suponer discrepancias de hasta varios metros, que según para qué propósitos tienen gran importancia.

1.2. El progresivo acercamiento de las dos referencias

La incorporación del GPS trajo consigo la generalización del uso de un sistema universal de referencia terrestre geocéntrico que resolvió muchos problemas derivados de la existencia de los diferentes sistemas locales clásicos de proyección. No obstante, la citada universalidad es válida únicamente para las coordenadas planimétricas, ya que en general los países han continuado con el uso de sistemas altimétricos nacionales para la coordenada Z. Así en el caso de España se toman como referencias altimétricas cero las siguientes[1]:

- Para las alturas terrestres el valor del nivel medio del mar en Alicante en la península y las referencias mareográficas locales en cada una de las islas, definidas y publicadas por el IGN (Instituto Geográfico Nacional).

1 Art. 4 del R.D. 1071/2007 de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España.

- Para las profundidades de la cartografía náutica los ceros hidrográficos, definidos y publicados por el IHM.

Hay iniciativas muy avanzadas para tratar de armonizar la referencia altimétrica terrestre, (EVRS European Vertical Reference System), pero en la práctica su uso no está implantado todavía en los sistemas geodésicos nacionales. En cuanto a la armonización de la referencia altimétrica hidrográfica hay pocas iniciativas transfronterizas al respecto destacando la recientemente iniciada entre los servicios hidrográficos de España y Portugal[2].

Gracias al progresivo desarrollo de las técnicas GNSS se han ido calculando con precisiones aceptables las alturas elipsoidales de los *benchmarks* de muchas estaciones de mareas, y por tanto las de sus CH (AECH). Se han enlazado también algunos de esos *benchmarks* con la red de nivelación de alta precisión del IGN mediante procedimientos topográficos. Aunque esto último requiere de una metodología a veces costosa y larga, ha permitido calcular un valioso dato al que nos referiremos más adelante: la altura de cada uno de esos CCHH respecto del nivel medio del mar en Alicante, relacionando así por primera vez los dos sistemas de referencia altimétricos nacionales.

1.3. El modelo geoidal de CH.

Tradicionalmente, en los trabajos hidrográficos se utilizan los mareógrafos para tres propósitos distintos:

- (1) Para calcular la altura del nivel del mar respecto del CH local correspondiente (altura de marea), y de este modo poder reducir la profundidad instantánea obtenida.
- (2) Para calcular esa misma referencia local CH.
- (3) Para analizar el registro y determinar las ondas de marea que se utilizarán para las predicciones publicadas en el Anuario.

En el primer caso el uso del mareógrafo se limita al tiempo en el que el levantamiento batimétrico tiene lugar; para el segundo es necesario un despliegue del equipo mucho más tiempo para poder extraer las constituyentes armónicas significativas en ese puerto de la onda de marea para calcular el LAT. Finalmente, para el tercer propósito son necesarias esas constituyentes armónicas para predecir las horas de pleamares y bajamares futuras y sus alturas respecto del nivel CH, que sirven para confeccionar el Anuario de Mareas[3].

Podemos definir la Superficie de Referencia Hidrográfica (SRH) para España como una superficie continua de todas las aguas de jurisdicción española, que asigna a cada punto del espacio acuático un valor de altura elipsoidal que constituye la referencia cero para las profundidades.

Los avances en el campo de altimetría satelital hacen ya posible el uso operativo de técnicas RTK (*Real Time Kinematic*) en los trabajos hidrográficos para extraer la altura de marea instantánea, puesto que los equipos GNSS son capaces de medir en tiempo real la altura elipsoidal del nivel instantáneo del mar (AENM) con las precisiones exigidas por la OHI (Organización Hidrográfica Internacional). El uso de esta técnica permitiría eliminar de facto el uso de mareógrafos para calcular el dato de marea, con la ventaja adicional de esperarse más preciso por el hecho de calcular el nivel del mar sobre el CH en el punto donde realmente se está midiendo la profundidad y no en el lugar de instalación de la estación de mareas. Por esta razón la OHI recomienda a los Estados el desarrollo de modelos de SRH en sus costas para aplicarlos a los trabajos de batimetría.

Pero la construcción de estos modelos no es sencilla, entre otras cosas porque deben apoyarse no solamente en los CCHH ya obtenidos de las estaciones de mareas, donde tenemos la ventaja del terreno para

2 Actividad 08/17A del programa de cooperación bilateral entre EEMM de España y Portugal: «Establecer una superficie de referencia vertical común para uso en cartografía náutica», aprobada en noviembre de 2017 y refrendada en mayo de 2018.

3 El Anuario de Mareas es un complemento imprescindible a la carta náutica que publica todos los años el IHM para que el navegante pueda extraer el dato de altura de marea mediante las predicciones mencionadas y sumarlo a la sonda de la carta para calcular la profundidad en un instante cualquiera. Alcanza a los puertos atlánticos y a algunos mediterráneos más próximos al estrecho de Gibraltar. Es asimismo el dato de predicción de mareas oficial del Estado.

calcular la AECH, sino también en puntos oceánicos, donde calcular ese dato es un proceso más complejo. Las recomendaciones técnicas apuntan a efectuar modelos que requieren de costosas observaciones para su validación y el desarrollo y aplicación de modelos hidrodinámicos de apoyo[2].

La metodología que aquí se propone simplifica la solución, puede ahorrar largas y costosas observaciones en la mar y relaciona íntimamente la solución con la referencia vertical terrestre. Una vez culmine su desarrollo bastaría con contar con esa superficie de referencia y un equipo GNSS para hacer cualquier trabajo hidrográfico. De esta forma, el uso de los mareógrafos sería necesario únicamente para el cálculo de la predicción de mareas para el anuario. Además, el método propuesto permite a priori extender los resultados a una zona amplia hacia la mar, por lo que podría usarse no solamente en los trabajos hidrográficos sino también para otros propósitos diversos; en general, en aquellos en los que sea útil contar con un sistema de referencia regional común para tierra, mar y aire gestionable en tiempo real y basado en técnicas GNSS (*desarrollo de sistemas de información geográfica de mando y control de defensa, por ejemplo*). O también para otros de ingeniería que requieran del establecimiento de una referencia estándar hidrográfica y relacionada con la referencia terrestre sin necesidad de cálculos previos, en particular en zonas costeras y en la interfase tierra-mar (*dragados, batimetrías de apoyo en obras portuarias, gestión de las zonas costeras etc…*).

2. Desarrollo

2.1 Metodología

La magnitud altimétrica medida por los equipos GNSS se refiere a un elipsoide de referencia. Esto basta para propósitos hidrográficos, ya que la diferencia de la medida con la AECH nos daría directamente como resultado la altura de marea. Pero no sería de utilidad para aplicaciones en las que pretendamos integrar sistemas altimétricos terrestres e hidrográficos, donde interesa representar los verdaderos desniveles físicos.

La transformación de la altura elipsoidal (AE) de cualquier punto en altura ortométrica (AO) – alturas «físicas», referidas a un geoide de referencia–, es sencilla de aproximar mediante la fórmula[4]:

$$AO = AE - N \qquad (1)$$

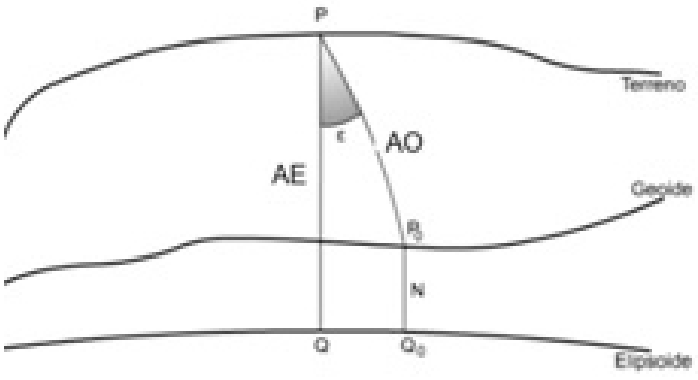


Figura 1. Esquema de la relación altura elipsoidal – altura ortométrica – ondulación del geoide.

Siendo N el valor local de la separación elipsoide – geoide, conocido como ondulación del geoide. Si además el modelo se ajusta a AO = 0 en el punto de referencia de altimetría terrestre (por ejemplo, en el caso de la península al nivel medio del mar en Alicante), el resultado quedaría referido a él.

4 A nivel submilimétrico para valores de la desviación de la vertical Ɛ medios de 10 segundos.

En España el IGN ha logrado muchas mejoras en este campo en los últimos años partiendo de modelos globales o regionales de geoide, densificando las medidas obtenidas con observaciones locales de gravimetría y/o ajustando las ya existentes redes de nivelación. Fruto de ello se ha publicado el modelo EGM2008-REDNAP[3], que ofrece resolución y precisión suficientes para propósitos diversos, entre ellos para hidrografía, lo que nos permitiría transformar las profundidades en alturas ortométrica en cualquier instante de marea. La automatización de este proceso, que será uno de los objetivos del proyecto que se presenta en este artículo, haría que ambas referencias, la terrestre y la náutica, quedaran ligadas.

A pesar de las grandes diferencias en cuanto a técnicas de cálculo es un hecho conocido que la ondulación del geoide y el nivel medio del mar están íntimamente relacionados[4]. Ha de esperarse por tanto que los niveles de referencia cero de las cartas también tengan una cierta relación con los valores de N en zonas donde la amplitud de marea sea parecida. No es tan obvio, no obstante, que esa relación se deba observar igualmente cuando se trata de contrastar alturas elipsoidales contra valores de N, ya que comparamos una referencia matemática, el elipsoide, con una física, el geoide.

Llegados a este punto, podemos presentar por fin la pregunta central sobre la que gira este artículo: ¿existe relación entre los valores de AECH calculados por los hidrógrafos y los valores de N aportados por los geodestas?

2.2. Descripción de las estaciones de muestra

Para poder hacer una primera aproximación del grado de relación existente entre las AECH y los valores correspondientes de N se escogieron un total de 33 estaciones de mareas de la costa peninsular española en las que se conocían las alturas elipsoidales del CH calculadas con observaciones GNSS (figura 2). Para ello:

(a) Se segmentaron las estaciones en tres grupos de diferentes zonas geográficas para estudiar el comportamiento de cada uno de ellos individualmente. Los grupos escogidos fueron Cádiz (mesomareal) (9 estaciones), Galicia-Cantábrico (macromareal) (9 estaciones) y Mediterráneo (micromareal) (15 estaciones).

(b) El criterio de segmentación seguido fue un compromiso entre procurar, por un lado, que el valor de la variación de la AOCH dentro de cada grupo de estaciones fuera el menor posible, y por otro, disponer de un tamaño de muestra por cada grupo suficientemente representativo.

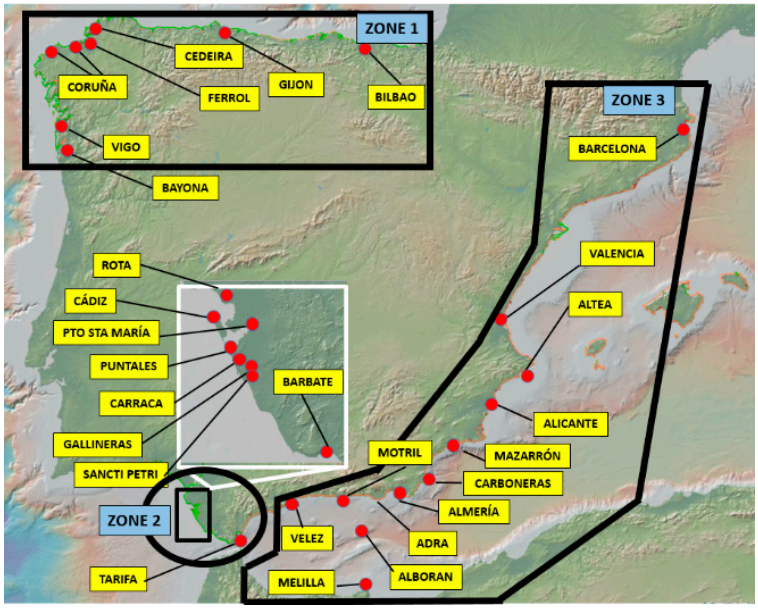


Figura 2. Zonas geográficas y estaciones de control usadas en los modelos de regresión para el cálculo de la altura elipsoidal del cero hidrográfico en función del valor de N.

2.3. Cálculo de los modelos geoidales de AECH

Una vez escogida la muestra de estaciones de mareas y formados los grupos se planteó el estudio de la siguiente relación:

$$AECH = f(N) + \xi(x) \qquad (2)$$

Siendo,

AECH: Valor conocido de la altura elipsoidal del CH calculado con técnicas GNSS;

f(N): Valor pronosticado de la altura elipsoidal, función de regresión dependiente de N;

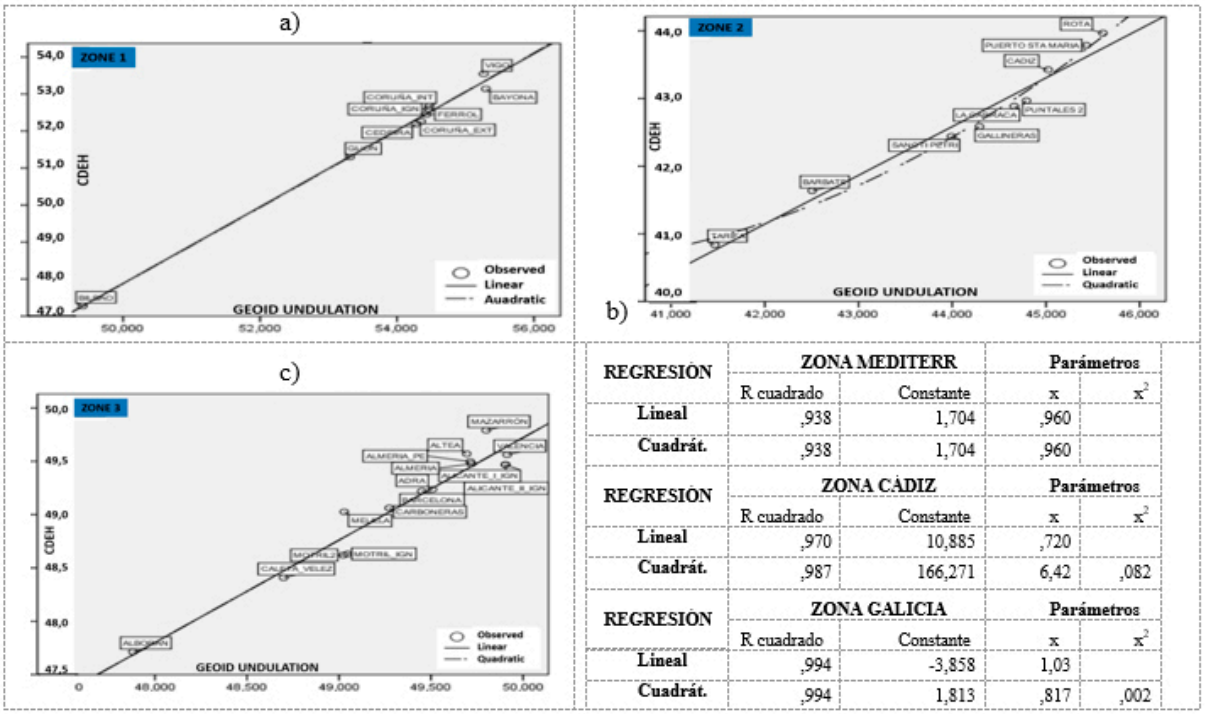
ξ (x): Residuos, diferencias entre el valor calculado y el pronosticado.

Confrontando los valores de N con los conocidos de AECH se calcularon para cada zona dos funciones de regresión entre las variables N y AECH, una lineal y una cuadrática, que constituyen las distintas f(N), según el caso.

Finalmente, con los valores pronosticados por los modelos en las estaciones de control se calcularon los residuos ξ (x). Asimismo, se testearon los modelos en 10 estaciones de validación pertenecientes a las tres zonas estudiadas cuyas AECH eran conocidas, pero que no formaron parte del cálculo de las regresiones.

3. Resultados y discusión

Los principales resultados obtenidos se resumen en las figuras 3 y 4:



REGRESION	ZONA MEDITERR		Parámetros	
	R cuadrado	Constante	x	x^2
Lineal	,938	1,704	,960	
Cuadrát.	,938	1,704	,960	
REGRESION	**ZONA CÁDIZ**		**Parámetros**	
	R cuadrado	Constante	x	x^2
Lineal	,970	10,885	,720	
Cuadrát.	,987	166,271	6,42	,082
REGRESION	**ZONA GALICIA**		**Parámetros**	
	R cuadrado	Constante	x	x^2
Lineal	,994	-3,858	1,03	
Cuadrát.	,994	1,813	,817	,002

Figura 3 / Tabla 1. Regresiones lineales y polinómicas de orden 2 por zonas, y tabla con principales resultados estadísticos. Variable predictora: ondulación del geoide en la estación de mareas. Variable dependiente: altura elipsoidal del CH en la estación de mareas.

Por otro lado, los valores de los residuos ξ (x) tanto en las estaciones de control como en las de validación se exponen en las siguientes gráficas:

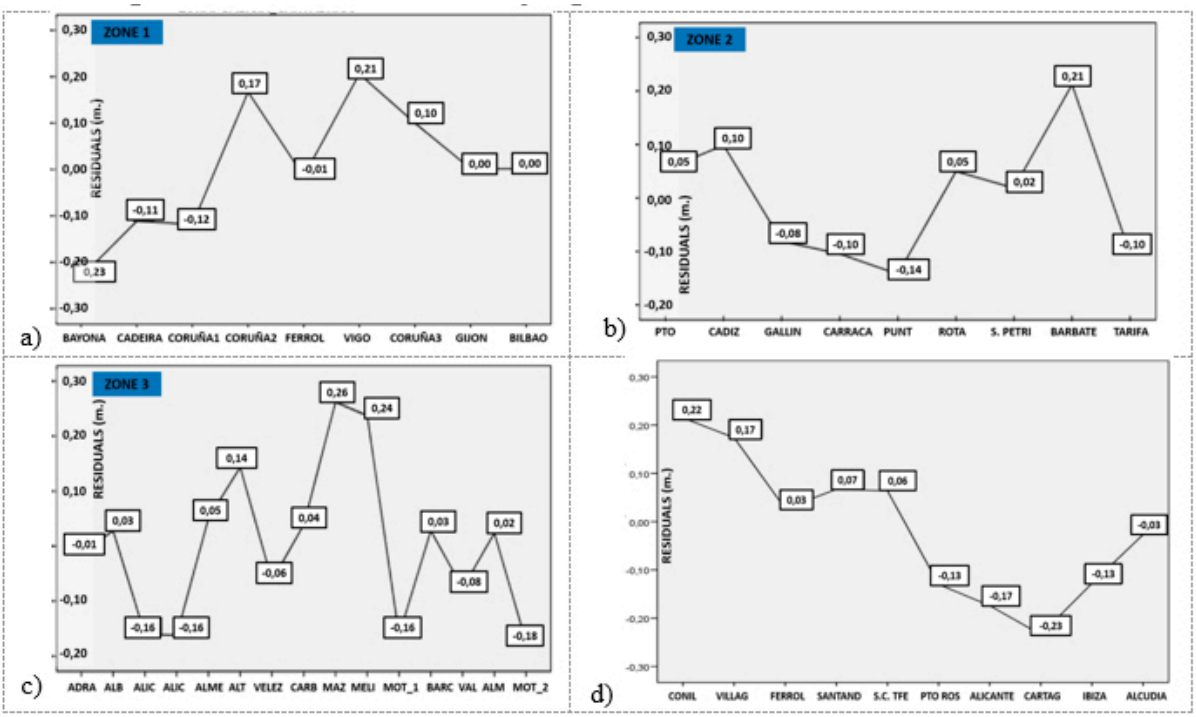


Figura 4. Valores de los residuos en las estaciones de control de las tres zonas de estudio a), b) y c) y en las estaciones de validación escogidas d), que no contribuyeron al cálculo de las regresiones.

Se puede observar que, tanto gráfica como analíticamente, existe una evidente relación entre los valores de la AECH y los de la ondulación del geoide N en todas las zonas. Se observa también que la relación es prácticamente lineal en las zonas de Galicia-Cantábrico y Mediterráneo. Es precisamente en estas dos zonas donde la AOCH varía menos a lo largo de la línea de costa. Este hecho está en línea con trabajos de orientación similar[5].

Sin embargo, aunque varios órdenes menor en extensión espacial, en la zona de Cádiz la AOCH sufre mayor variación encontrando que la solución cuadrática contribuye a mejorar el valor de correlación estadística; aparece un valor significativo en el término en $\mathbf{x^2}$, explicado por el hecho de que la amplitud de marea disminuye sensiblemente hacia el Estrecho, al igual que lo hace N. Estos resultados coinciden con los enfoques geodésicos y geofísicos expuestos por otros autores[6].

En cuanto a la magnitud de los residuos se puede observar que, salvo alguna excepción, los valores se encuentran en un intervalo menor de +/- 20 cm, tanto en las estaciones de control como en las de validación. Son resultados muy esperanzadores teniendo en cuenta que constituyen una primera aproximación, y avalan a priori la validez de la metodología expuesta para una gran cantidad de propósitos, incluido el hidrográfico.

4. Conclusiones

En este trabajo se demuestra que en las costas peninsulares existe una clara correlación estadística por zonas entre las alturas elipsoidales del CH calculadas por el IHM y las ondulaciones del geoide publicadas del IGN. Este hecho abre la posibilidad de plantear la elaboración de una SRH que se pueda referir fácilmente a la referencia terrestre y útil para propósitos hidrográficos conocido únicamente el valor de N, que actuaría como variable independiente. Las posibilidades que ofrece este planteamiento son enormes, ya que permitiría calcular un modelo continuo del CH únicamente con los valores del EGM-2008 REDNAP, simplificando mucho los costosos protocolos de validación habitualmente usados.

Además, la SRH puede resultar de gran utilidad para desarrollos de aplicaciones de información geográfica integrables en sistemas de mando y control de defensa, o bien para cualquier otro propósito

científico o técnico en el que una estandarización de los valores del nivel del mar o una relación de las profundidades con la altimetría terrestre y aérea sea importante.

Agradecimientos

Al AN Antonio Correa Gálvez, por su imprescindible contribución al desarrollo de esta idea; y por todo lo que nos ha enseñado a lo largo de sus cuarenta años como hidrógrafo.

Referencias

1. *Publicación M-3 Resolutions of the International Hydrographic Organization. Technical resolution A2.5 Datums and benchmarks. Monaco: Organización Hidrográfica Internacional; 2010.*
2. *Mills, J., Dodd, D. Ellipsoidally referenced surveying for hydrography. Copenhague: International Federation of Surveyors (FIG); 2014.*
3. *El nuevo modelo de geoide para España EGM2008 REDNAP (2011). Disponible desde* ftp://ftp.geodesia.ign.es/documentos/ *descargado el 20 de septiembre de 2016.*
4. *Pugh, D. Changing sea levels. Effects of tides, weather and climate. Cambridge: Cambridge University Press; 2004.*
5. *Slobbe C., Klees, R., (2013). Lowest astronomical tide in the North Sea derived from a vertically referenced shallow water model, and an assessment of its suggested sense of safety. Journal Marine Geodesy 36(1), 31-71.*
6. *Sánchez Sobrino, J.A., Cano, M.A., Barbadillo, A. y Valdés, M. (2012). Adjustment of orthometric heights in the Spanish geodetic network. Proceedings 7ª Asamblea hispano-portuguesa de geodesia y geofísica S01(1), 29-34.*

Método de optimización de la respuesta en frecuencia de un canal acústico submarino

Gallego Muñoz, Vicente. Isdefe. Beatriz de Bobadilla, 3, 28040 Madrid.

Email: vgallego@isdefe.es

Resumen

Se presenta un estudio detallado sobre la función de transferencia en frecuencia, H(f), de un canal acústico de comunicaciones submarino en una zona de aguas profundas, el cual enlaza dos transductores ubicados a poca profundidad. La superficie del mar provoca la propagación multi-camino que experimentan las ondas acústicas en su trayecto entre proyector e hidrófono, incluida la reflexión sobre dicha superficie. Debido a esto, el campo espacial acústico submarino presenta un patrón típico de interferencias, con máximos y mínimos espectrales alternativos. Este fenómeno es muy conocido en propagación sonar y se conoce como Efecto Lloyd.

El análisis realizado constituye una aproximación diferente, orientada a la medida de la suavidad del perfil del módulo de H(f) respecto de la frecuencia acústica. Este perfil es muy irregular en determinadas bandas espectrales, lo que dificulta la transmisión de señales de banda ancha, necesarias para alcanzar una alta tasa de transmisión de datos. Se propone un algoritmo que mide la suavidad del perfil de H(f), e identifica la profundidad óptima para ubicar el proyector, teniendo en cuenta el gradiente térmico del agua, la curvatura de las trayectorias, el estado de la superficie, la profundidad del receptor y la longitud del canal. De este modo se identifican una o varias ventanas espectrales con respuestas lo más uniformes posible, en función de las condiciones ambientales. El sistema de comunicaciones submarino se puede adaptar a esta situación óptima, configurando la ubicación de sus nodos, las características de la señal a transmitir y el tipo de modulación empleada.

Se propone además el empleo alternativo de un pequeño *array* proyector de 4 elementos entre los cuales se reparte la potencia acústica a emitir. Esto permite una equalización adicional de H(f). Entre las múltiples aplicaciones posibles destaca la comunicación entre vehículos submarinos no tripulados (UUV).

Palabras clave

Acústica, oceanografía, submarino, telecomunicaciones.

1. Introducción

Prácticamente la totalidad de los modernos sistemas de comunicaciones utilizan como soporte y como canal de transmisión, respectivamente, las ondas electromagnéticas (ondas EM en adelante) y el medio atmosférico. Existen algunas excepciones: los sistemas de comunicación submarinos [1,2]. Las ondas EM se atenúan con rapidez en el agua del mar, debido a su elevada conductividad [3]. Esto hace que no sea posible la utilización de ondas EM más allá de unos pocos metros. En los últimos años se han propuesto técnicas alternativas [4], con el objeto de crear un sistema «wifi» submarino, por medio de ondas de luz coherente (láser visible) o utilizando ondas de RF. Sin embargo, el sonido submarino sigue siendo el soporte casi exclusivo de los cada vez más sofisticados sistemas de transmisión de datos en redes submarinas. Se suelen emplear métodos de modulación digital con distintos niveles de complejidad: esquemas de modulación PSK, BPSK, QPSK, QAM y/o FSK [5,6,7,8].

En este trabajo se estudia la evolución del módulo de la función de transferencia de un canal submarino cercano a la superficie en función de la frecuencia de la señal acústica. Se desea maximizar y optimizar la banda utilizable de frecuencias acústicas para disponer de un enlace submarino lo más fiable y robusto posible. El artículo se centra en la influencia de la superficie del mar sobre la respuesta del canal. Se considera un entorno de aguas profundas sin influencia del fondo marino [9]. Como aplicaciones se tienen las comunicaciones entre buques de superficie y buques submarinos de gran tamaño, entre un buque nodriza y un vehículo autónomo, no tripulado y de pequeño tamaño, o entre dos de estas plataformas no tripuladas.

2. Modelo acústico para el canal de transmisión submarina

En la fig.1 se representa de forma esquemática el canal de comunicaciones que se desea analizar. Se supone que el proyector acústico es una fuente esférica que emite una señal armónica de frecuencia $\omega=2\pi f$. Esta onda de sonido puede llegar al receptor por dos caminos diferentes, uno directo, cuya longitud se denomina , y otro indirecto, que incluye una reflexión agua-aire en la superficie del mar con el consiguiente cambio de fase de 180º para la onda de presión acústica [9]; la longitud recorrida en este segundo camino es .

2.1. Magnitudes

El canal se considera útil siempre que su longitud sea lo suficientemente grande como para presentar un interés práctico real. Además, sus dos nodos (proyector e hidrófono) se suponen ubicados en profundidades accesibles, en relación con las tecnologías actualmente disponibles. La profundidad de la fuente es , la profundidad del receptor es z y el alcance horizontal es r.

2.2. Estado de la superficie

Un factor determinante es el estado de la superficie del mar, influido por las condiciones meteorológicas, fundamentalmente por el viento. La relación de magnitud entre la altura de las olas (valor eficaz) y la

longitud de onda acústica λ determinará si la superficie del mar se comporta como un reflector de sonido (superficie horizontal) o como un dispersor de sonido (superficie rugosa). En el primer caso se tiene que el ángulo de incidencia y el de reflexión tienen el mismo valor, , θ_i en la fig. 1, y el sonido sigue una trayectoria fácilmente predecible a partir del ángulo de salida desde el proyector. En el segundo caso, la intensidad acústica se dispersa en todas direcciones después de incidir sobre la superficie. En general se utiliza el criterio de Rayleigh para distinguir entre los dos posibles estados de la superficie. Si se cumple la desigualdad $\lambda/4>kh_{rms}\ sen\theta_i$, en donde $k=\omega/c$ siendo ce la velocidad del sonido, la superficie del mar ya no se considera horizontal y debe tenerse en cuenta la modificación del campo acústico debido al fenómeno de dispersión. Se ha utilizado un factor específico que cuantifica la porción de sonido reflejado de modo coherente en la dirección especular cuando existe dispersión [11].

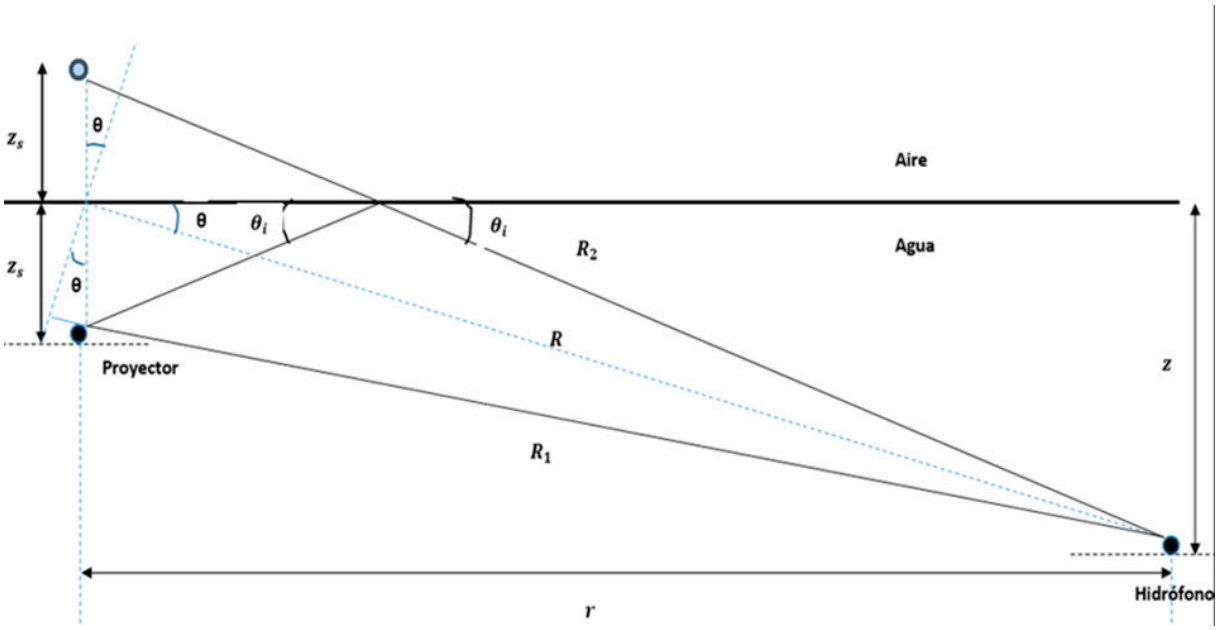


Figura 1. Trayectorias acústicas en el canal submarino con velocidad del sonido constante.

2.3. Absorción de potencia acústica por el agua del mar

La absorción de la energía acústica bajo el agua se incrementa con el cuadrado de la frecuencia. El coeficiente de absorción que mide este fenómeno, expresado en dB/km, se toma de [11].

2.4. Dimensión del proyector

Se considera puntual y que genera una señal acústica que incide sobre la superficie en forma de ondas prácticamente esféricas. Para que esta suposición sea válida debe cumplirse la relación z_S≫(a ^2/c)·f, siendo a el radio de una fuente esférica ideal [9].

2.5. Determinación de los parámetros de las trayectorias

Una vez determinadas las ubicaciones de los dos transductores en el canal, con los datos de sus cotas respectivas, z_s y z, así como la distancia horizontal de separación entre ellos, es preciso calcular los parámetros de las trayectorias reales correspondientes a los recorridos R_1 y R_2 y de la fig. 1. En los textos sobre acústica submarina [10,12], se aborda el problema partiendo de una geometría como la planteada en dicha figura, trayectorias rectas convergentes en el receptor que se aproximan cuando $z,z_s \ll r$ por dos rectas paralelas para calcular la diferencia de camino recorrido por el sonido. Es el clásico problema de la fuente imagen, con un modelo del campo acústico basado en el caso ideal de c constante y superficie horizontal con $h=0$.

En este artículo se presenta un tratamiento algo más realista que tiene en cuenta el gradiente de la velocidad del sonido con la profundidad; en este caso el sonido no se propaga en líneas rectas y debe recurrirse al cálculo de trayectorias del modelo de propagación por rayos o de acústica geométrica [10,11,12,13]. Las expresiones analíticas de este modelo relacionan la profundidad y el alcance horizontal con el ángulo de la trayectoria en cada punto. En la fig. 2 se ilustran las diferentes curvaturas de las trayectorias reales del sonido, en función del signo del gradiente de la velocidad de este, c, con la profundidad. Se ha exagerado dicha curvatura para facilitar su visualización.

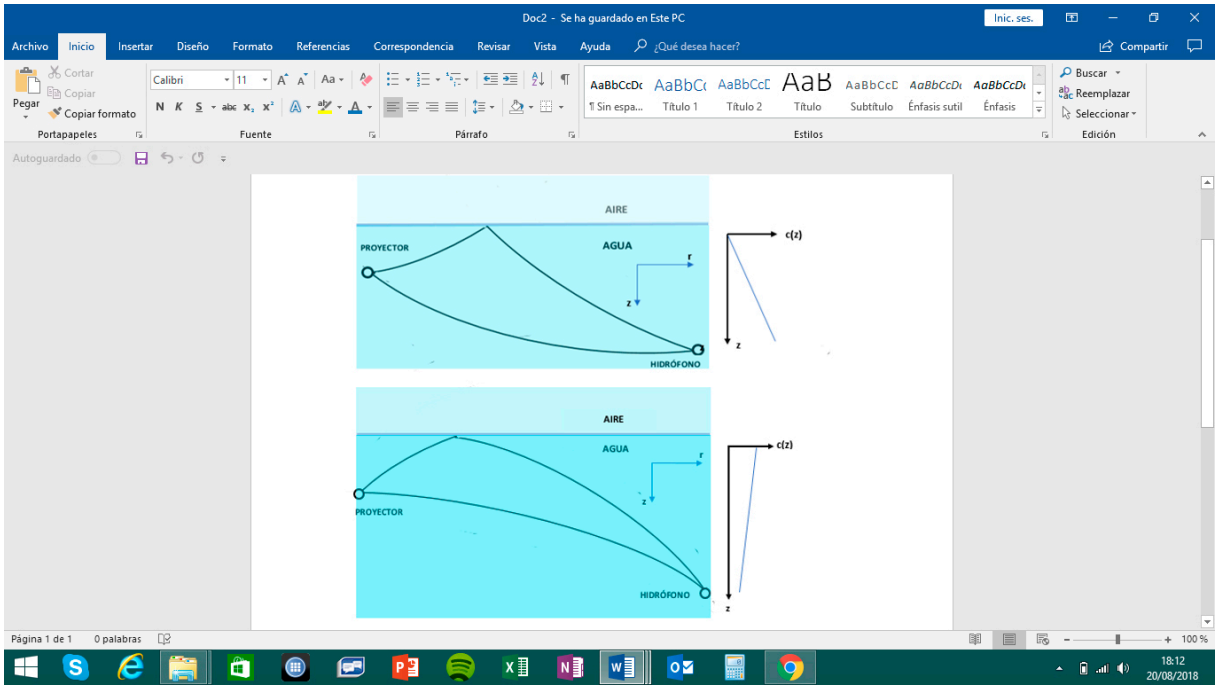


Figura 2. Trayectorias acústicas realistas dentro del canal. Parte superior, gradiente positivo de la velocidad con la profundidad. Parte inferior, gradiente negativo.

En concreto, para la trayectoria correspondiente al recorrido son de aplicación las expresiones siguientes [9,13]:

$$r = -R_0 \cdot \left(sen\theta_{11} - sen\theta_{12} \right) \qquad (1)$$

$$z - z_s = -R_0 \cdot \left(\cos\theta_{12} - \cos\theta_{11} \right) \qquad (2)$$

$$R_1 = -R_0 \cdot \left(\theta_{11} - \theta_{12} \right) \qquad (3)$$

En donde θ_{11} es el ángulo descendente de salida para el rayo de sonido que desde el proyector llegará directamente hasta el receptor. El ángulo θ_{12} es el ángulo de llegada al hidrófono de este mismo rayo. r es el alcance horizontal entre ambos transductores y $(z\text{-}z_1)$ es la diferencia entre la cota del hidrófono y la cota del proyector. El parámetro R_1 representa la longitud del arco de circunferencia recorrido por el sonido en su trayectoria real. R_u es el radio de curvatura de dicha trayectoria, dado por la expresión aproximada $R_0 \approx -c_0/g$. El parámetro g representa el gradiente de la velocidad del sonido (g>0 si c aumenta con la profundidad, g<0 si c disminuye con la profundidad). c_0 es la velocidad del sonido en un punto de referencia para la trayectoria (normalmente el punto inicial) y θ_0 es el ángulo de la trayectoria en ese mismo punto. Se ha optado por aproximar el coseno de este ángulo por la unidad ya que la dimensión horizontal del canal será en cualquier caso de mucha mayor magnitud que su dimensión vertical y los ángulos implicados tendrán valores muy pequeños. Para la trayectoria denominada R_2 se utilizan expresiones similares, solo que ahora se precisan 3 ecuaciones para el trayecto ascendente desde la fuente

a la superficie y otras 3 para el trayecto descendente desde la superficie hasta el hidrófono receptor. La longitud de la trayectoria R_2 viene dada por la suma de las longitudes de estas dos trayectorias.

En total se contabilizan 10 ecuaciones con 12 incógnitas. El sistema de ecuaciones a resolver se completa con la expresión $r=r_a+r_b$ para el alcance horizontal de la trayectoria con reflexión en el mar y con la igualdad $\theta_{inc}=\theta_{refl}=\theta_i$ entre los ángulos de incidencia y de reflexión en el toque del sonido con la superficie (ver fig. 1). Es preciso resolver el sistema de ecuaciones para determinar los parámetros geométricos de las trayectorias del sonido. En la referencia [9] se presenta el sistema de ecuaciones completo, el procedimiento seguido para su solución, las soluciones obtenidas, así como las expresiones analíticas para las dos ondas armónicas que se superponen en el receptor [9,10,11,12].

3. Metodología del análisis realizado

El análisis se hizo por medio de simulación numérica de las soluciones citadas anteriormente. La magnitud dependiente que se analiza es la función de transferencia del canal, esto es, la evolución del módulo del campo de presión acústica en el hidrófono, con la frecuencia como variable independiente. Como es habitual en acústica submarina, la función de transferencia se presenta en dB.

Primera parte: proyector individual.

1. Se establece como referencia para la caracterización del canal el módulo de la función de transferencia en frecuencia $|H_{ref}(f)|$, calculada entre las posiciones respectivas del proyector y del receptor, pero sin tener en cuenta la influencia de la superficie del mar. La función queda definida para el rango espectral $W=[f_{min}, f_{max}]$.
2. Se obtiene la función $|H(f,z_s,z,r)|$ que determina la respuesta en frecuencia del canal para el escenario acústico real, con la superficie de separación agua-aire incluida.
3. Se construye la función $G(f,z_s,z,r)=|H(f,z_s,z,r)|/|H_{ref}(f)|$ evaluada para cada valor de la frecuencia de la señal acústica.
4. Se aplica el siguiente filtro digital a la función anterior

$$B(f)=\begin{cases}1, & \text{si } 0.95\le G(f)\le 1.05\\ 0, & \text{si } G(f)<0.95 \text{ ó } G(f)>1.05\end{cases}$$

5. Se define la siguiente función de coste como medida de la suavidad de la respuesta en frecuencia del canal, en donde los valores son valores enteros de frecuencia equiespaciados y pertenecientes al intervalo espectral W.

$$G_0(z_s,z,r)=\sum_{f_i=f_{min}}^{f_{max}} B[G(f_i,z_s,z,r)] \quad (13)$$

6. Se fijan como parámetros las magnitudes z y r y se establece como variable independiente de representación gráfica para la función

$$G_{0dB}(z_s)=20\cdot\log_{10}\left(G_0(z_s,z,r)\right) \quad (14)$$

Segunda parte: *array* de 4 proyectores.

7. Se construye un *array* proyector de 4 elementos que emite la misma potencia acústica total que el elemento proyector único considerado en la primera parte. La posición del *array* queda determinada por la cota de profundidad de su elemento más cercano a la superficie z_s, a partir del cual se sitúan los restantes 3 proyectores, separados por una profundidad fija d entre elementos contiguos.
8. Se reproducen los pasos 1 a 6 enumerados para la primera parte.

4. Resultados y discusión

Como ejemplo de aplicación se presentan los resultados obtenidos para la modificación de la respuesta en frecuencia del canal submarino cuando el conjunto de los parámetros físicos determinantes de la transmisión de la señal acústica toma los siguientes valores: Alcance horizontal: r=2,5 km. Profundidad del hidrófono receptor: 25 m. Altura de las olas en superficie h_{rms}=0,1 m. Se distinguirá entre el caso I, con un gradiente de variación de la velocidad del sonido g=0,017 s^{-1}, típico de una columna de agua isoterma por debajo de la superficie y el caso II, con un gradiente negativo g=-0,05 s^{-1}, que aparece cuando el agua se enfría al aumentar la profundidad desde la superficie. En la fig. 3 se muestran las curvas correspondientes a G_{dB} para los casos analizados numéricamente. La variable en el eje de abscisas es la profundidad de fuente. Para cada uno de los casos se ha supuesto un proyector individual, y también un *array* de proyectores de 4 elementos separados por distancias d=0,1 m, 0,15 m y 0,25 m; por tanto, se tienen 4 curvas para cada uno de los casos. El valor de la profundidad de fuente para el que la curva se hace máxima representa el mayor grado de suavización de la respuesta en frecuencia del canal, según lo comentado en el punto 3. En los dos casos analizados, la mayor suavización conseguida corresponde a la profundidad de fuente $z_S = 28\,m$ para un *array* proyector formado por 4 elementos equidistantes 0,25 m entre sí. Una vez determinada la profundidad óptima para el proyector, se procede a calcular la función de transferencia del canal determinado por el conjunto de parámetros seleccionados y se la representa en función de la frecuencia de trabajo.

En la fig. 4 se muestran los resultados obtenidos. En las gráficas de la izquierda, a) y c), la respuesta en frecuencia para los proyectores aislados y en las de la derecha, b) y d) para los *arrays* de 4 elementos. La curva anaranjada es la respuesta en frecuencia del medio ideal ilimitado, sin tener en cuenta la superficie. Como se puede apreciar, en ambos casos se ha ajustado la respuesta en frecuencia original, correspondiente a un campo de interferencias muy abrupto, que se produce cuando se utiliza un solo proyector, a una respuesta muy similar a la ideal, existente en ausencia de la superficie de separación entre medios acústicos diferentes. El medio para conseguirlo ha sido el empleo de un pequeño *array* proyector de 4 elementos dispuestos en vertical, con longitud total de 0,75 m, y que emite la misma potencia que el proyector individual de la configuración inicial. Se ha analizado la banda espectral comprendida entre 5 kHz y 20 kHz. El procedimiento es igualmente aplicable para cualquier otra banda de frecuencias que se considere, recordando que cuanto mayor sea la frecuencia, mayores serán las pérdidas de transmisión experimentadas por la señal acústica.

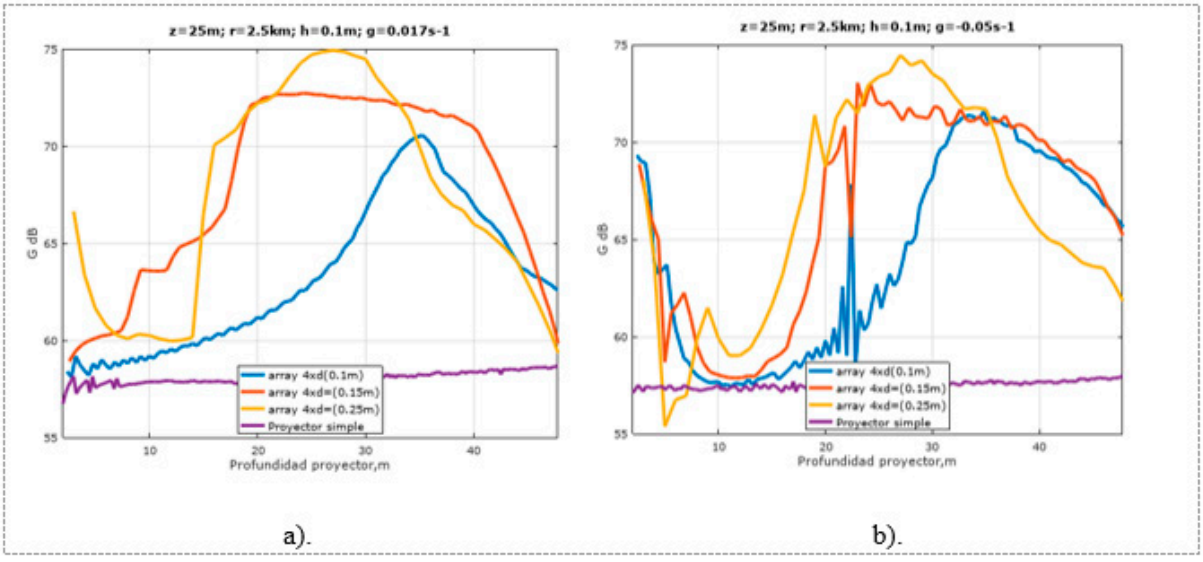


Figura 3. Curvas de la función GdB, creada para la medida de la suavidad de la respuesta en frecuencia del canal submarino. a) Caso I, g=0,017s-1; b) Caso II, g=-0,05s-1.

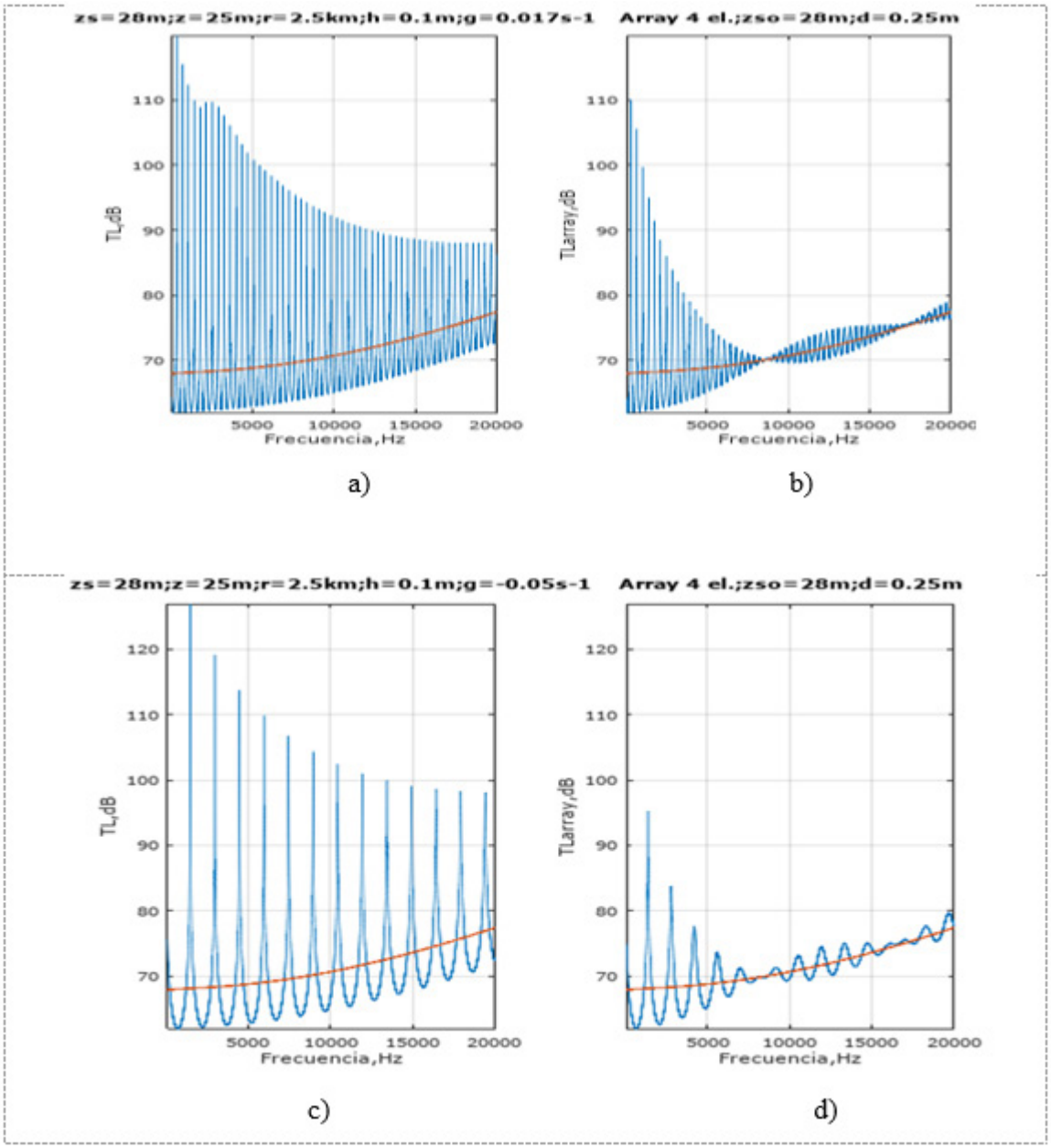


Figura 4. Respuesta en frecuencia, en términos de pérdidas de transmisión acústica, para el canal submarino. a) Proyector individual con g=0,017s-1. b) Array de 4 elementos, d=0,25m, g=0,017s-1. c) Proyector individual con g=-0,05s-1. d) Array de 4 elementos, d=0,25m y g=-0,05s-1. En todos los casos, la curva de color anaranjado representa la respuesta de un canal ilimitado, sin superficie de separación agua-aire.

5. Conclusiones

Se han analizado las dificultades que impone la presencia de la superficie del mar en las comunicaciones entre dos nodos acústicos submarinos poco profundos en un entorno de aguas profundas. Se ha desarrollado un método de medida de la idoneidad de un canal submarino de estas características, en términos de la suavización de su respuesta en frecuencia, con el objetivo de maximizar el ancho de banda disponible para la transmisión acústica. Se ha demostrado cómo la aplicación del método facilita, de un modo muy simple, la elección de la configuración geométrica más adecuada, en función de las condiciones ambientales existentes, para optimizar la respuesta en frecuencia del canal de transmisión. En un trabajo

posterior se ampliará el estudio al caso de un canal de aguas poco profundas, con influencia tanto de la superficie del mar como del fondo marino.

Agradecimientos

El autor desea agradecer expresamente a su empresa, Isdefe, el apoyo y facilidades recibidos para la realización y presentación de este trabajo.

Referencias

1. *Camila M G et al. A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies. Journal of Communication and Information Systems. 2016;31(1):242-55. Disponible en Internet: https://jcis.sbrt.org.br/jcis/article/viewFile/362/300*
2. *Underwater Acoustic Communication Market: Global Forescast until 2023. Reportlinker.com. January 2018. 140 pages. ID: 5297452. Resumen disponible en Internet: https://www.prnewswire.com/news-releases/the-underwater-acoustic-communication market-is-expected-to-grow-from-usd-131-billion-in-2017-to-usd-286-billion-by-2023-at-a cagr-of-138-between-2017-and-2023-300588506.html*
3. *Waite, A D. Sonar for practising engineers. John Wiley & Sons, LTD 2002.*
4. *Lanzagorta, M. Underwater Communications. Synthesis Lectures on Communications. U.S. Naval Research Laboratory. Morgan and Claypool Publishers. October 2012, 129 páginas. Disponible en Internet: https://doi.org/10.2200/S00409ED1V01Y201203COM006*
5. *A new era of digital underwater communications. North Atlantic Treaty Organization. Newsroom. News. 27 Apr. 2017 -Last updated: 27 Apr. 2017 14:50. Disponible en Internet: https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_143247.htm*
6. *Akyildiz, I F, Pompili, D and Melodia, T. Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges. Ad Hoc Networks (Elsevier). 2005;3(3):257-79.*
7. *Demirors, E et al. Software-defined Underwater Acoustic Networks: Toward a High-rate Real-time Reconfigurable Modem. IEEE Communications Magazine. 2015;53(11):64-71.*
8. *Zhou, S and Wang, Z-H. OFDM for Underwater Acoustic Communications. John Wiley and Sons, Inc., 2014.*
9. *Gallego, V. Telecomunicación submarina: Análisis de un canal acústico superficial. Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada. Ministerio de Defensa. 2018;14:27-36.*
10. *Urick, R J. Principles of Underwater Sound. Third Edition. Peninsula Publishing (1983).*
11. *Kinsler, Lawrence E et al. Fundamentals of Acoustics. John Wiley & sons. 4th Edition. 2000.*
12. *Brekhovskikh L M and Lysanov, Yu. P. Fundamentals of Ocean Acoustics. Third Edition. AIP Press. Springer Verlag. 2003.*
13. *Medwin, H. and Clay, C.S.: Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic Press. 1998.*

Valoración de una onda de sobrepresión según la norma MIL-STD-1474E mediante el software AHAAH (*Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans*)

Marco Ortega, Alberto[1,*], Espinosa Gracia, Rafael[2], López Laborda, Alfonso[3] y Muñoz Gámez, Miguel[4]

[1, 2, 3, 4] INSTALAZA S.A., Calle Monreal 27, 50002 Zaragoza, España.

* Correo electrónico: instalaza@instalaza.es (AMO).

Resumen

La publicación en abril de 2015 de la norma MIL-STD-1474E «Design Criteria Standard Noise Limits» [1], que establece los límites de ruido en el diseño de material y elementos de uso en el ámbito militar, modifica el criterio para determinar el número máximo de impulsos sonoros diarios admisibles. La norma marca las pautas para minimizar el riesgo de pérdida de audición debido al uso de cualquier dispositivo, permitir una comunicación inteligible en un entorno ruidoso y minimizar la detección sonora por un enemigo.

La novedad más significativa para evaluar el impulso sonoro sufrido por un usuario en diferentes situaciones es la utilización del *software* AHAAH (Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans), desarrollado por la U.S. Army Research Laboratory. AHAAH es un modelo matemático que simula el comportamiento del oído, calculando el riesgo auditivo al recibir sonido intenso. Para ello, modela los efectos producidos por el sonido mientras viaja por el aire libre, atraviesa las protecciones auditivas y llega al oído interno. AHAAH también incluye los efectos producidos por las contracciones de los músculos del oído intermedio.

AHAAH analiza los efectos producidos por un impulso sonoro (señal de ruido obtenida en un disparo real) en ARU («unidades de riesgo acústico»), los cuáles indican el número de dosis de ruido que un soldado puede recibir diariamente. A su vez, también permite realizar una evaluación mediante el cálculo de la energía contenida en el impulso.

INSTALAZA S.A., teniendo como premisa obligatoria la seguridad del usuario, utiliza el *software* AHAAH en el diseño de sus nuevos productos, prestando especial atención a aquellos sistemas pensados para su empleo en recinto cerrado (*confined space*). El empleo del *software* AHAAH para analizar la señal de ruido junto con los criterios más restrictivos establecidos en la norma permiten evaluar los efectos sobre el tirador.

Palabras clave

Ruido, AHAAH, impulso sonoro, oído, recinto cerrado.

1. Introducción

1.1. Nueva revisión de la norma MIL-STD-1474

En abril de 2015 entró en vigor una nueva revisión (E) de la norma MIL-STD-1474, que especifica el límite de ruido permitido en sistemas de uso militar. La revisión anterior D [2] (febrero de 1997), es menos restrictiva por dos motivos. En primer lugar, no tiene en cuenta el nivel de presión que se genera en un disparo después del pico inicial de sobrepresión. Este hecho es muy importante si tenemos en cuenta el disparo dentro de un recinto cerrado, con numerosos rebotes después del primer pico de sobrepresión. En segundo lugar, la nueva revisión (E) incorpora un modelo que simula el comportamiento del oído ante un impulso (criterio de ARU o *Auditory Risk Unit*), el cual permite analizar con un alto grado de detalle cómo se comporta el oído ante un estímulo externo.

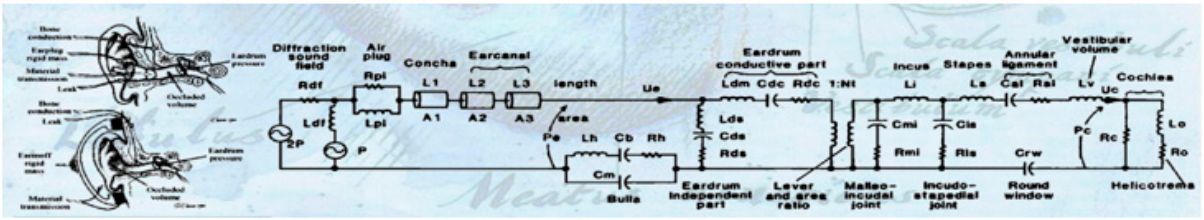


Figura 1. Modelado del oído realizado por el software AHAAH.

INSTALAZA S.A ha adecuado el diseño de sus productos a la nueva revisión de la norma para asegurar su cumplimiento, sobre todo en el desarrollo del sistema C90-CS. Dicho sistema permite ser disparado desde un recinto cerrado, y es fundamental un análisis lo más detallado posible de cómo se va a comportar el oído ante la sobrepresión generada en dicho recinto.

Dentro de dicha norma se contemplan varias situaciones con distintos requisitos de diseño. En el campo de aplicación de los productos desarrollados por INSTALAZA S.A, el apartado de la norma que aplicará es el apéndice B (*Impulsive Noise Requirements For Personnel-Ocuppied Areas*).

1.2. Limitaciones de cálculo de la revisión anterior (D)

El procedimiento de cálculo de la revisión ya obsoleta consistía en evaluar el pico máximo de presión y la duración de dicho pico, sin prestar mayor atención a los niveles de presión anteriores o posteriores. A continuación se explica brevemente un caso de cálculo del número de disparos máximos recomendados para poder ver la ineficacia de dicho método en el análisis de un disparo en recinto cerrado.

En la figura 2 se muestra un registro de presión en la posición del oído del tirador durante un disparo. Con dicho registro se toman dos valores: el pico máximo y la duración de la sobrepresión (*B-duration*).

La duración de la sobrepresión la marcará el último pico que esté por encima de la línea L^+ o por debajo de la línea L^-. La línea L^+ se encuentra 20 dB por debajo del pico máximo, y la línea L^- se colocará simétricamente respecto a la línea de referencia o 0.

Una vez determinados el pico máximo y la duración de la sobrepresión se procede a consultar la gráfica de la figura 3.

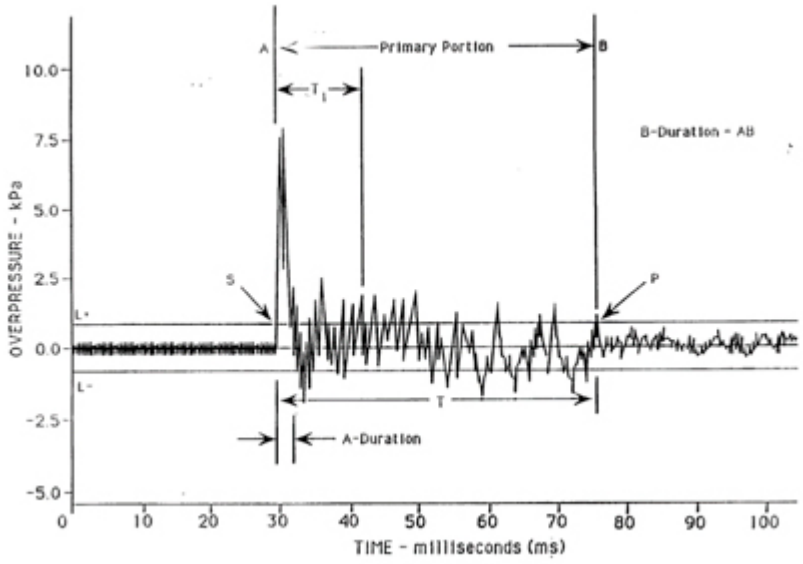


Figura 2. Ejemplo de registro de sobrepresión durante un disparo.

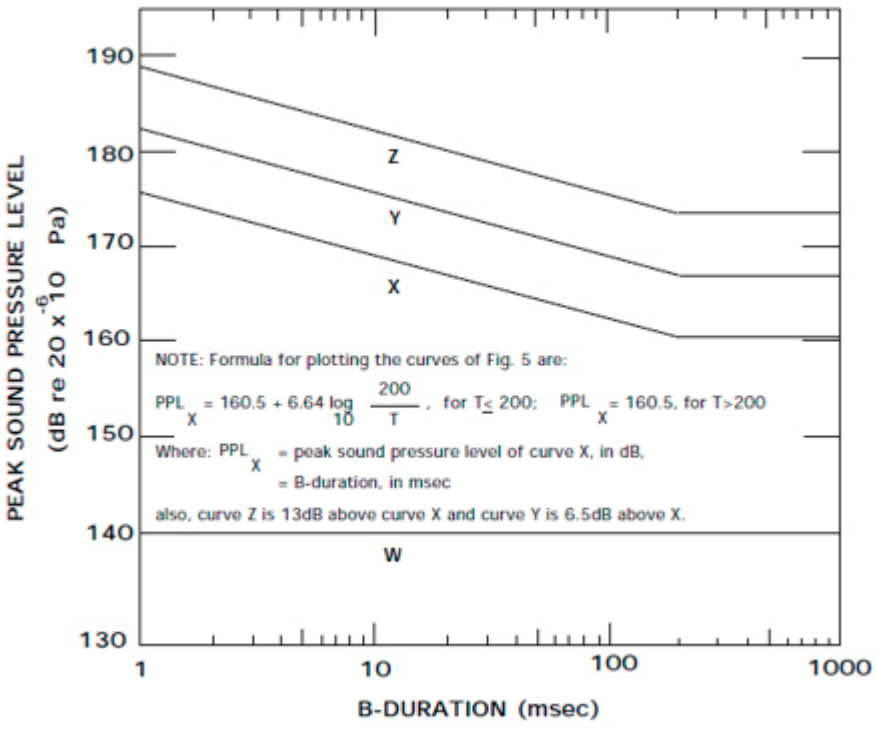


Figura 3. Pico de presión y su duración.

En función del área en la que se encuentre la curva de sobrepresión (W, X, Y o Z), el número máximo de disparos diarios recomendados según el tipo de protección empleada vendrá dado por la siguiente tabla:

Impulse Noise Limit	No Protection	Either Plugs or Muffs	Both Plugs and Muffs
W	----------	Unlimited Exposure	----------
X	0	2000	40000
Y	0	100	2000
Z	0	5	100

Figura 4. Número máximo de disparos diarios recomendados.

Para poder calcular con mayor precisión el número máximo de disparos diarios recomendados empleando protección simple o doble se emplean las siguientes fórmulas:

$$N_1 = 10^x \quad (1)$$

$$N_2 = 20 * N_1 \quad (2)$$

$$x = \frac{1}{5}\left(177 - L + 6{,}64 log_{10}\frac{200}{T}\right) \quad (3)$$

Donde N_1 es el número máximo de disparos diarios recomendados con protección simple, N_2 el número máximo de disparos diarios recomendados con protección doble, L es el pico de presión sonora medido en dB y T es la duración de la sobrepresión o *B-duration*.

Dicha metodología se vuelve ineficiente cuando tenemos un disparo en recinto cerrado, en el cuál hay picos grandes de sobrepresión debidos a los rebotes durante toda la duración de la señal.

2. Nueva revisión (D) de la norma MIL-STD 1474

2.1. Apéndice B: Impulsive noise requirements for personnel-occupied areas

Este apéndice establece las técnicas de medida y el número máximo de disparos diarios recomendados para el caso de impulsos de sobrepresión, como puede ser el caso de un disparo.

Se aplicará siempre que el pico de sobrepresión iguale o supere los 140 dB en áreas ocupadas.

2.2. Procedimiento de medida

En recintos cerrados el arma será probada en la posición teórica de la cabeza del tirador y con las superficies reflectantes que forman parte del entorno.

En las figuras 6 a) y 6 b) se puede ver el procedimiento empleado por INSTALAZA S.A para la captura de registros de presión durante el desarrollo de los sistemas capaces de ser disparados en un recinto cerrado. Para ello, se emplea un recinto de 3 m x 3 m con la puerta situada en las peores condiciones posibles, en el lateral del tirador (figura 7), provocando que la onda de presión que sale del tubo rebote en la parte trasera del recinto.

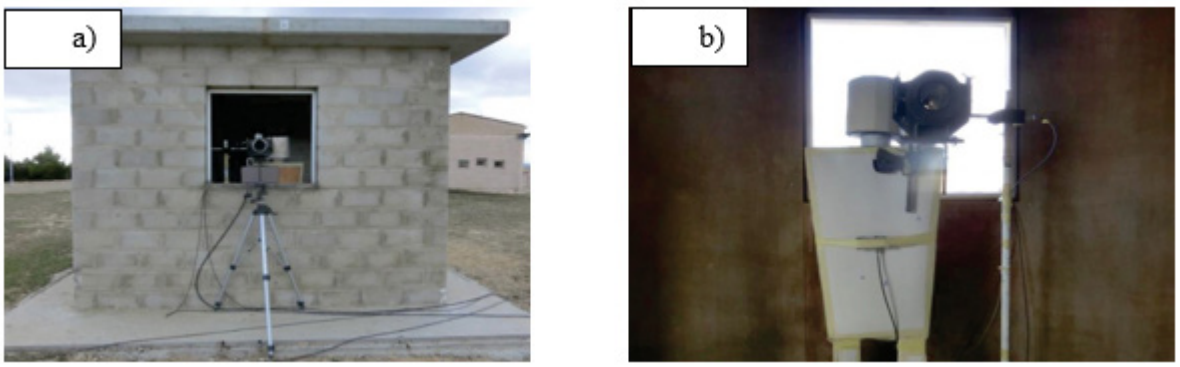


Figura 5. Procedimiento medida seguido por INSTALAZA S. A.

Figura 6. Recinto cerrado 3 m x 3 m empleado por INSTALAZA S. A.

3. Software AHAAH

AHAAH es un *software* que permite evaluar el riesgo acústico ante un impulso sonoro. Para ello, modela los efectos de la onda de presión sonora desde el espacio abierto en las inmediaciones del oído del tirador, pasando a través de las protecciones auditivas, el oído intermedio y llegando al oído interno, que es donde podría ocurrir el daño. AHAAH incluye el efecto de las contracciones que producen los músculos del oído intermedio, pudiendo elegir si la exposición al ruido se sufre de manera advertida o inadvertida. Además, permite incorporar al cálculo las condiciones donde no hay protección, hay un solo tipo de protección (*plug* o *muff*) o hay protección doble (*plug* y *muff*).

AHAAH permite calcular el número máximo de disparos diarios recomendados según los dos criterios que marca la norma MIL-STD-1474E: el criterio de ARU (*Auditory Risk Unit*) y el criterio de energía promediada en una onda o $L_{IAeq100ms}$.

3.1. Criterio de ARU (Auditory Risk Unit)

El ratio de riesgo para un impulso sonoro ocasional dentro de una ventana de 24 horas no deberá exceder los 500 ARU calculados mediante AHAAH. Para exposiciones que ocurren dos o más veces por semana, el límite se baja a 200 ARU en un periodo de 24 horas.

El número máximo de disparos diarios recomendados se calcula dividiendo el límite diario de ARU (200 sería el caso más desfavorable) entre el riesgo acústico dado por AHAAH para un impulso. Por ejemplo, para un disparo en el que se haya calculado un ratio de peligro de 10 ARU, el número máximo de exposiciones diarias permitidas sería de 20.

Para este criterio, AHAAH tiene en cuenta el estado de los músculos del oído intermedio en el momento que llega el impulso. Dichos músculos se pueden contraer por dos motivos:

1) La presencia de un ruido superior a 134 dB.
2) El cerebro es consciente que va a recibir un sonido intenso y contrae los músculos antes de que llegue la onda de presión.

El tirador sabe que va a efectuar el disparo, por lo que normalmente se encontraría en la situación 2. Sin embargo, el peor caso a considerar es el caso 1, en el que los músculos están relajados cuando llega la onda de presión y la energía que atraviesa el oído intermedio es mayor.

Considerando este criterio, el tiempo entre la llegada de la onda de presión y el comienzo de la contracción de los músculos del oído intermedio (aproximadamente 9 ms) es vital, teniendo los picos de sobrepresión en estos primeros intervalos un peso muy importante en el número máximo de disparos diarios recomendados.

En la figura 8 generada por AHAAH la línea en azul claro muestra el estado de los músculos del oído intermedio durante la duración del impulso. Dichos músculos están completamente relajados a la llegada de la onda de presión (5 ms), comienzan a contraerse a los 9 ms de recibir el impulso y están contraídos al 100 % aproximadamente a los 60 ms (línea de máxima presión).

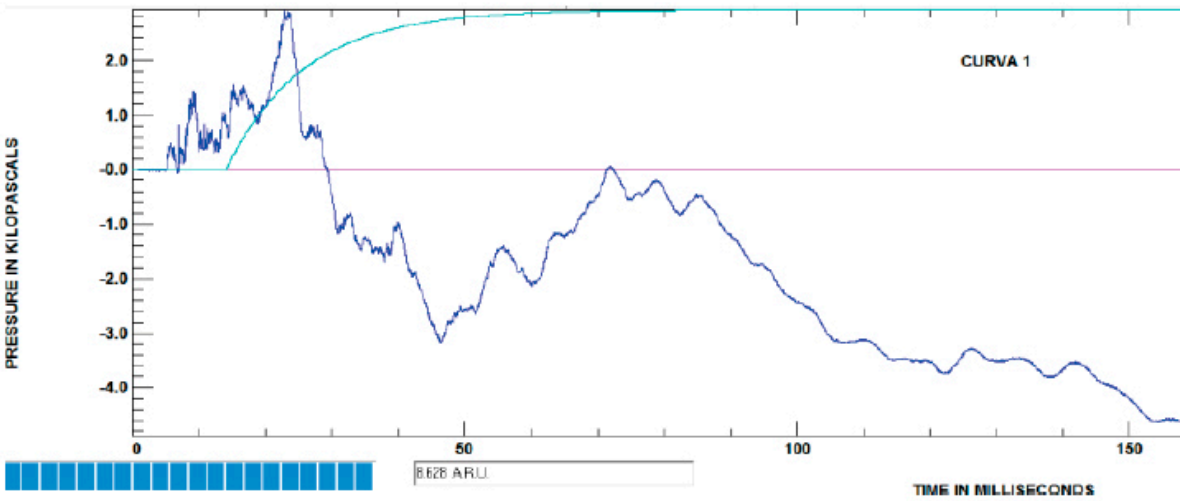


Figura 7. Evolución de los músculos del oído intermedio durante un impulso

En resumen, AHAAH analiza el impulso sonoro registrado, transformándolo mediante funciones de transferencia en desplazamientos de la membrana basilar (D) y dando el valor del riesgo acústico en ARU.

$$ARU=f(D^2) \qquad (4)$$

3.2. Criterio de energía promediada durante 100 ms $L_{Aeq100ms}$

Este criterio es un método que analiza la energía total equivalente del impulso en un periodo de 100 ms. Consiste en una variación del método L_{eq8} empleado para establecer el potencial de daño acústico debido a una exposición a un ruido continuo. El cálculo se realiza analizando los primeros 100 ms de la curva de ruido. Sin embargo, este tiempo se puede ajustar para asegurar que se captura el total del impulso.

No es necesario ningún programa para poder calcular el número máximo de disparos diarios recomendados. Sin embargo, dado que las ecuaciones son bastante complejas, AHAAH está programado para hacerlo automáticamente.

El impulso recibido durante un periodo de 24 horas no debe exceder el valor del 100 % calculado mediante la siguiente ecuación:

$$Impulso\ recibido = D_I(\%) = \frac{100}{2^{\frac{(85-L_{IAeq8hr})}{3}}} \quad (5)$$

El número máximo de disparos diarios recomendados vendrá dado por la siguiente ecuación:

$$N\acute{u}mero\ m\acute{a}ximo\ de\ disparos\ diarios\ permitidos = \frac{100}{D_I(\%)} \quad (6)$$

3.3. Comparativa entre ambos criterios

Tabla 1. Comparativa entre criterio ARU y $L_{IAeq100ms}$

ARU	**$L_{IAeq100ms}$**
Es necesario el *software* AHAAH para poder calcularlo.	No es necesario emplear AHAAH.
Permite analizar qué zonas del impulso son las que mayor contribución tienen al número de ARU. Para ello, hay que fijarse en las zonas antes de que se contraigan los músculos del oído.	Calcula la energía equivalente promediada durante los primeros 100 ms.
El intervalo más importante son los primeros ms cuando los músculos del oído intermedio están relajados.	La señal completa es importante durante los 100 ms.
Este método ha sido revisado y evaluado. El Instituto Americano de Ciencias Biológicas apoya este método, aunque recomienda hacer investigaciones en algunos puntos (especialmente en la influencia de las reflexiones en el oído medio). Mientras tanto, un método basado en el criterio de L_{Aeq8} se puede usar como medida interina.	Este método no ha sido evaluado de momento. Sin embargo, está basado en el método L_{Aeq8} empleado por muchos países de la Unión Europea para calcular el daño acústico por impulsos sonoros. Además, ha sido aceptado por el Instituto Americano de Ciencias Biológicas como medida interina hasta que se termine de investigar en el modelo de AHAAH.

3.4. Aplicación a los productos de INSTALAZA S.A.

INSTALAZA S.A ha adecuado sus procesos de I+D para adaptarse a la nueva normativa y desarrollar sus productos conforme a esta nueva revisión. Dicha revisión es de vital importancia a la hora de diseñar productos que estén pensados para poder dispararse desde un recinto cerrado, como es el caso del sistema C90-CS.

En primer lugar, INSTALAZA S.A ha elaborado un procedimiento de cálculo [3] basado en las instrucciones del *software* AHAAH [4] para establecer una metodología de trabajo que asegure siempre un correcto análisis de los impulsos de presión.

En el apartado 1.2 se ha realizado una estimación del número máximo de disparos diarios recomendados que marcaría la revisión anterior (D) para un impulso sonoro de un sistema C90-CS, disparado con doble protección acústica en el interior de un recinto cerrado de 3 m x 3 m.

El número de disparos obtenidos era de 9. Sin embargo, empleando el *software* AHAAH los resultados son distintos.

Con el criterio de ARU el número máximo de disparos diarios recomendados es de 6 y con el criterio de energía promediada en 100 ms es de 3. Esto tiene sentido, ya que para calcular el máximo de disparos con el criterio de ARU, AHAAH considera muy importantes los primeros instantes de la señal debido a que después los músculos del oído intermedio se encuentran contraídos. Sin embargo, el criterio de energía promediada en 100 ms da el mismo peso a toda la señal, teniendo en cuenta todos los rebotes que se producen en el recinto cerrado.

Como se puede ver, al actualizar la norma y considerar la nueva revisión en el proceso de diseño el número máximo de disparos diarios recomendados en un recinto cerrado en las peores condiciones (puerta en el lateral) ha pasado de 9 a 3.

Hay que destacar que estos valores de número máximo de disparos diarios recomendados han sido los más restrictivos que se han registrado a lo largo de una muestra de 20 disparos. Dichos valores se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 2. Número máximo de disparos diarios recomendados para el sistema C90-CS

Revisión D	Revisión E (ARU advertido)	Revisión E (ARU inadvertido)	Revisión E ($L_{IAeq100ms}$)
9	29	6	3

En todo el proceso de diseño se ha tenido en cuenta que este número de disparos siempre se mantenga por encima de 1, que es lo que le otorga la posibilidad de ser disparado en un recinto cerrado en las peores condiciones posibles sin dañar la capacidad auditiva del tirador.

4. Resultados y discusión

En el presente artículo se ha presentado la norma MIL-STD-1474E que establece los límites de ruido para equipos militares, con el objetivo de minimizar el riesgo de pérdida de audición debido al uso de cualquier dispositivo, permitir una comunicación inteligible en un entorno ruidoso y minimizar la detección sonora por un enemigo.

La nueva revisión de la norma que entró en vigor en 2015 muestra unos avances notables en cuanto al análisis de los efectos de un impulso sonoro en la capacidad auditiva, mediante un *software* (AHAAH) que es capaz de simular el comportamiento del oído humano.

INSTALAZA S.A. ha adaptado sus procesos de diseño para hacer frente a la nueva revisión de la norma y asegurar su cumplimiento. Dicha revisión ha resultado muy importante en el desarrollo del sistema C90-CS, ya que el análisis de la sobrepresión en el interior de un recinto cerrado en las peores condiciones es vital para determinar la usabilidad del sistema.

5. Conclusiones

Se han realizado numerosos estudios para evaluar el comportamiento del *software* AHAAH respecto a otros procedimientos de medida [5], llegando a la conclusión de que el *software* es mucho más preciso para hacer un análisis de riesgo acústico que los métodos empleados por la revisión MIL-STD-1474D.

INSTALAZA S.A, en su esfuerzo continuo en I+D+i, ha evolucionado en su procedimiento de investigación para adaptarse a las nuevas revisiones de las normas que marcan los requisitos de diseño. De esta forma, ofrece en el mercado productos competitivos, que satisfacen las necesidades del cliente y cumplen todos estos requisitos para asegurar su correcto funcionamiento y su seguridad, como es el caso del sistema C90-CS.

Referencias

1. *MIL-STD-1474E Design criteria standard noise limits, Department of Defense, United States of America.*
2. *MIL-STD-1474D Design criteria standard noise limits, Department of Defense, United States of America.*
3. *López A, Espinosa R, Muñoz M, Marco A. Aplicación software AHAAH: Valoración de impulsos sonoros según normativa MIL-STD-1474E. INSTALAZA S.A.*
4. *Using the auditory hazard assessment algorithm. U.S. Army Reseach Laboratory.*
5. *Richard G. Weapon noise exposure of the human ear analyzed with the AHAAH model. U.S. Army Reseach Laboratory.*

Detección remota de la termoclina oceánica con sondadores monohaz

Cordero Ros, Jose Maria[1]

[1] Instituto Hidrográfico de la Marina. Pz. San Severiano 3, 11007 Cádiz, jcorros@fn.mde.es

Resumen

Las ondas electromagnéticas no se propagan adecuadamente en el océano y, en su lugar, la teledetección submarina emplea la energía acústica generada al transformar pulsos eléctricos en ondas de presión.

La velocidad y la dirección de propagación de las ondas acústicas en el medio marino dependen de la temperatura, salinidad y densidad existentes en la columna de agua en el momento de la transmisión. La radiación solar y viento en superficie, cambios de salinidad por evaporación, precipitación y aportes fluviales, así como corrientes de marea y turbulencias en las capas inferiores modifican estas variables oceanográficas. Si estos cambios temporales y espaciales no son conocidos con precisión, la onda sonora será refractada en una dirección diferente a la calculada previamente. Como consecuencia, se inducirán errores en la dirección de detección de blancos submarinos y en el modelado acústico de la topografía marina. Estas condiciones oceanográficas se determinan tomando muestras *in situ* que implican detener el buque, descender sensores y recuperarlos a bordo. En este estudio se presenta un medio alternativo de determinar gradientes de temperatura en la columna de agua por medio de correlaciones con el eco acústico procedente de la microestructura oceánica y biomasa en suspensión empleando sondadores monohaz.

Palabras clave

Sonar, termoclina, acústica submarina, guerra antisubmarina, oceanografía operacional.

1. Introducción

1.1. La importancia de las variables oceanográficas

En teledetección acústica submarina se asume que las variaciones de temperatura, densidad y salinidad únicamente tienen lugar en la columna de agua y que estas se mantienen constantes en el plano horizontal en una escala local. De esta manera, y de acuerdo con las fórmulas empíricas que determinan la velocidad del sonido en el océano [1] y la ley de Snell que describe la refracción, el perfil vertical de velocidad del sonido se computa como una integración de una serie de capas horizontales de gradiente de velocidad constante [2]. Esta es la principal forma para calcular la trayectoria que sigue un rayo acústico dependiendo de su ángulo de proyección desde el transductor hasta el fondo marino y desde allí hasta el receptor.

En levantamientos hidrográficos en mar abierto se toman muestras *in-situ* de temperatura y salinidad de la columna de agua por medios mecánicos al menos cada seis horas, coincidiendo con los máximos cambios de radiación solar en superficie. Este proceso es lento y requiere la participación de varias personas ya que es necesario parar el buque, arriar sensores hasta las inmediaciones del fondo, recuperarlo a bordo y extraer, procesar y cargar los datos obtenidos en los sistemas acústicos de detección. Por otra parte, si no se actualiza el perfil de velocidad de sonido (PVS) con datos precisos, se inducirá un error en el modelado del fondo marino que será proporcional a la incertidumbre en los datos obtenidos. Finalmente, la frecuencia de muestreo se establece como un compromiso entre tiempo empleado en la maniobra y precisión necesaria en el modelo digital del terreno que se genera.

1.2. La termoclina en la plataforma continental

Las plataformas continentales, con profundidades menores a 200 m, forman parte de ecosistemas donde los balances de intercambio de calor entre el mar y la atmósfera, ondas de marea, corrientes oceánicas e influencia de las aportaciones fluviales conforman un espacio donde la temperatura y la salinidad del mar están sometidas a constantes cambios [3]. Particularmente en latitudes templadas y durante los meses de verano, el incremento de radiación solar combinado con una disminución de la intensidad del viento provoca la creación de una capa superior de agua cálida y mezclada por turbulencia de oleaje y marea denominada capa mixta. Debajo de esta, existe una zona de intenso gradiente de temperatura llamada termoclina que mantiene separada la capa mixta de la masa de agua fría que se extiende hasta el fondo. Debido a que la temperatura es el principal factor de control a la velocidad del sonido, la termoclina coincide con la veloclina [2] y en este estudio se emplearán estos dos términos indistintamente. La termoclina actúa como un potente refractor de las ondas sonoras y la determinación de su profundidad es de la máxima importancia tanto en hidrografía como en guerra antisubmarina (ASW).

Por otra parte, la termoclina es una región de máxima concentración de clorofila [4] que conlleva la presencia de vida marina en forma de plancton y necton que son detectables con sondadores hidrográficos ya que producen una clara retro dispersión al ser insonificados.

La profundidad de la termoclina no es constante, sino que varía dependiendo principalmente del equilibrio entre en el intercambio de calor océano-atmósfera y la turbulencia existente en la columna de agua

[5]. Pero además, allí donde existe una interacción de las corrientes de marea con el relieve submarino, pueden generarse ondas internas. Estas son rápidas y pronunciadas oscilaciones de la termoclina de amplitudes del orden de decenas de metros y longitudes de onda de hasta varios kilómetros. Actualmente no existen medios mecánicos de muestreo *in-situ* que permitan capturar adecuadamente las variaciones de la termoclina por efecto de ondas internas [6] por lo que, cuando estos fenómenos tienen lugar, los resultados de la teledetección submarina pueden verse críticamente degradados [7]. Estas situaciones se dan con frecuencia durante los meses de verano en la plataforma noroccidental europea, el golfo de Maine en los EE. UU., la plataforma Patagónica o en el mar de China, por nombrar algunos [3].

1.3. Método alternativo para la detección de la termoclina

En la actualidad, existe una gran variedad de sonares que, dependiendo de su propósito, emplean diferentes tecnologías y configuraciones. No obstante, en la inmensa mayoría de buques existe al menos un sondador monohaz orientado al nadir y que se emplea como ayuda a la navegación calculando la distancia al fondo. Esta misma tecnología, pero modificando los parámetros de transmisión y recepción del pulso acústico, es empleada en los buques científicos para la detección de biomasa, burbujas de gas y cambios en la microestructura oceánica.

2. Objetivo

El objeto de esta investigación es determinar la posibilidad de extraer la profundidad de la termoclina de la señal acústica producida por materia en suspensión en la columna de agua, de manera que sea posible deducir su localización con una resolución espacial y temporal mayor a la que puede lograr con los métodos *in situ* actuales.

3. Desarrollo

La adquisición de datos se hizo a bordo del buque «Celtic Explorer» (Marine Institute, Irlanda) que realizó el mapeo del área central del mar Celta entre el 23 de julio y el 5 de agosto de 2017 dentro del programa INFOMAR. Esta zona es conocida por su riqueza pesquera y por una intensa actividad de ondas internas durante el verano [4]. A bordo se empleó un sondador científico monohaz SIMRAD EK60, transmitiendo simultáneamente en 18,38 y 120 kHz con una longitud de pulso de 1 ms y una PRF de 1 Hz. El plan de trabajo consistió en adquirir la imagen acústica tanto del fondo marino como de la columna de agua a largo de 100 líneas de 30 km de longitud cada una, alineadas E-W y separadas 500 m entre sí sobre profundidades medias de 100 m en las que el relieve del Banco Labadie se levanta hasta sondas de 60 m. El buque navegó a 8 nudos y cada 40 minutos (8 km) se tomaron muestras *in-situ* de velocidad de sonido en la columna de agua con un MVP (*Moving Vessel Profiler*).

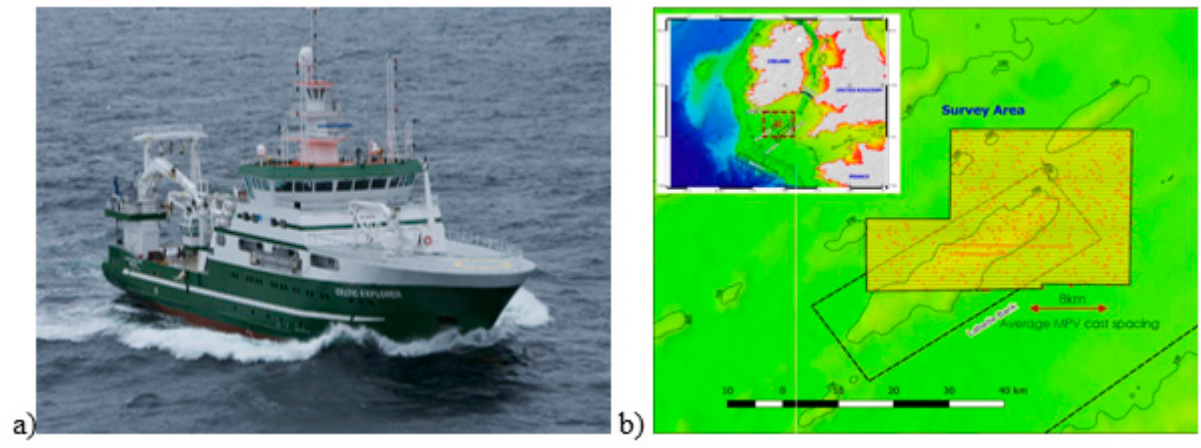


Figura 1. Buque «Celtic Explorer» (izquierda) y zona de sondas en el mar Celta (derecha).

Los echogramas originales fueron convertidos en imágenes de 8 bits en escala de grises y reprojectados en una cuadricula geográfica con pixeles de 20 cm de altura y 10 metros de longitud. Los gráficos de los PVS fueron superpuestos en cada imagen en la posición geográfica donde fueron adquiridos.

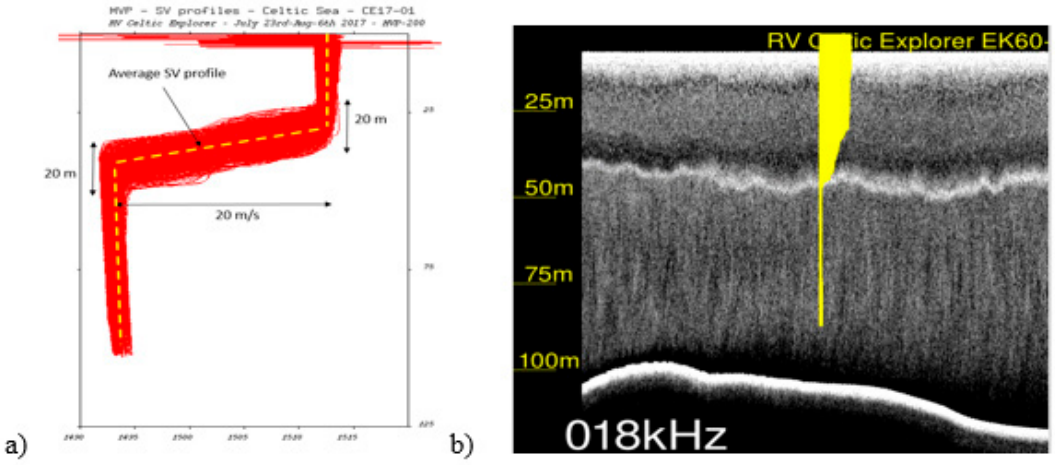


Figura 2. Composición de los PVS donde se aprecian estructuras de velocidad uniformes en 1510 m/s y 1490 m/s y una zona de gradiente negativo correspondiente a la termoclina (izqda.). Imagen de un ecograma de 18 kHz (derecha) en el que destaca una capa de intensa retro dispersión (línea brillante en 45 m) que se correlaciona con la parte inferior de la termoclina. La estructura en color amarillo representa el perfil de velocidad de sonido obtenido en esa localización.

Una primera comparación visual indicaba una fuerte correlación entre la parte inferior de la termoclina obtenida de los PVS con una fluctuante capa de retro dispersión. Esta capa aparecía de forma diferente en cada canal, ya que el eco reflejado depende de la frecuencia de transmisión. No obstante, también se apreciaba una clara aproximación a la superficie durante la noche y un descenso durante el día. Dicha capa no siempre estaba presente, particularmente en periodos de intenso oleaje.

El siguiente paso fue emplear técnicas de procesamiento digital de imágenes para extraer de forma automática y continua la termoclina de las imágenes obtenidas. Se extrajeron las secciones de las imágenes en donde se disponía de PVS y de estas secciones se obtuvo el perfil vertical numérico correspondiente a las intensidades de gris en los pixeles para ser comparadas con los PVS.

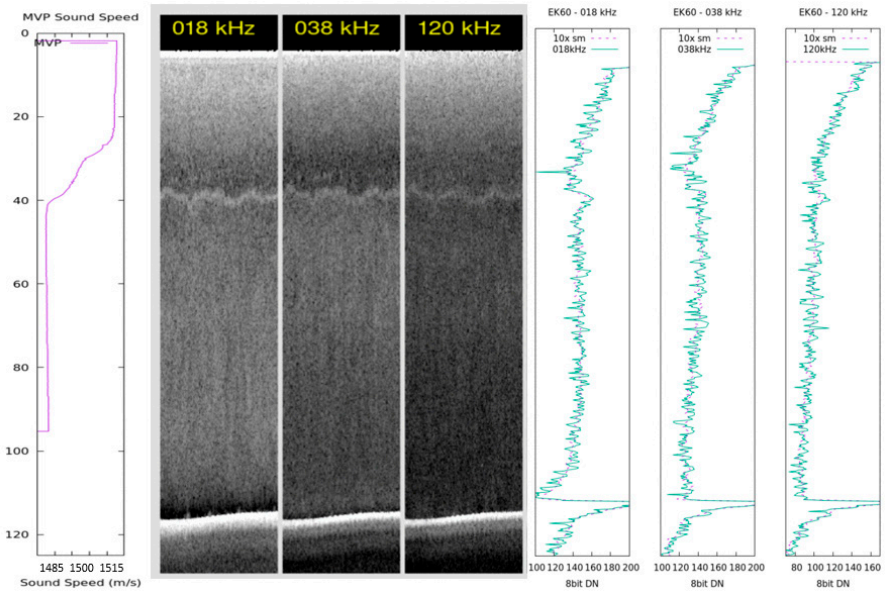


Figura 3. PVS (izqda.), secciones de las imágenes de cada canal correspondientes a la localización del PVS (centro) y sus perfiles numéricos de intensidad de gris (derecha).

En primer lugar fue necesario eliminar el ruido existente en las imágenes. Este procedía de interferencias con otros equipos electrónicos, ruidos inerentes de la maquinaria del buque y a la instrinseca componente estocastica de la retrodispersión. Para ello se aplicaron filtros espaciales de paso bajo que eliminan las señales de alta frecuencia (ruido) promediando pixeles aledaños. Esto se consigue mediante una convolución de la imagen con una máscara de tamaño variable en la que todos los coeficientes son positivos. El resultado final es una imagen ligeramente difuminada en donde la dimensión de la mascara determina la intensidad del difuminado, que no debe llegar a eliminar la señal de interes.

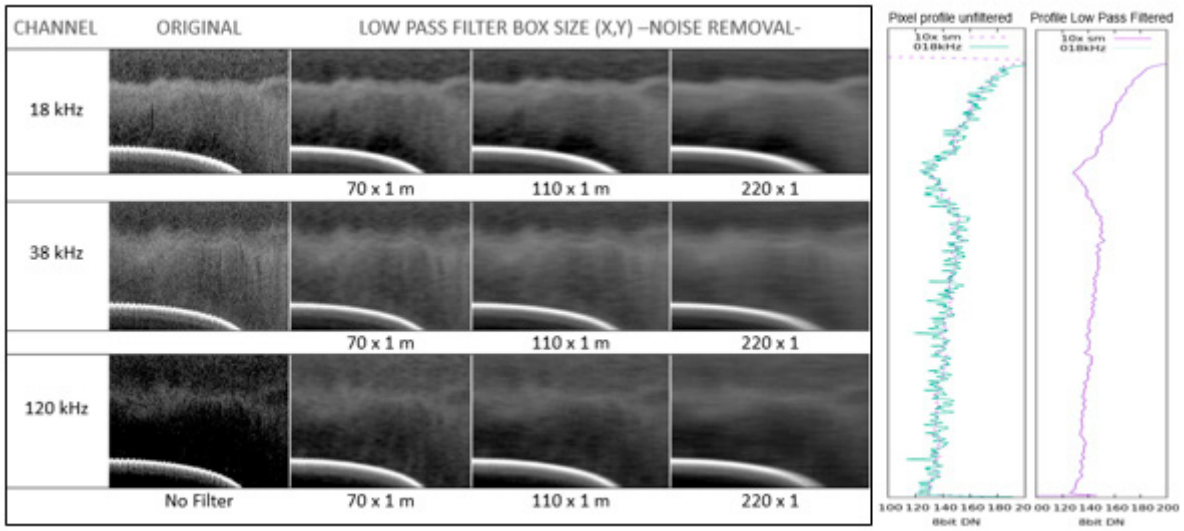


Figura 4. Efectos del filtro de paso bajo con diferentes tamaños de mascara (izqda.) y perfiles de intensidad de gris antes y después de aplicar un filtro de paso de bajo de 110x1 m.

A continuación, y para extraer las zonas de máximo gradiente, se aplicaron sucesivamente filtros espaciales de gradiente vertical y de paso alto. El primero obtiene la primera derivada en cada pixel en la dirección vertical que se corresponde con los bordes de las anomalías encontradas en las imágenes. El filtro de paso alto utiliza una máscara que exagera la intensidad de cada pixel sustrayendo su valor de la media de los otros pixeles a su alrededor, de manera que resalta los bordes de las anomalías detectadas por el filtro de gradiente vertical.

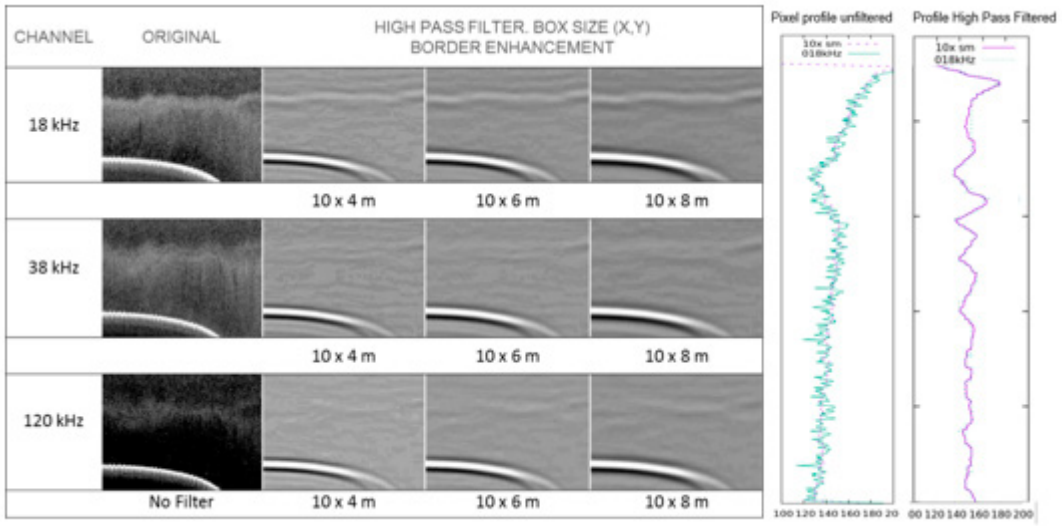


Figura 5. Efectos de los filtros de gradiente vertical y de paso alto en secciones de imágenes (izquierda) y en los perfiles numéricos de intensidad (derecha) con un tamaño de máscara de 10x6 m.

El efecto final de estos filtros fue la presentación gráfica de la profundidad en donde se producían los cambios más rápidos de intensidad de gris en los perfiles de las secciones de las imágenes. Más de 600 combinaciones de tamaños de máscara de filtro se computaron utilizando el *software* Matlab versión 2017a. Para determinar la más efectiva se compararon dichas profundidades con la profundidad de la termoclina extraída de los PVS. Una determinada combinación se consideraba válida cuando conseguía extraer al menos dos profundidades de las imágenes correspondientes a los 3 canales y estas no diferían en más de 2 metros del inferido en los PVS.

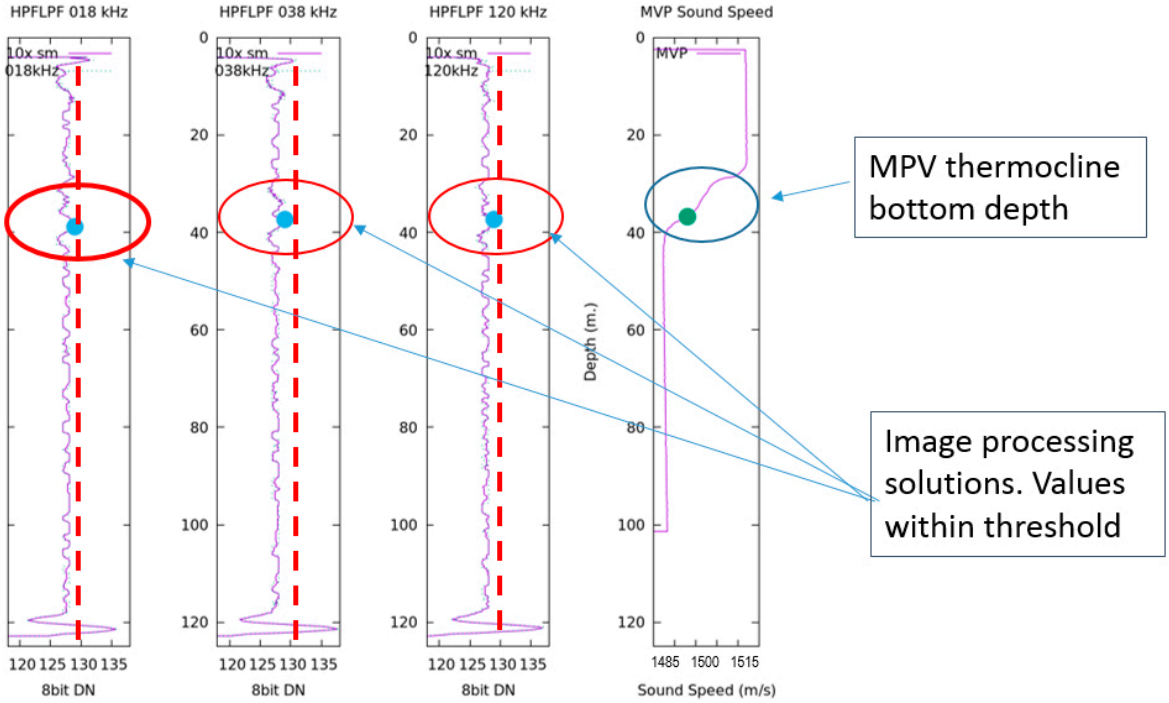


Figura 6. Ejemplo de combinación de tamaño de filtros válida para una determinada localización. Se han obtenido tres profundidades de máximo gradiente de intensidad de píxeles que coinciden con el suelo de la termoclina extraído del PVS.

La mejor combinación se obtuvo tras realizar esta comparación con cada uno de los 500 PVS obtenidos y fue la siguiente:

- Filtro de paso bajo: 31 x 5 pixeles (310 m longitud x 1 m altura).
- Filtro de gradiente vertical: 1 x 11 pixeles 9 (10 m longitud x 2 m altura).
- Filtro de paso alto. 1 x 31 pixeles (10 m longitud x 6 m altura).

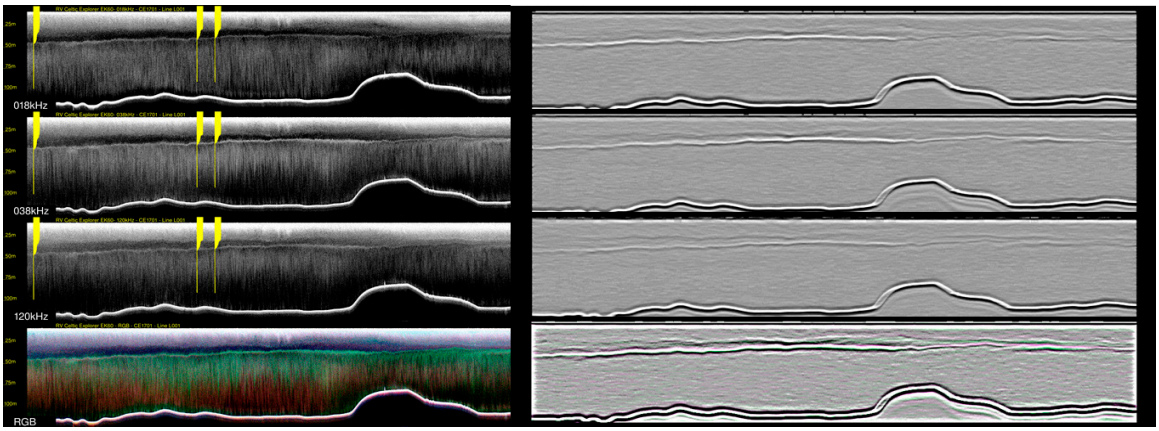


Figura 7. Línea 01. Imágenes de cada canal (18, 38 y 120 kHz) antes del filtrado con PVS superpuestos (izqda.) y las mismas imágenes procesadas con la combinación de tamaño de filtros más exitosa (derecha). Las estructuras horizontales indican una intensa retro dispersión.

El siguiente paso fue extraer de cada imagen los puntos correspondientes al borde inferior de la capa de mayor intensidad de pixel en la columna de agua y suponerlos en una sola imagen por cada línea del proyecto.

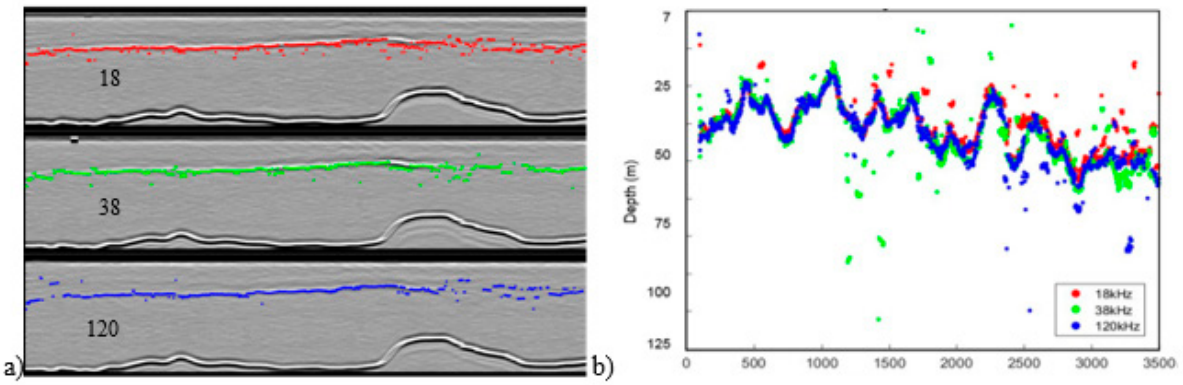


Figura 8. Línea 01. Selección de los puntos de mayor intensidad de píxel en la columna de agua en cada imagen filtrada (izqda.). Superposición de los puntos extraído (derecha).

La nube de puntos bidimensional resultante fue filtrada mediante un filtro Hampel [8] que eliminaba los puntos alejados más de 2 desviaciones estándar en una ventana móvil que abarcaba un 3 % de los datos y eran sustituidos por la mediana de cada ventana. De los valores resultantes por cada canal, se seleccionó el correspondiente al de mayor profundidad. El resultado final fue una estimación de la parte inferior de la termoclina en forma de una línea continua que fue comparada con el suelo real de la termoclina obtenida en las localizaciones en donde se extrajo cada PVS. Dicha línea fue superpuesta a la imagen multicanal combinada RGB para obtener una representación gráfica de la bondad de los resultados.

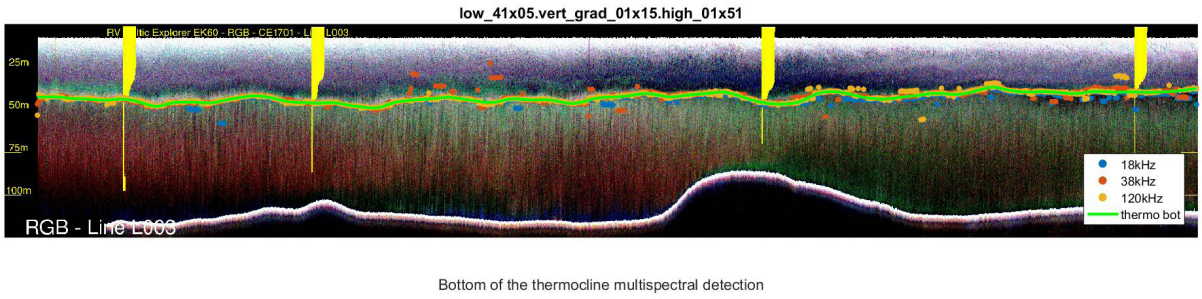


Figura 9. Línea 03. Representación final de la estimación de la termoclina (línea verde), superpuesta a una composición RGB de las imágenes de cada canal antes del filtrado. Los puntos en color azul, rojo y naranja representan las estimaciones individuales en cada frecuencia. Las estructuras verticales en color amarillo indican el PVS extraído en cada localización.

4. Resultados y discusión

De media, el suelo de la termoclina pudo ser estimado el 86 % del tiempo con una precisión de ±5 m con respecto al obtenida con los PVS y asumiendo un error menor al 5 %. Los mejores resultados se obtuvieron durante el día ya que en este periodo se apreció una retro dispersión más intensa en las capas existentes en la misma profundidad que la termoclina. Durante la noche la correlación fue menor ya que se observó con frecuencia que los ecos más intensos procedían desde capas más próximas a la superficie. Esto pudo ser debido a un origen biológico de la retro dispersión y al fenómeno de la migración vertical diurna del zooplancton, que durante la noche asciende en busca de nutrientes y desciende durante el día ocultándose de depredadores. Este supuesto no pudo ser comprobado ya que no se extrajeron muestras

de agua para su análisis. Asimismo, hubo ocasiones en las que no existía ninguna capa de retro dispersión debido a la turbulencia inducida por el oleaje en superficie y por la cizalla vertical de corriente de marea debida a la fricción con el relieve marino. En estas situaciones el algoritmo de detección no pudo resolver ninguna estimación de la termoclina.

5. Conclusiones

Este método permite una potencial detección en tiempo real del suelo de la termoclina mediante el uso de un sondador monohaz. Los resultados fueron satisfactorios bajo ciertas circunstancias, particularmente durante el día y con poca turbulencia en la columna de agua. Durante la noche se obtuvieron mayores diferencias entre las profundidades de las capas de retro dispersión y la profundidad de mayor gradiente de temperatura. Esto permite teorizar que la retro dispersión tuvo un origen biológico que seguía un movimiento de migración vertical diurna.

Referencias

1. *Mackenzie KV. Nine-term equation for sound speed in the oceans. The Journal of the Acoustical Society of America. 1981:807-12.*
2. *Lurton X. An introduction to underwater acoustics: principles and applications. Springer Science & Business Media; 2002.*
3. *Simpson JH y Sharples J. Introduction to the physical and biological oceanography of shelf seas. Cambridge University Press. 2012.*
4. *Sharples J, Moore MC, Rippeth TP, Holligan PM, Hydes DJ, Fisher NR, Simpson JH. Phytoplankton distribution and survival in the thermocline. Limnology and Oceanography. 2001;46(3):486-96.*
5. *Kantha LH y Clayson CA. An improved mixed layer model for geophysical applications. Journal of Geophysical Research: Oceans. 1994;99(C12):25235-66.*
6. *Hughes-Clarke JE. Coherent refraction «noise» in multibeam data due to oceanographic turbulence; 2017.*
7. *Beaudoin J, Calder B, Hiebert J, Imahori G. Estimation of sounding uncertainty from measurements of water mass variability. The International Hydrographic Review. 2009.*
8. *Hampel FR. The influence curve and its role in robust estimation. Journal of the american statistical association. 1974;69(346):383-93.*

Estudio de las capacidades de vigilancia costera mediante el uso de plataformas autónomas colaborativas

Cuevas Esteban, Héctor[1], Blázquez García, Rodrigo[1], Baquero Barneto, Carlos[1] y Burgos García, Mateo[1, *]

[1] Observatorio Horizontes en Defensa y Seguridad ISDEFE-UPM. Av. Complutense, 30. 28040 Madrid. Correos electrónicos: h.cuevase@alumnos.upm.es (HCE), rodrigo.blazquez@upm.es (RBG), c.baquerob@alumnos.upm.es (CBB), mateo@gmr.ssr.upm.es (MBG).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: mateo@gmr.ssr.upm.es (MBG).

Resumen

El observatorio Horizonte en Defensa y Seguridad ISDEFE-UPM tiene abierta una línea de prospectiva tecnológica en el ámbito de las plataformas autónomas y de los sensores embarcados. Actualmente, una de las líneas de investigación de mayor interés es el desarrollo de sistemas basados en la cooperación de múltiples plataformas autónomas para realizar misiones de manera conjunta y coordinada. En esta comunicación, se lleva a cabo un estudio de las capacidades de un sistema de vigilancia costera y salvamento marítimo basado en la cooperación entre plataformas autónomas aéreas y navales. El trabajo realizado se enmarca en el área estratégica de las *Smart Borders* establecida en el programa Horizonte 2020, cuyo objetivo es impulsar el desarrollo de sistemas de vigilancia fronteriza mediante el uso de nuevas tecnologías de sensores y plataformas autónomas. Utilizando los parámetros característicos de sensores ópticos embarcados en plataformas aéreas, se estima su alcance máximo para la detección e identificación de personas y barcos. A su vez, los parámetros técnicos de los transmisores y receptores utilizados para la comunicación entre plataformas permiten determinar el alcance máximo de dichos enlaces teniendo en cuenta modelos de propagación específicos para entornos marítimos. Además, uno de los aspectos más importantes para el desarrollo de estas plataformas cooperativas reside en los sistemas de navegación por satélite (GNSS) e inercial (INS). Por este motivo, se han evaluado las precisiones obtenidas mediante un algoritmo *loosely coupled* de fusión GNSS/INS en entornos simulados con el objetivo de proponer una solución de navegación.

Palabras clave

Arquitectura colaborativa, GNSS, navegación inercial, plataformas autónomas, vigilancia costera.

1. Introducción

Gran parte de los flujos migratorios de entrada en la Unión Europea se producen por vía marítima a través de las rutas del Mediterráneo oriental, central y occidental [1]. De hecho, en los últimos años ha tenido lugar un incremento de las llegadas de inmigrantes irregulares a España siguiendo esta última ruta a través del estrecho de Gibraltar y del mar de Alborán [2]. Además de estos flujos migratorios, la Unión Europea debe hacer frente a las actividades de tráfico de drogas que se producen a través de sus costas. Aunque una de las principales rutas se produce a través de las costas españolas desde Marruecos, están surgiendo también nuevas rutas hacia las costas italianas desde Libia [3].

Por todo ello, la Unión Europea, a través del programa Horizonte 2020 [4], está impulsando el desarrollo de sistemas de vigilancia costera más efectivos para salvamento marítimo y control de actividades irregulares, como tráfico de drogas o inmigración irregular. En concreto, la Unión Europea propone el concepto de *Smart Borders* o fronteras inteligentes basadas en el uso de nuevas soluciones y tecnologías de sensores y plataformas, con el principal objetivo de mejorar las capacidades de los sistemas de vigilancia actuales y reducir su coste. Los retos planteados para estas fronteras inteligentes abarcan todas las actividades relacionadas con: vigilancia de fronteras marítimas, lucha contra el tráfico de drogas, inmigración irregular y operaciones de salvamento marítimo como las tareas de búsqueda y rescate. Así mismo, la acción preparatoria en investigación en defensa [5] propone el uso de vehículos no tripulados en las aplicaciones de defensa aérea, marítima y terrestre como método para garantizar la vigilancia y seguridad de las fronteras europeas.

Entre las líneas actuales de investigación en vehículos autónomos, destaca el desarrollo de sistemas cooperativos compuestos por múltiples plataformas que operan de forma conjunta y coordinada para llevar a cabo una determinada misión. Este es el caso de los enjambres de UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) [6], pero también de sistemas basados en la cooperación de distintos tipos de vehículos autónomos superficiales y aéreos [7].

En este contexto, se propone un sistema de vigilancia costera basado en el uso de plataformas autónomas no tripuladas, tanto aéreas como navales, que permite el control de las costas de una manera más eficiente, mejorando el rendimiento de los equipos de salvamento marítimo y guardia costera. Además, se evaluarán las capacidades de dicho sistema en base a: (1) alcance máximo de los enlaces de comunicaciones entre las plataformas, (2) alcance máximo de las cámaras embarcadas para detectar a personas y barcos, (3) precisión de los sistemas de navegación y (4) autonomía del sistema.

2. Arquitectura colaborativa del sistema de vigilancia costera

El sistema que se plantea, representado en la figura 1, se compone de plataformas autónomas aéreas, también conocidas como UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), que trabajarán de forma cooperativa junto con plataformas autónomas de superficie, conocidas por las siglas USV (*Unmanned Surface Vehicle*).

De esta forma, mediante la cooperación entre distintos tipos de plataformas se pretende realizar las tareas de vigilancia y salvamento de una forma más eficiente y económica. Además, el sistema estará controlado desde estaciones base de mando y control situadas en tierra que gestionarán las plataformas autónomas desplegadas a lo largo del litoral.

Las plataformas de superficie, alimentadas por placas solares, realizarán la función de relé de comunicaciones entre los UAV, los USV y la estación base, y soportarán gran parte de la carga computacional del sistema. Además, dichas plataformas marítimas se utilizarán como plataformas de aterrizaje y carga de baterías para los UAV, y como plataformas de salvamento marítimo que pueden aproximarse de forma rápida y segura a las zonas necesarias para socorrer a personas o heridos.

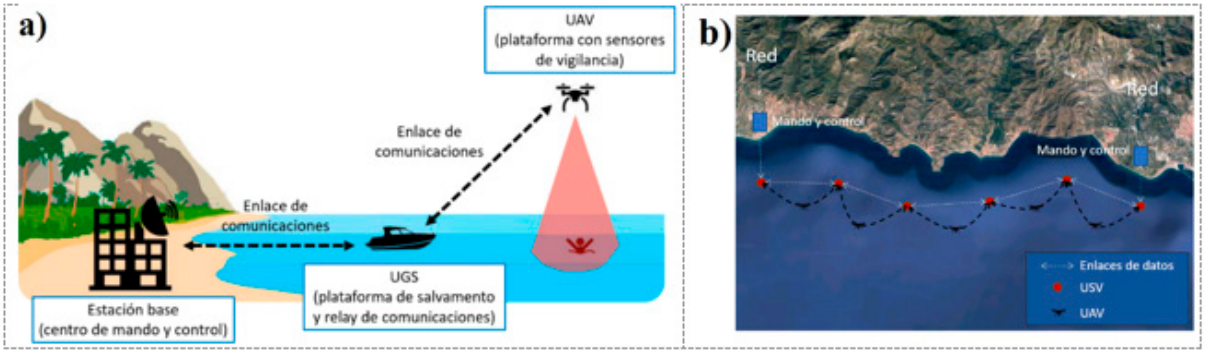


Figura 1. Sistema colaborativo de vigilancia costera basado en plataformas autónomas aéreas y navales: a) Elementos del sistema y b) Despliegue en forma perimetral.

Por otra parte, las plataformas autónomas aéreas, basadas en multirrotores para facilitar su maniobrabilidad y las operaciones de despegue y aterrizaje sobre los USV, explorarán la costa mediante sensores ópticos EO/IR (*Electro-Optical/Infrarred*) en busca de posibles elementos sospechosos. La posición elevada de las plataformas aéreas reduce el problema de los bloqueos de la línea de visión que puede producir el oleaje en sensores embarcados en plataformas superficiales o desplegados en tierra. De esta forma, cuando los UAV localicen un navío o personas en situación de emergencia transmitirán dicha información a la estación base, que decidirá el protocolo de actuación. Los UAV cobran vital importancia en el nuevo escenario propuesto al ser un medio más efectivo, económico y flexible, y con un tiempo de actuación menor que los medios aéreos clásicos.

Mediante el despliegue de estas plataformas a lo largo de la costa se pretende detectar y evaluar las emergencias a las que deben hacer frente los equipos de salvamento marítimo y guardia costera. La mejora de la conciencia situacional permite proporcionar soluciones más eficientes y con un menor tiempo de respuesta, pudiendo distinguir entre aquellas emergencias que requieran el despliegue adicional de vehículos especializados, como helicópteros o barcos de mayor tamaño, y las emergencias de menor índole que puedan ser solventadas por los propios vehículos autónomos.

El sistema planteado, basado en USV y UAV, es escalable y flexible y puede formar un perímetro de seguridad a lo largo de la costa, en el que los UAV vuelan entre plataformas superficiales donde pueden aterrizar y cambiar sus baterías. Además, el sistema propuesto puede integrarse y servir de apoyo a los sensores desplegados actualmente en tierra, como los pertenecientes al Sistema Integrado de Vigilancia Exterior (SIVE) desplegado en las costas españolas. Por ejemplo, las detecciones de blancos obtenidas con los radares terrestres podrían ser confirmadas por los UAV, aproximándose a la zona donde se encuentra el blanco detectado para llevar a cabo su identificación y evaluar la gravedad de la situación de forma rápida.

3. Estudio de las capacidades del sistema

3.1. Análisis de los enlaces de comunicaciones

El alcance máximo de los enlaces de comunicaciones limita la separación entre las plataformas autónomas. Además, debe garantizarse la disponibilidad de dichos enlaces en la situación de multitrayecto que se produce en escenarios marítimos. Por ello, tomando los parámetros de referencia mostrados en la tabla 1, se han analizado los enlaces de comunicaciones USV-estación base y UAV-USV considerando un modelo simple de 2 rayos [8], obteniéndose los resultados representados en la figura 2. A modo de comparación, se representa también el resultado de aplicar el modelo ITU-R P.1546 [9] para el enlace a 2,5 GHz.

Como puede observarse, en ambos enlaces se producen desvanecimientos por efecto multitrayecto, aunque de forma más severa en el enlace UAV-USV debido a la altura de la plataforma aérea. Por este motivo, para garantizar, en la medida de lo posible, la comunicación continua entre los elementos del sistema es necesario aplicar técnicas de mitigación del multitrayecto como diversidad de frecuencia (figura 3a) o diversidad de antena (figura 3b) por selección del canal con la máxima potencia recibida. Sin embargo, en un escenario con mar en calma, en el que la principal componente del multitrayecto se debe a la reflexión producida sobre la superficie del mar, el empleo de diversidad de antena no es efectivo para reducir la profundidad de los mínimos como se observa en la figura 3b. Además, aunque se utilice diversidad de frecuencia, para evitar que se produzcan simultáneamente desvanecimientos en ambos canales es conveniente emplear una adaptación de las frecuencias de transmisión sondeando el canal con pilotos dentro de las bandas de operación.

Por tanto, el alcance máximo de los enlaces USV-estación base es de aproximadamente 6 km, mientras que el de los enlaces UAV-USV es de aproximadamente 3,5 km. Estos valores deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar el despliegue del sistema para garantizar el establecimiento de la red de comunicaciones entre todos los elementos del sistema de vigilancia.

Tabla 2. Parámetros utilizados para el análisis de los enlaces de comunicaciones

Parámetro		**Valor**
Bandas de frecuencia		2,5 GHz y 5,8 GHz
Sensibilidad de los receptores [10]		-80 dBm (para estándar WiMAX 16-QAM 1/2, aprox. 7 Mbps)
Margen adicional		5 dB
UAV	Potencia transmitida	30 dBm
	Ganancia de antena	3 dB
	Altura	100 m
USV	Potencia transmitida	33 dBm
	Ganancia de antena	3 dB
	Altura	3 m
Estación base	Potencia transmitida	33 dBm
	Ganancia de antena	10 dB
	Altura	10 m

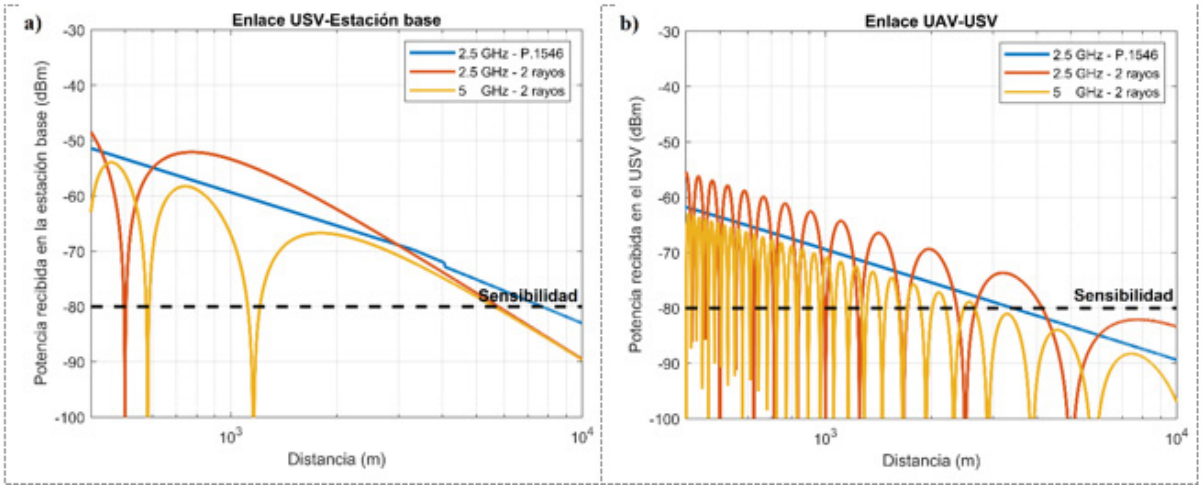


Figura 2. Potencia recibida en función de la distancia de los enlaces: a) Enlace USV-Estación base y b) Enlace UAV-USV.

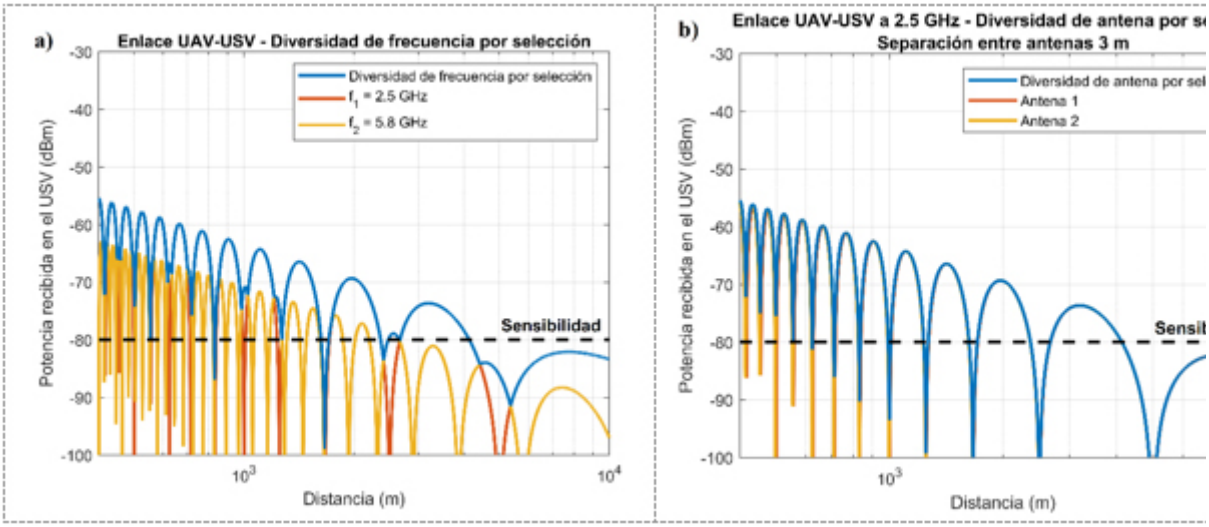


Figura 3. Aplicación de técnicas de mitigación del multitrayecto: a) Diversidad de frecuencia (2,5 y 5,8 GHz) y b) Diversidad de antena (separación entre antenas 3 m).

3.2. Análisis del alcance de detección de las cámaras embarcadas

La detección autónoma de personas o barcos en situación de emergencia se lleva a cabo mediante cámaras de espectro visible e infrarrojo embarcadas en las plataformas autónomas aéreas y el procesado del vídeo capturado [11]. Utilizando el criterio de Johnson [12], se puede estimar el alcance máximo para la detección, reconocimiento e identificación de los blancos con una probabilidad de éxito del 90 % en función del IFOV (*Instantaneous Field of View*) de las cámaras y del tamaño típico de los objetos (0,75 m para personas y 5 m para barcos vistos cenitalmente), obteniéndose los resultados de la figura 4. Tomando como referencia la cámara FLIR Duo R [13], se estiman unos alcances para la detección de personas de 145 m para el sensor de espectro visible y de 20 m para el sensor IR. En general, la menor resolución de los sensores IR hace que presenten menores alcances que los sensores de espectro visible. A su vez, el empleo de cámaras con zoom, como la cámara Zenmuse Z3 [14], permite aumentar el alcance hasta 800 m a costa de disminuir el campo de visión.

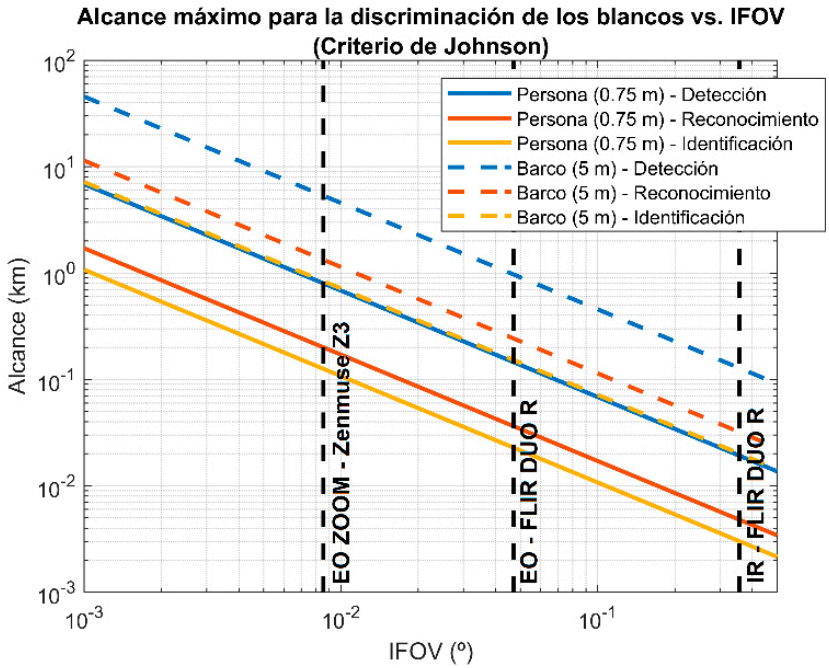


Figura 4. Alcance máximo para la detección, reconocimiento e identificación de los blancos con una probabilidad de éxito del 90 % en función del IFOV de las cámaras.

Los UAV explorarán la zona de interés asignada y en caso de detectar un objeto aplicarán zoom o se aproximarán para llevar a cabo su reconocimiento e identificación. Considerando una altura de vuelo de 100 m, una velocidad típica de 50 km/h y un sensor óptico con 90º de FOV apuntado cenitalmente, cada plataforma aérea en operación cubre aproximadamente un área de 10 km^2 cada hora. El tiempo de revisita dependerá del número de plataformas aéreas desplegadas y de su autonomía. Además, la planificación de las trayectorias de los UAV debe tener en cuenta las recomendaciones relativas a maniobras seguras y a las distancias de seguridad entre plataformas aéreas [15].

3.3. Análisis de los sistemas de navegación

La navegación autónoma de las plataformas y el posicionamiento de los objetos detectados requiere el empleo de sistemas de posicionamiento precisos embarcados en las plataformas. Por este motivo, se propone el uso de algoritmos de fusión GNSS/INS utilizando sensores de navegación por satélite y sensores inerciales. Los sensores inerciales proporcionan medidas de la aceleración y actitud de las plataformas con una elevada velocidad de refresco. Sin embargo, sus medidas presentan sesgos importantes que dan lugar a derivas en la estimación de la posición con el paso del tiempo. Las medidas proporcionadas por los sensores GNSS permiten calibrar dichos sesgos, mejorando la precisión global del sistema de posicionamiento [16]. De esta forma, como se puede observar en la figura 5, en la que se ha simulado una trayectoria típica de un UAV, llevando a cabo la fusión de las medidas de un sensor GPS (*Global Positioning System*) y un sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*) de bajo coste mediante una integración *loosely coupled* [17], se mejora la precisión del posicionamiento hasta 0,5 m. Este resultado es considerablemente mejor que el obtenido mediante el filtrado de Kalman de las medidas del GPS (precisión de 2 m). Sin embargo, aunque se utilice una fusión GNSS/INS, la pérdida de la señal del GPS durante intervalos de tiempo superiores a 5 s (entre 200 y 207 s y entre 412 y 419 s en la simulación) provoca un aumento del error de posicionamiento que haría inviable la navegación autónoma. Para solventar estas situaciones, se han propuesto algoritmos de fusión que tienen en cuenta referencias visuales [18] o el uso de sensores IMU de mejores prestaciones a costa de un mayor coste.

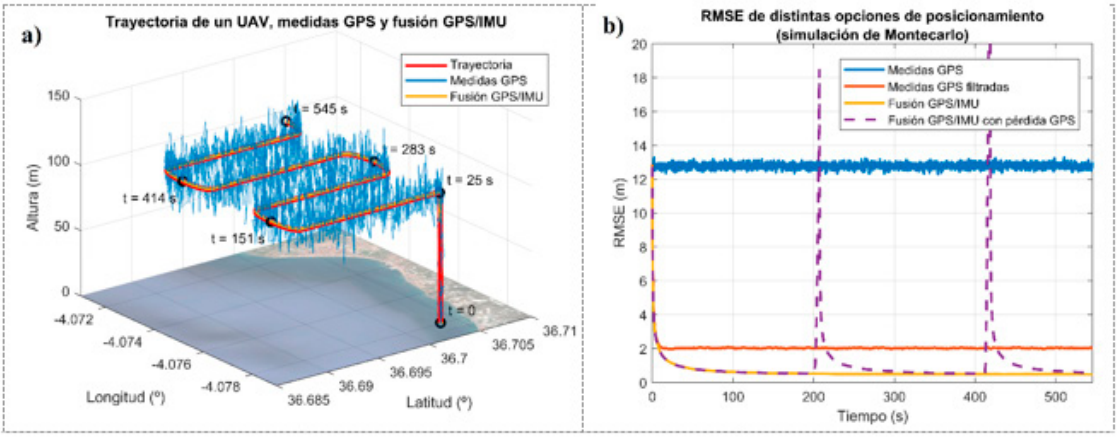


Figura 5. Análisis de los sistemas de posicionamiento: a) Trayectoria seguida por un UAV, medidas del GPS y fusión GPS/IMU y b) RMSE (root mean square error) obtenido.

3.4. Análisis de la autonomía y del dimensionamiento del sistema

Finalmente, es importante llevar a cabo un análisis de la autonomía y del dimensionamiento del sistema para establecer los requisitos de los sistemas de energía de los USV. Teniendo en cuenta los parámetros típicos del escenario mostrados en la figura 6a, se puede determinar el número de UAV necesarios para cubrir el área monitorizada con un cierto tiempo de refresco durante el tiempo de operación de los UAV. Como se representa en la figura 6b, para un tiempo de refresco de 30 minutos se requieren 28 UAV. Para reducir el número de UAV requeridos, sería necesario utilizar sensores que permitan cubrir la zona asignada con una mayor velocidad de exploración. Por este motivo, para superar las limitaciones establecidas por los sensores ópticos, se está investigando el uso de sensores SAR (*synthetic aperture radar*) compactos embarcados en UAV [19].

Durante el tiempo de operación de los UAV, estos vuelan de forma continua explorando la zona asignada y aterrizando en los USV para cambiar su batería. Por tanto, los sistemas de energía de los USV deben proporcionar la potencia necesaria para el funcionamiento de su *payload* y de sus sistemas de propulsión y para la carga de las baterías de los UAV. De esta forma, la figura 6b representa el área necesaria de los paneles solares en cada USV para proporcionar la energía necesaria en función del tiempo de revisita establecido durante la operación de los UAV. Para un tiempo de revisita de 30 minutos se necesitan paneles solares de 7 m^2 en cada USV. Para limitar el tamaño de los paneles solares y solventar los problemas de la variabilidad de la irradiancia solar, se ha propuesto el empleo de fuentes de energía complementarias como la energía eólica o undimotriz [20]. Además, los USV pueden disponer de depósitos de combustible para utilizar en casos excepcionales.

a)

Parámetro	Valor
Franja monitorizada	50 km x 2,5 km
Separación entre USVs	2,5 km
Área cubierta por unidad de tiempo por cada UAV (cámara de espectro visible)	10 km^2/h
Porcentaje de tiempo de vuelo dedicado a maniobras y cambio de baterías de los UAVs	10%
Tiempo de vuelo con batería cargada	30 minutos
Tiempo de carga de batería	80 minutos (@ 100W)
Potencia USV	100 W
Irradiación solar media diaria [21]	5.2 kWh/(m^2·día)
Eficiencia de los paneles solares [22]	15%
Tiempo de operación diario de los UAVs	8 h/día

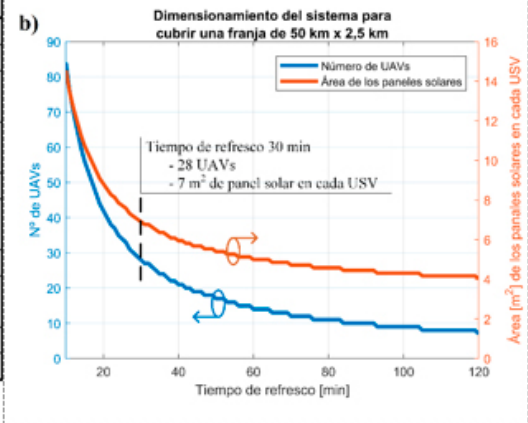


Figura 6. Dimensionamiento del sistema: a) Parámetros típicos del escenario y b) Número de UAV y tamaño de los paneles solares de los USV en función del tiempo de refresco con el que se cubre el área de interés durante el tiempo de operación de los UAV.

4. Conclusiones

En esta comunicación, se ha propuesto un sistema de vigilancia y salvamento marítimo basado en la cooperación entre plataformas autónomas navales y aéreas. Las plataformas aéreas se encargarán de explorar la zona de interés utilizando sensores ópticos para detectar y evaluar posibles situaciones de emergencia, mientras que las plataformas navales podrán proveer una acción temprana para solucionar la emergencia y actuarán como repetidores de comunicaciones con las bases de mando y control y como estaciones de recarga de baterías para los UAV.

Para garantizar la comunicación entre las plataformas es necesario aplicar técnicas de mitigación de multitrayecto como diversidad de frecuencia. Además, para mejorar la precisión de los sistemas de posicionamiento es conveniente aplicar algoritmos de fusión GNSS/INS, aunque el uso de sensores IMU de bajo coste limita el tiempo que puede operar el sistema en ausencia de señal GPS. En general, el uso de sensores ópticos impone una velocidad de exploración reducida, por lo que actualmente se está investigando el uso de otras tecnologías, como los radares SAR, para conseguir menores tiempos de revisita. A pesar de ello, la cooperación entre plataformas autónomas presenta un gran potencial para desarrollar sistemas de vigilancia costera y salvamento marítimo flexibles, eficaces y con menores tiempos de respuesta.

Referencias

1. *European Border and Coast Guard Agency (FRONTEX). Migratory Map [Internet]. [cited 2018 Ago 01]. Available from: https://frontex.europa.eu/along-eu-borders/migratory-map*
2. *United Nations High Commissioner for Refugees. Mediterranean situation [Internet]. [cited 2018 Ago 01]. Available from: https://data2.unhcr.org/en/situations/mediterranean*
3. *International Narcotics Control Board. 2017 Annual Report [Internet]. [cited 2018 Ago 01]. Available from: http://www.incb.org/documents/Publications/AnnualReports/AR2017/AnnualReport/E_2017_AR_ebook.pdf*
4. *European Commission. HORIZON 2020: Secure societies – Protecting freedom and security of Europe and its citizens. H2020 Work Programme 2018 – 2020. 2017.*
5. *European Comission. Comission decision on the financing of the 'Preparatory action on Defence research' and the use of unit costs for the year 2017. 2017.*
6. *Nigam N, Bieniawski S, Kroo I, Vian J. Control of multiple UAVs for persistent surveillance: Algorithm and flight test results. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2012;20(5):1236-1251.*
7. *Dufek J, Murphy R. Visual pose estimation of USV from UAV to assist drowning victims recovery. 2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. 2016.*
8. *Schmalenberger RM, Edrich MG. Channel modelling for wideband data communication in a maritime mobile environment. IEEE/AFCEA EUROCOMM 2000. Information Systems for Enhance Public Safety and Security. 2000.*
9. *ITU-R. P.1546-5: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. 2013.*
10. *IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society. IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. IEEE; 2012.*
11. *Sun J, Li B, Jiang Y, Wen C. A camera-based target detection and positioning UAV systems for search and rescue (SAR) purpose. Sensors. 2016;16(1778):1-24.*
12. *Miller JL, Friedman EJ. Photonics rules of thumb. New York, N.Y.: McGraw-Hill. 2004.*
13. *FLIR. FLIR Duo R, Radiometric dual-sensor thermal camera for drones [Internet]. [cited 2018 Ago 01]. Available from: https://www.flir.com/products/duo-r*

14. *DJI. Zenmuse Z3 [Internet]. [cited 2018 Ago 01]. Available from: https://www.dji.com/zenmuse-z3*
15. *García PG, Maroto MP, Álvarez DA, Sanz AR. Análisis de parámetros de influencia en la definición de trayectorias 4D: Resumen ejecutivo. Horizonte Navegación Aérea / ATM. 2017.*
16. *Grewal MS, Weill LR, Andrews AP. Global positioning systems, inertial navigation, and integration. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons. 2007.*
17. *Titterton D, Weston J. Strapdown inertial navigation technology. London: The Institution of Engineering and Technology. 2004.*
18. *Martinelli A. Vision and IMU data fusion: Closed-form solutions for attitude, speed, absolute scale, and bias determination. IEEE Transactions on Robotics. 2012;28(1):44-60.*
19 *Majewski JJ, Melody J, Messier A. LiTE SAR, Ku-band synthetic aperture radar for small unmanned air vehicles. 2018 IEEE Radar Conference. 2018.*
20. *Manley JE. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. OCEANS 2008. 2008.*
21. *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Atlas de radiación solar en España utilizando datos del SAF de clima de EUMETSAT. 2012.*
22. *Parida B, Iniyan S, Goic R. A review of solar photovoltaic technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011;15(3):1625-1636.*

2E. Guerra electrónica

Nuevas necesidades de los UAV para misiones en entornos contestados: D80 TITAN

Conde Luis, Alvaro[1], Cruz, Fco. Javier[2], López Martínez, Alvaro*

[1] A.C., Responsable Aviónica Sistemas UAV, Deimos Space, alvaro.conde@deimos-space.com

[2] J.C., Ingeniero de Sistemas, Deimos Space, javier.cruz@deimos-space.com

* A.L., jefe División UAV, Deimos Space, alvaro.lopez@deimos-space.com

Resumen

Los escenarios operacionales de los UAV han cambiado radicalmente en los últimos años. Las misiones UAV desplegadas en Irak y Afganistán en apoyo de actividades contraterroristas se llevaron a cabo en un espacio aéreo esencialmente sin disputar, en entornos sin superioridad aérea del adversario, y sin capacidades de guerra electrónica que dificultara la libertad de acción de aeronaves.

Sin embargo, este escenario ha cambiado sustancialmente y en las recientes campañas en Ucrania o Siria el enemigo ha hecho uso intensivo de dispositivos de guerra electrónica (EW) contra UAV, ocasionando el derribo sin opción para su defensa.

Ante esta situación los UAV que pretendan realizar misiones JISR en espacio aéreo disputado necesitarán, además de sus capacidades JISR, una capacidad adicional sustancial: la supervivencia en espacio aéreo hostil. No solo debemos evitar la pérdida de la plataforma aérea y de la información que pueda almacenar, sino la pérdida de su carga de pago y de sus capacidades de misión que dan proyección de la fuerza. Los UAV desplegados en Zona de Operaciones tendrán necesariamente que incluir en su carga de pago, sistemas de autoprotección / autodefensa que garanticen entre otras, la seguridad de las comunicaciones (COMSEC), el aumento de la robustez frente a interferencias (*jamming*), la disminución de la detectabilidad de sus emisiones en banda radar mediante la utilización de alertadores para dichas bandas, o la capacidad de identificación amigo/enemigo de las plataformas en su área de misión.

La plataforma UAV Clase 1 D80 TITAN desarrollada por Elecnor-Deimos ha tenido presente en su diseño las necesidades derivadas del nuevo CONOPS y CONEMP para UAV desplegados en diferentes teatros de operaciones y puede integrar algunos de estos sistemas de autoprotección que le permiten disponer de capacidad de supervivencia en entornos hostiles.

Palabras clave

UAV, entornos contestados, guerra electrónica, D80 TITAN.

1. Introducción

Hasta ahora los UAV se habían diseñado típicamente para operar en entornos benignos donde el adversario no disponía de superioridad aérea, ni de capacidades de guerra electrónica para impedir o reducir la libertad de acción de aeronaves, ni la utilización del espectro electromagnético, respectivamente. Los UAV desplegados en Irak y Afganistán pudieron operar en un espacio aéreo esencialmente sin disputar en apoyo de las operaciones de contrainsurgencia y contraterrorismo.

Sin embargo, este escenario ha cambiado durante las recientes campañas en Ucrania y en Siria, donde se ha hecho uso intensivo de guerra electrónica (EW) contra UAV, los cuales han sido derribados sin que pudieran defenderse.

2. Necesidades de los UAV actuales en entornos contestados

Los UAV que pretendan realizar misiones JISR (*Joint Intelligence, Surveillance and Reconoissance*) en un espacio aéreo disputado necesitarán, además de sus meras capacidades JISR, una capacidad adicional sustancial: capacidad de supervivencia en un espacio aéreo hostil. Aunque la duración, la carga útil, la integración y la conectividad son esenciales, ninguno de estos atributos será de valor si la plataforma no puede sobrevivir en un entorno de anti-acceso/negación de área (A2/AD). Es decir, los drones como multiplicadores de fuerza de JISR solo serán viables en un espacio aéreo hostil siempre que esas plataformas sigan pudiendo sobrevivir.

En los casos de Siria y Ucrania, existe un avanzado arsenal de sistemas EW de procedencia rusa, tales como el Krasuja-4, que es un sistema de contramedidas en banda radar (R-ECM) destinado a perturbar el funcionamiento de los radares enemigos, interrumpir los radioenlaces de las aeronaves no tripuladas e impedir su conexión con el puesto de mando. Otros medios EW utilizados en Ucrania son el Zhitel R-330ZH para interferir señales GPS, el rifle anti-drón REX-1 y el rifle anti-dron Stupor para interferir los canales de mando y control de los drones, así como suprimir las señales GNSS (GPS y Galileo, principalmente). Todos estos sistemas están orientados a crear áreas A2/AD (anti-acceso / negación de área) contra UAV, que impidan su libertad operacional, siendo en definitivas zonas inaccesibles para UAV.

Todo ello nos lleva a plantear la siguiente reflexión: ¿qué ocurre cuando los UAV deben desempeñar su misión en un escenario donde ni el espacio aéreo ni el espectro electromagnético son permisivos?

La integración de equipos de los que dependen los aviones tripulados para sobrevivir en entornos contestados se ha convertido actualmente en una prioridad a la hora de diseñar UAV. Por todo ello, las plataformas aéreas no tripuladas presentan limitaciones de supervivencia cuando se enfrentan a amenazas de guerra electrónica.

La mayoría de los drones de pequeño y mediano tamaño son considerados sistemas fungibles, de bajo coste y «desechables». Por lo tanto, pueden ser sacrificables en caso de emergencia. Sin embargo, aún para este tipo de drones, se tendrá que aplicar un nuevo concepto de operaciones (CONOPS) y un nuevo concepto de empleo (CONEMP) cuando estén desplegados en teatros de operaciones donde el oponente dispone de los medios y de la voluntad para impedir que puedan volar y desempeñar su misión con

éxito. No solo nos enfrentamos a evitar la pérdida de la plataforma aérea en sí y de su carga de pago y sus capacidades de misión para servir a la proyección de la fuerza, sino también al riesgo de que el enemigo o agentes externos dispongan de información clasificada contenida o capturada dentro del UAV y, no menos importante, a que dispongan de la información propia relativa al diseño de la aeronave y sus subsistemas.

Así pues, en lo que podemos llamar «misionización» de los UAV que quieran ser desplegados en una zona de operaciones, se deberá incluir en su carga de pago no solo sensores de observación, sino también sistemas de autoprotección / autodefensa. Entre las capacidades que se deben contemplar, destacamos las siguientes:

1. Seguridad de las comunicaciones a través del encriptado para evitar que un tercero pueda interceptar la información (datos, vídeo) intercambiada por el UAV o incluso tomar el control del mismo.
2. Aumento de la robustez frente a interferencias (*jamming*), mediante la aplicación de salto en frecuencia.
3. Disminución de la detectabilidad de sus emisiones en banda radar y en banda de comunicaciones aplicando técnicas EMCON (*Emission Control*).
4. Capacidad de detección de amenazas en banda radar y en banda de comunicaciones, mediante la utilización de alertadores para dichas bandas.
5. Capacidad de actuación en contra de las amenazas en banda radar y en banda de comunicaciones, mediante la utilización de contramedidas en dichas bandas.
6. Capacidad de identificación amigo/enemigo de las plataformas que se encuentren en su área de misión, mediante la utilización de los modos militares de IFF (*Identification Friend or Foe*).
7. Capacidad de guerra en red basada en un total conocimiento del campo de batalla. El UAV, como un nodo más de la red, intercambia datos en tiempo real con su estación de control y con el resto de unidades que participan en la misión, ya sean aeronaves –tripuladas o no– unidades navales, unidades terrestres. Para ello, el UAV debe disponer de un enlace táctico de datos.

3. Plataforma UAV D80 TITAN

Deimos Space está desarrollando una plataforma aérea no tripulada denominada D80 TITAN. Se trata de un sistema de 80 kg de peso máximo al despegue (MTOW), orientada hacia misiones JISR, con una capacidad media de carga de misión en el rango de los 20 kg y una autonomía de 5-6 horas.

Figura 1. Sistema UAV D80 TITAN.

Estas capacidades permiten plantear la «misionización» del D80 TITAN de forma que tengamos presente las necesidades derivadas del nuevo CONOPS y CONEMP para UAV desplegados en teatros de operaciones.

En este sentido, el D80 TITAN ha sido diseñado con la capacidad de integrar diferentes sistemas de autoprotección que le permitan disponer de capacidad de supervivencia en entornos hostiles. Para ello, el sistema D80 dispone, entre otros, de enlaces de datos y de vídeo con protección TRANSEC (salto en frecuencia) y COMSEC (encriptados), de forma que no sean vulnerable frente a actos de interferencia ilícita (jamming & spoofing) y/o interceptación no autorizada, y de la posibilidad de incorporar las siguientes unidades reemplazables en línea (LRU) (no todas simultáneamente):

- LRU #1: Transceptor V/UHF dotado de capacidad TRANSEC (HQ II y SATURN) con medidas de protección electrónica (EP/ECCM) para eludir las contramedidas electrónicas, con capacidad COMSEC para que no se intercepten las comunicaciones ni se pueda acceder de forma inteligible a la información.
- LRU #2: GPS SAASM con capacidad *anti-jamming* y *anti-spoofing*, y respaldo de sistema de navegación híbrida fusionando navegación inercial (INS) con navegación por visión para poder seguir operando frente a ataques de suplantación y denegación del servicio GPS. Dispone de señal de sincronismo para los modos TRANSEC del transceptor V/UHF. Dotado de protección *anti-tamper* (mecanismo anti-intrusión) del módulo criptográfico SAASM.
- LRU #3: IFF Transpondedor con Criptocomputador Mark XIIA de Modo 4 y Modo 5 para mejorar la conciencia situacional estableciendo su filiación (amigo o enemigo) de forma segura mediante cifrado con otras plataformas.
- LRU #4: Alertador radar (RWR) para detectar las emisiones radar asociadas a distintas amenazas (misiles guiados por radar, radares de vigilancia, radares de control de tiro, etc.) y generar una librería de amenazas en banda radar.
- LRU #5: Contramedidas en banda radar (R-ECM) mediante técnicas de engaño basadas en memorias fotónicas de radio frecuencia (PRFM).
- LRU #6: Contramedidas en banda de comunicaciones (C-ECM) para perturbar las comunicaciones del enemigo en banda HF, VHF y UHF.
- LRU #7: Sistema de *blanking* y *suppression* para permitir la interoperabilidad de los sistemas EW con los emisores y receptores propios del UAV.
- LRU #8: Indicador de fuego hostil (HFI) para detectar los lanzamientos de armas pequeñas / ligeras, morteros y granadas propulsadas por cohetes disparados hacia el UAV.
- LRU #9: Sistema COMINT / DF para detección, y geolocalización de comunicaciones en banda HF, VHF y UHF.
- LRU #10: Sistema de enlace táctico Link 16 para intercambio seguro de datos en una red táctica.

Así mismo, el D80 TITAN puede incorporar un sistema centralizado de gestión y borrado de claves (protocolos DS-101 y DS-102) –TRANSEC y COMSEC– para situaciones de emergencia; y de gestión del control de emisiones (EMCON) para limitar las transmisiones y de esta forma dificultarle al enemigo su detección, pudiendo operar en modo furtivo.

Todos estos sistemas contribuyen a la protección del D80 TITAN, como plataforma, así como a su carga de pago y, en definitiva, al cumplimiento de la misión.

La miniaturización de los sistemas embarcados, incluidos los sistemas de guerra electrónica, con características SWaP (tamaño, peso y consumo de potencia) y el empleo de sistemas fotónicos de radiofrecuencia ha posibilitado la integración de las citadas cargas útiles.

Por otra parte, se está empleando fibra óptica para el transporte de señales RF, cables y conectores apantallados bajo normativa MIL-C-27500 y MIL-DTL-38999 respectivamente. Todos los equipos embarcados cumplen con la norma MIL-STD-461 y el propio UAV, como conjunto, cumple con MIL-STD-461 en lo relativo a susceptibilidad radiada entre 2 MHz y 40 GHz correspondiente a la prueba RS103. Con ello, se ha pretendido dotar al D80 de una robusta protección EMI/EMC.

En la siguiente tabla resumimos los parámetros de peso (kg) y consumo (W) de las principales LRU identificadas para el D80, junto con los datos de un sensor ISR (EO/IR) y el enlace C2 de comunicaciones y de vídeo.

SISTEMA	PESO (kg)	CONSUMO (W)
SENSOR EO/IR	**2,5**	**40**
C2 DATALINK & VIDEO LINK	**0,2**	**12**
GPS SAASM	0,4	4,9
IFF M4/M5	0,25	15
V/UHF TRANSEC + COMSEC	0,65	50
RWR	1	20
R-ECM	5	60
COMINT DF	7,5	35
C-ECM	1	100
HFI	1,4	4
LINK 16	4,5	68
TOTAL	**24,4**	**408,9**

Tabla 1. Requerimientos SWaP

4. Riesgo de operación de un UAV

De cara a evaluar el riesgo que tiene una misión UAV en su operación, proponemos la siguiente metodología:

$$TR = (C_{EW} + N_{EW} + R_{EW} + W_{EW}) * D_{UAV} \qquad (1)$$

Donde:

TR: Riesgo TOTAL
C_{EW}: Capacidad tecnología EW enemigo
$N_{EW:}$ N.º medios EW enemigo
R_{EW}: Alcance medios EW enemigo
$W_{EW:}$ Voluntad empleo EW enemigo
D_{UAV}: Dependencia UAV para éxito de misión.

Cada uno de estos parámetros se valorará según la siguiente escala:

	BAJA (1 punto)	**MEDIA (2 puntos)**	**ALTA (3 puntos)**
Capacidad tecnología EW enemigo (C_{EW})			
N.º medios EW enemigo (N_{EW})			
Voluntad empleo EW enemigo (W_{EW})			
Voluntad empleo EW enemigo (W_{EW})			
SUBTOTAL			

Tabla 2. Evaluación riesgo operación UAV (I)

El parámetro $D_{UAV,}$ dependencia UAV para éxito de misión, se considera como un efecto multiplicador según esta dependencia sea baja/media/alta de la siguiente forma:

	BAJA (sin efecto mult.)	**MEDIA (efecto mult. x2)**	**ALTA (efecto mult. x3)**
Dependencia UAV para éxito de misión (D_{UAV})	x 1	x 2	x 3
RIESGO TOTAL (TR)			

Tabla 3: Evaluación riesgo operación UAV (II)

Con ello configuramos una clasificación del valor de riesgo total (TR). La clasificación que proponemos para la evaluación del riesgo de hostilidad se muestra en la siguiente tabla, donde se consideran los parámetros de necesidad de supervivencia y los medio EW.

	MÉTRICA (puntos)	**NECESIDAD SUPERV.**	**MEDIOS EW**	**OBSERVACIONES**
RIESGO HOSTILIDAD EW BAJO	1-15	Baja	Medidas de apoyo electrónico (ES)	Medios para interceptación de emisiones Radar/Coms Conciencia situacional con medios para identificación de plataformas
RIESGO HOSTILIDAD EW MEDIO	16-20	Media	Medidas de apoyo electrónico (ES) + Medidas de protección electrónica (EP)	Medios para interceptación de emisiones Radar/Coms Conciencia situacional con medios para identificación de plataformas Medios para eludir las contramedidas electrónicas (contra-contramedidas)
RIESGO HOSTILIDAD EW ALTO	>20	Alta	Medidas de Apoyo Electrónico (ES) + Medidas de Protección Electrónica (EP) + Medidas de Ataque electrónico (EA)	Medios para interceptación de emisiones Radar/Coms Conciencia situacional con medios para identificación de plataformas Medios para eludir las contramedidas electrónicas (contra-contramedidas) Medios para impedir o reducir el uso eficaz del espectro electromagnético por parte del adversario

Tabla 4: Medios de autoprotección frente nivel riesgo operación UAV

5. Ejemplo de aplicación

Proponemos un escenario como el de Siria o Ucrania, como ejemplo de aplicación, donde el enemigo tiene una capacidad de guerra electrónica elevada, con un número de medios alto y buen alcance, y su belicosidad es alta. De esta forma, la valoración de los parámetros de evaluación de riesgo sería:

	BAJA (1 punto)	MEDIA (2 puntos)	ALTA (3 puntos)
Capacidad tecnología EW enemigo	-	-	✔
N.º medios EW enemigo	-	-	✔
Alcance medios EW enemigo	-	-	✔
Voluntad empleo EW enemigo	-	-	✔
SUBTOTAL	12		

Tabla 5: Evaluación riesgo operación UAV (I) en Siria y Ucrania

En este escenario, consideramos que la dependencia de los UAV para el éxito de la misión es media, con lo que el multiplicador sería 2.

	BAJA (sin efecto mult.)	MEDIA (efecto mult. x2)	ALTA (efecto mult. x3)
Dependencia UAV para éxito de misión	-	2	-
RIESGO TOTAL	24		

Tabla 6: Evaluación riesgo operación UAV (II) en Siria y Ucrania

Obtenemos así un total de 24 puntos, es decir, los UAV tendrían una alta necesidad de supervivencia en Siria y Ucrania, principalmente porque el adversario dispone de gran cantidad de medios de guerra electrónica y además muestra una elevada hostilidad en la aplicación de dichos medios EW.

El D80 TITAN, dotado de medios ES (medida de apoyo electrónico), EP (medidas de protección electrónica), EA (medidas de ataque electrónico) podría operar y desempeñar su misión en un escenario como los citados anteriormente.

Además, podemos calcular la probabilidad de supervivencia (Ps) de un UAV con la siguiente expresión:

$$PS = \{[(NEPM / NEA * 100) * Peccm] + [(NEAM / NRC * 100) * Pecm]\} / 2 \qquad (2)$$

Donde:

- Número de activaciones válidas de medidas de protección: NEPM.
- Número de ataques electrónicos del enemigo: NEA.
- Porcentaje de efectividad de las medidas de protección electrónica: Peccm.
- Número de activaciones válidas de medidas de ataque electrónico contra el enemigo: NEAM.
- Número de sistemas hostiles en banda radar y en banda comunicaciones: NRC.
- Porcentaje de efectividad de las medidas de ataque electrónico: Pecm.

En el caso particular del D80, asumiendo los datos de fiabilidad proporcionados por los fabricantes de los equipos de misión, su probabilidad de supervivencia es PS = 99 %.

Donde:

- $NEPM / NEA = 1$
- $Peccm = 0{,}99$
- $NEAM / NRC = 1$
- $Pecm = 0{,}99$.

Frente al D80, otros UAV militarmente en uso cuya denominación será omitida por cuestiones de seguridad:

- UAV «X»: totalmente carente de cualquier sistema ES, EP y EA, tendría una probabilidad de supervivencia PS = 0 % en un entorno contestado.

- UAV «Y»: únicamente dotado de sistemas EP, tendría una probabilidad de supervivencia PS = 49,5 % en un entorno contestado.
- UAV «Z»: únicamente dotado de sistemas EA, tendría PS = 49,5 % en un entorno contestado.

6. Conclusiones

Debido al entorno sin disputar en el que fueron utilizados los sistemas UAV para tareas JISR sobre Irak y Afganistán, dichas plataformas aéreas no tripuladas, sus sensores y sus enlaces C2 y de vídeo, simplemente no se pueden trasladar y reubicarse en un nuevo teatro de operaciones donde el espacio aéreo está disputado.

Al producirse un cambio estratégico en el CONOPS y en el CONEMP de los UAV con respecto a las décadas anteriores en que fueron destinados a operaciones de contraterrorismo y contrainsurgencia, se deberá dotar a los UAV con medidas auto-protectoras de carácter activo y/o pasivo.

En este sentido, el D80 TITAN, sistema UAV de ala fija en desarrollo por Deimos Space, ha sido diseñado desde su concepción para poder integrar sistemas de autoprotección para poder llevar a cabo misiones JISR en entornos hostiles donde el control del espacio aéreo, incluido el espectro electromagnético, está disputado.

Área III - Plataformas

3A. Energía

Aprovechamiento de bioaceite pirolítico de diversas procedencias como biocombustible y fabricación de bioexplosivos

Gutiérrez Bravo, Javier[1,*], González González, Juan Félix[2], Galán González, Carlos Alberto[2], García Pérez, Ana Isabel[3] y Suárez Mejías, Rocío[2]

[1] Academia Básica del Aire. Ejército del Aire. La Virgen del Camino, 24198-León. Email: *jgutbra@ea.mde.es* (J.G.B.).

[2] Departamento de Física Aplicada. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Extremadura. 06071-Badajoz. Emails: *jfelixgg@unex.es* (J.F.G.G.), *cgalango@unex.es* (C.A.G.G.).

[3] Departamento de Química y Física Aplicadas. Escuela de Ingenierías Industrial e Informática. Universidad de León. 24071-León. Email: *ana.garcia@unileon.es* (A.I.G.P.).

* Autor principal y responsable del trabajo: *jgutbra@ea.mde.es* (J.G.B.).

Resumen

En este trabajo se presenta un proyecto de tesis doctoral que se centra en el aprovechamiento de bioaceites pirolíticos obtenidos a partir de diferentes biomasas garantizando así una utilidad completa a todos los productos resultantes de dicha pirólisis.

Se han obtenido resultados prometedores con bioaceites provenientes de cardo, en la última batería de ensayos se realizarán las pruebas con bioaceite proveniente del alquitrán recogido en el sistema de lavado del gas de síntesis obtenido de la gasificación de orujillo de aceituna, incluyendo los resultados obtenidos con mezclas de 0-25 % de bioaceite/queroseno.

Se han estudiado y probado las posibles aplicaciones de los bioaceites obtenidos de la pirólisis de biomasa residual como fracción líquida en diferentes máquinas térmicas como son: motor a reacción a escala de fabricación propia (ciclo Brayton, como las turbinas de aviación y las utilizadas para generación de energía), motor diesel de automoción (ciclo Diesel, como los utilizados en industria, generación, transporte marítimo y terrestre), y caldera de queroseno (similar a los quemadores para industria y calderas de calefacción) y finalmente explosivos tipo ANFO con las ventajas de utilizar el biocombustible en sustitución del combustible de origen fósil, maximizando así el aprovechamiento total de los productos de la pirólisis de biomasa residual (fracción gaseosa como fuente de obtención de biogás y fracción sólida como precursor de carbones).

Además, se han realizado experimentos en explosivos tipo ANFO (*Ammonium Nitrate Fuel Oil*) sustituyendo totalmente el fuel oil por biocombustible, con buenos resultados. Se contemplará además un estudio sobre la viabilidad de incluir un proceso de extracción con CO_2 supercrítico como método alternativo, habida cuenta de su nulo impacto medioambiental, de la conservación de las propiedades del extracto y de la posibilidad de maximizar el rendimiento total del proceso de extracción de bioaceite.

Palabras clave

Biocombustible, propulsión, sostenibilidad, energías renovables, cogeneración.

1. Introducción

El elevado coste de los combustibles fósiles y sus efectos en la contaminación ambiental han llevado a algunos países a intensificar la búsqueda de combustibles y fuentes de energía alternativos, de modo que sean más baratos, que permitan reducir las emisiones de gases contaminantes y que sean energéticamente rentables. La biomasa es, precisamente, uno de los recursos renovables que permite la obtención de biocombustibles.

Además de la considerable autonomía en cuanto al consumo energético que aportaría a España el uso de biocombustibles de fabricación propia, la posible implicación del Ministerio de Defensa en el desarrollo de biocombustibles para autoabastecimiento y desempeño de sus funciones de una manera sostenible demostraría públicamente su compromiso indiscutible con el medio ambiente.

La mayoría de los procesos de transformación de biomasa en combustibles líquidos comienzan con la pirólisis (descomposición térmica de un material en atmósfera inerte resultando tres fracciones: sólida, líquida y gaseosa), seguida por craqueo catalítico para mejorar los bioaceites líquidos resultantes. Pocos estudios se han enfocado sobre el uso de catalizadores para el craqueo de biomasa para generar productos químicos de interés, así como sobre el uso de los bioaceites generados en el proceso de pirólisis. Además, la industria conservante de la madera en los países desarrollados está interesada en encontrar productos derivados de los residuos a bajo coste y medioambientalmente aceptables, que puedan ser sustitutos de los combustibles actuales o sean substancias químicas de interés industrial [1]. La descomposición pirolítica de madera produce un gran número de productos químicos, algunos de los cuales pueden ser usados como sustitutos de los combustibles convencionales.

El bioaceite pirolítico, como combustible limpio, tiene varias ventajas medioambientales sobre los combustibles fósiles. Los bioaceites son CO_2/GHG neutros. Por tanto, pueden generar créditos de CO_2. No producen prácticamente emisiones de SOx ya que las plantas de biomasa contienen insignificantes cantidades de azufre. El bioaceite, por tanto, no está sujeto a tasas de SOx. Los bioaceites generan menos del 50 % de las emisiones de NOx que el gasóil en una turbina de gas.

Por otra parte, el bioaceite producido localmente puede ser generado en países con grandes volúmenes de residuos orgánicos. Así, los biocombustibles son más limpios y son causa de menores tasas de polución [2, 3]. La conversión termoquímica de biomasa (pirólisis, gasificación, combustión) se presenta como una prometedora forma de energía no nuclear en un futuro próximo [4].

Los resultados obtenidos de los análisis del bioaceite producido nos dan una idea en línea con lo esperado, por lo que proseguimos con la prueba en una aplicación práctica como es un motor a reacción para ensayos, una caldera doméstica, un motor diésel ligero y para fabricación de bioexplosivos. Todo esto nos valdrá para poder comparar los datos obtenidos usando diferentes mezclas de bioaceite con combustible fósil habitual (al 5 %, 10 % y 20 %) con el patrón de medida que será el rendimiento obtenido utilizando 100 % el combustible fósil original (queroseno JP8 / JET-A1, queroseno de calefacción, gasóleo A). Debido a la modesta disponibilidad de recursos y la fabricación artesanal del motor a reacción para

ensayos, se espera poder adquirir un banco de pruebas y una microturbina de flujo axial para realizar las pruebas en sustitución de queroseno JP8/Jet-A1 con la mayor exactitud posible.

Después de haber obtenido resultados satisfactorios en las pruebas realizadas sobre el motor a reacción de ciclo Brayton [5], se ha estudiado el desempeño del bioaceite en mecanismos que requieren muchas menos exigencias en cuanto al combustible a utilizar, como son las calderas de calefacción y ACS (agua caliente sanitaria) que permiten mayores tolerancias de los mecanismos y condiciones de funcionamiento menos hostiles [6].

Asimismo se realizaron pruebas en motores de ciclo diésel para confirmar la polivalencia del biocombustible [7] y poder así reducir el total de emisiones contaminantes de otros aprovechamientos.

Seguidamente se realizaron pruebas sustituyendo totalmente el combustible fósil por biocombustible en explosivos de tipo ANFO que combinan un agente oxidante (nitrato de amonio) y un combustible, derivado del petróleo en su origen y biológico como objeto de investigación.

Tras los resultados obtenidos se realizarán los mismos ensayos con biomasa procedente de hueso de aceituna tratado, otro residuo biomásico con mucho potencial energético.

Además del estudio en cuestión, en el supuesto de que las pruebas de extracción con CO_2 supercrítico fuesen satisfactorias, ello daría lugar a una futura línea de investigación para obtener el biocombustible de un modo más limpio y eficiente.

2. Desarrollo

Una vez obtenido el bioaceite pirolítico, se realiza la extracción de la fracción que nos es de interés con disolventes orgánicos (éter etílico y acetato de etilo) en el caso del bioaceite procedente de cardo. En el de hueso de aceituna se probará sin realizar dicha extracción ya que la parte alquitranosa es mucho mayor, posteriormente se procede a realizar una valoración previa a las pruebas experimentales en las tres máquinas (motor de ciclo Brayton, motor de ciclo Diesel, y caldera de calefacción) y en los bioexplosivos.

En cuanto a los ensayos en el motor a reacción a escala, estos se han llevado a cabo con bioaceite proveniente de cardo y en el mismo día para que no influyan las posibles variaciones atmosféricas. Se disponen de cuatro recipientes con 4 litros cada uno de combustible, el primero de ellos es queroseno al 100 %, el resto son mezclas de queroseno y bioaceite al 5 %, 10 % y 20 %. Una vez arrancado y a su temperatura de funcionamiento, se pone a máximo régimen (máxima presión de combustible) y se mide la presión del compresor, el empuje y la temperatura de los gases de escape como *outputs*. Estas mismas mediciones se hacen con cada una de las mezclas restantes, para poder analizar las diferencias de rendimiento resultantes.

En la caldera de combustible líquido (queroseno de calefacción, también llamado «parafina líquida») se utilizó la mezcla con mayor proporción de biocombustible (20 %), considerando parámetros como facilidad de arranque y durabilidad de los componentes al no disponer de más medios para poder considerar otras magnitudes.

En cuanto al motor diésel, se realizaron pruebas con hasta un 20 % de biocombustible de cardo para asemejarlo al valor máximo de las pruebas anteriormente realizadas. Se hizo un *data-logging* de los principales parámetros que podrían verse afectados, principalmente rendimiento del motor, temperatura y suavidad de funcionamiento comprobando las compensaciones de los inyectores para redondear el motor, verificando así que la posible diferencia en la inflamabilidad entre los combustibles no afecten al funcionamiento del motor. Una vez obtenidos los resultados y tras la previsible pérdida mínima de rendimiento debido a las diferencias de en torno a un 4 % de poder calorífico, se ajustaron parámetros de la gestión electrónica del motor para adecuarlo al uso de este biocombustible con un rendimiento equiparable sin diferencias prácticas de funcionamiento, actuando principalmente sobre la cantidad inyectada para compensar las diferencias en poder calorífico sin tener que ajustar más parámetros.

Para el estudio en explosivos al ser un tema delicado por cuestiones obvias se recurrió a solicitar ayuda para el estudio a una empresa. Ante la negativa, con los medios disponibles se realizaron pruebas similares a las realizadas sobre explosivos rompedores para medir y comparar las temperaturas y presiones máximas alcanzadas en un recipiente cerrado en las mismas condiciones, lo que nos da una idea del volumen específico y la potencia rompedora producida por ambos compuestos. Se realizó un símil a la prueba de Trauzl que mide la deformación en una pieza estandarizada de plomo mediante la variación de su volumen interior como consecuencia de la explosión, aunque debido a la menor escala y menores dimensiones de la pieza de plomo así como las posibles diferencias en la fabricación de la pieza (hecha fundiendo plomo en un molde y taladrando posteriormente el alojamiento donde introducir el explosivo) no permite saber con seguridad si los efectos de la deformación localizada se deben a la actuación del explosivo principal (bio-ANFO) o a los iniciadores.

3. Resultados y discusión

3.1. Obtención de biocombustible y análisis previo

Como resultado de la pirólisis de cardo a 700 ºC durante una hora se obtiene más de una tercera parte en masa de bioaceites del total pirolizado. Esta fracción líquida obtenida se somete a un proceso de extracción con disolventes orgánicos para separar la fase oleosa (bioaceite, fase de interés) de la fase acuosa, la cual se encuentra en elevada proporción en dicha fracción líquida. Se obtiene un rendimiento del 34,72 %. Se estudiará la posibilidad de realizar la extracción con CO_2 supercrítico para mejorar el rendimiento de extracción global a la vez de minimizar la presencia de disolventes en el producto.

3.2. Ensayos en motor a reacción

Se han realizado ensayos en un motor a reacción de fabricación propia para comparar diferentes parámetros del funcionamiento, en condiciones estandarizadas, utilizando queroseno JP8 en comparación con mezclas de un 5 %, 10 % y hasta 20 % de biocombustible pirolítico de cardo con resultados que no varían prácticamente respecto del uso de queroseno al 100 % sin mezclar. Cabe resaltar:

1. No quedan residuos carbonosos en la parte caliente del motor.
2. La bujía permanece limpia y color café, indicando una correcta combustión de la mezcla.
3. El filtro de la bomba de combustible contiene impurezas debido a la poca miscibilidad del bioaceite, por lo que se han utilizados emulsionantes (Solquim-tar) y ultrasonidos para mejorarlo en la medida de lo posible.
4. Los resultados a priori son satisfactorios, con un rendimiento similar al obtenido con queroseno puro, incluso con la mezcla con un porcentaje de bioaceite del 20 % sobre el total.

3.3. Ensayos en caldera de queroseno

Se utilizó una caldera de parafina líquida Kero SRE 300 de 3000 W y de combustión por evaporación (sin malla) para que se asemejase lo máximo posible a los quemadores de dispositivos mayores. El funcionamiento de la caldera no varió al utilizar mezcla con hasta un 20 % de biocombustible de cardo en comparación con el queroseno de uso habitual. Sí que se percibe un olor característico, al ser una caldera de uso en interiores afecta a su practicidad, aunque en calderas con salida al exterior (todas las de potencia considerable) este factor es despreciable.

Resultado: arranque y funcionamiento totalmente equiparable, olor perceptible (despreciable para instalaciones mayores por tener salida de humos exterior).

3.4. Ensayos en motor diésel

Se realizaron ensayos en motor diésel de automoción de inyección directa por inyector-bomba. Cabe destacar que las exigencias en cuanto al combustible para grandes motores diésel son sensiblemente menores que para motores diésel ligeros [8] por lo que los resultados se pueden extrapolar con seguridad

para el uso del biocombustible en motores diésel pesados. En comparación con el rendimiento utilizando gasóleo habitual, el par (y con ello la potencia) se ha visto afectado como era previsible por el menor poder calorífico de la mezcla. Para compensarlo, se han ajustado los mapas de inyección aumentando mínimamente los miligramos de combustible inyectados por ciclo [9]. Para esa mínima diferencia los inyectores tienen margen suficiente sin comprometer la duración y momento de inyección no afectando así ni a la combustión ni a los humos producidos [10, 11]. De este modo el desempeño del motor no difiere prácticamente entre su uso con gasóleo habitual y gasóleo con hasta un 20 % de biocombustible proveniente de pirólisis de cardo (figura 2).

Resultado: diferencia mínima de rendimiento debido a la variación del poder calorífico que se subsanó ajustando la cantidad de inyección para compensar mediante la gestión electrónica resultando en un rendimiento totalmente equiparable con una variación menor al 1 %.

3.5. Ensayos con explosivos tipo ANFO

Los explosivos tipo ANFO se usan principalmente en voladuras civiles. Su nombre viene del inglés *Ammonium Nitrate Fuel Oil* siendo una combinación de nitrato de amonio que actúa como oxidante con fuel oil como combustible. Se ha sustituido totalmente la presencia de fuel oil por bioaceite pirolítico aumentando mínimamente la proporción de fuel oil para compensar la diferencia de poder calorífico, aunque las diferencias son mínimas incluso sin ajustar las cantidades (con los medios disponibles para realizar las pruebas). Es un explosivo secundario por lo que es bastante insensible a estímulos externos y necesita de una onda de choque suficientemente potente para iniciarse, generada por el explosivo primario.

Para poder iniciar el insensible ANFO el tren explosivo se compuso de cuatro explosivos en orden decreciente en sensibilidad y creciente en potencia (mecha o iniciador eléctrico > AP > ANNM > ANFO) para poder iniciar las pequeñas muestras objeto de estudio. El resultado empírico final debería ampliarse al haber faltado material para realizar suficientes pruebas en estos primeros ensayos de aproximación, que podrán dar lugar a unos análisis más exhaustivos. Existen estudios similares donde se comprueba que biocombustibles como el biodiésel pueden sustituir perfectamente a los combustibles fósiles en este tipo de aprovechamientos [12] lo que respalda la hipótesis del éxito de las futuras pruebas.

3.6. Emulsión alquitranes con queroseno mediante ultrasonidos y emulsionantes químicos

Se realizaron diferentes pruebas para mejorar la miscibilidad del alquitrán proveniente del hueso de aceituna con el queroseno, para aumentar el rendimiento global del aprovechamiento. Del bioaceite no tratado se obtuvo un PCS de 36,8278 MJ/Kg, superior a los 17,9 MJ/Kg del hueso de aceituna e inferior a los 46,2 MJ/Kg del queroseno, estando el PCS del gasoil en un punto intermedio con 43 MJ/Kg. El bioaceite de hueso de aceituna era bastante heterogéneo recién recibido de la planta, con parte líquida dividida claramente en una parte acuosa (17,22 % en análisis) y parte oleosa, así como también una parte más viscosa sedimentada en el fondo por lo que se espera que sean los compuestos con cadenas más largas y densas.

Habiendo seleccionado la parte oleosa por decantación, se emulsionó con queroseno por diferentes métodos. Los resultados se muestran en la siguiente lista:

1. 250 g + 25 g de Solquim-tar = 108 g de líquido (167 g de residuo sólido, 66,8 % en masa del alquitrán inicial).
2. 250 g + 25 g Solquim-tar + 250 g queroseno = 410 g (115 g de residuo sólido, 46 % en masa del alquitrán inicial).
3. 250 g + ultrasonidos + 190 g queroseno = 383 g de líquido (57 g de residuo sólido, 22,8 % en masa del alquitrán inicial).
4. 500 g + 50 g Solquim-tar + 380 g queroseno + ultrasonidos = 864 g de líquido (66 g de residuo sólido, 13,2 % en masa del alquitrán inicial).

Se realizarán análisis y pruebas con mezclas en diferentes proporciones de queroseno y bioaceite procedente de hueso de aceituna, que se espera poder incluir en la presentación en el congreso.

3.7. Futuras líneas de investigación

Analizados los resultados, el siguiente paso que se llevará a cabo en la investigación será con la finalidad de mejorar la miscibilidad del bioaceite mediante el uso de tensioactivos. Además se realizará un estudio para llevar a cabo la extracción de la fracción de interés con CO_2 supercrítico para optimizar el proceso, lo que presenta una serie de ventajas añadidas:

1. Es seguro para el medio ambiente y no es tóxico para el ser humano.
2. Disponible fácilmente en una pureza >99,9 % y de forma barata.
3. No son necesarias condiciones extremas de trabajo para conseguir el estado supercrítico.
4. No genera líquidos residuales y es eliminable fácilmente por evaporación (100 % de sequedad).
5. No interfiere con el agua de la fracción líquida, pues es relativamente inerte y no oxidable.
6. Es un disolvente débil para moléculas de elevado peso molecular, pudiendo usar esta característica a nuestro favor si se requiere la separación de distintas sustancias por pesos.
7. Los hidrocarburos pueden ser separados de otros según la longitud de cadena modificando las condiciones de P y T.

Finalmente se realizará un craqueo catalítico a la fracción restante más pesada para obtener así mayor cantidad de bioaceite dentro del rango de puntos de destilación que nos son de interés del total de la masa pirolizada [13], lo que mejorará el rendimiento global de la extracción, tomando como referencia estudios actuales similares [14].

4. Conclusiones

- La biomasa residual es susceptible de ser transformada en biocombustible líquido mediante pirólisis seguido de un proceso de extracción con disolventes orgánicos.
- El biocombustible extraído proveniente de cardo ha dado resultados satisfactorios en motores de ciclo Brayton, diésel, calderas y explosivos lo que supone un amplio abanico de posibilidades para implantar dicho bioaceite en diferentes aprovechamientos.
- Se esperan resultados prometedores con el bioaceite proveniente de hueso de aceituna una vez tratado para reducir su humedad y mejorar la miscibilidad.
- Se podría realizar un craqueo catalítico que además de mejorar la miscibilidad del bioaceite, supondría un aprovechamiento total de la extracción y un rendimiento total mayores.
- Existen estudios que demuestran la viabilidad de biocombustibles en sustitución total del fuel oil presente en los explosivos tipo ANFO, aunque las pruebas realizadas deberían ampliarse son perfectamente extrapolables los resultados al ser un tipo de aprovechamiento menos exigente con el combustible que los estudiados anteriormente.
- El uso de CO_2 supercrítico para la extracción de la fracción de interés presenta importantes ventajas, lo que lo convierte en una interesante futura línea de investigación.

Agradecimientos

Los autores desean hacer constar su agradecimiento a la Academia Básica del Aire del Ejército del Aire por su predisposición y colaboración efectiva para facilitar la planificación y el desarrollo de este proyecto, a la empresa Satecma (www.satecma.es) por proveer de muestra de Solquim-Tar para ensayos, así como a la Junta de Extremadura por su financiación a través de las ayudas a grupos (GR18150) y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional- FEDER- («Una manera de hacer Europa»).

Referencias

1. *Mohan, D.; Pittman, C.U. Jr; Steele, P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. Energy and Fuels, 2006, 20, 848-889.*
2. *Churin, E.; Delmon, B. What can we do with pyrolysis oils? Pyrolysis and Gasifiction; Ferrero G.L., Maniatis K., Buekens A, Bridgwater A.V., Eds.; Elsevier Applied Science: Londres, Reino Unido, 1989; pp. 326-333.*
3. *Putun, E. Energy Sources, 2002, 24(3), 275-285.*
4. *Demirbas, A. J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2004, 72, 243-248*
5. *Gutiérrez Bravo, J.; Galán González, C. A.; González González, J. F.; García Pérez, A. I.; Gonzalo , J.; Extracción y análisis de bioaceite pirolítico a partir de biomasa: una fuente de energía alternativa para motores a reacción, diésel y quemadores; Congreso en DESE I+D, Marín, 2015.*
6. *Matthias Lamping, Thomas Körfer, Thorsten Schnorbus, Stefan Pischinger, Yunji Chen; Tomorrows Diesel Fuel Diversity – Challenges and Solutions, SAE 2008-01—1731.*
7. *Gerhard Lepperhoff, Thomas Körfer, Stefan Pischinger, H Busch, Stefan Keppeler, Paul W Schaberg, Mark Schnell; Potential of Synthetic Fuels in Future Combustion Systems for HSDI Diesel Engines, SAE 2006-01-0232.*
8. *John B Heywood; Internal Combustion Engine Fundamentals; McGraw Hill International Edition-Automotive technology series.*
9. *Bosch, R.; Diesel-Engine Management, 4th Edition; ISBN: 978-0-470-02689-2, 2006.*
10. *Tatur, M.; Nanjundaswamy, H.; Tomazic, D.; Thornton, M.: Effects of Biodiesel Operation on Light-Duty Tier 2 Engine and Emission Control Systems; SAE 2008-01-0080.*
11. *Nanjundaswamy, H.; Tatur, M.;Light-Duty Diesel Engine – Impact of Fuel Properties on Emissions and Performance.*
12. *Assis Resende, S.; Costa e Silva, V.; Mota de Lima, H.: Study of non conventional fuels for explosives mixes.*
13. *Huber, G.W.; Chheda, J.N.; Barrett, C.J.; Dumestic J.A. Science, 2005, 308, 1446-1450.*
14. *Fonts Amador, I.; Ábrego Garrués, J.; Atienza-Martínez, M.; Azuara Medel, M.; Gea Galindo, G.; Gil-Lalaguna, N. Pirólisis de materia orgánica residual para la obtención de combustibles líquidos; III Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad. 2015. Marín.*

Modelos de pronóstico de producción fotovoltaica para su aplicación en edificios de consumo de energía casi nulo en la Base Naval de Rota

Guerrero Fuentes, Ignacio[1,*]

[1] Oficina de Apoyo a las Instalaciones Navales, 11530-Base Naval de Rota. Correo electrónico: iguefue@fn.mde.es

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: iguefue@fn.mde.es

Resumen

En un mundo acosado por el deterioro del medio ambiente y por el cambio climático, se impone cada vez con más fuerza una revisión del modelo energético.

Esta transición hacia un nuevo modelo pasará, muy probablemente, por sustituir paulatinamente los grandes centros de generación de energía, alejados de los consumidores, por una generación distribuida, cercana a los centros receptores. Más aún, buena parte de la energía necesaria para los usos propios del edificio la podría generar, usando tecnologías renovables, el propio consumidor, evitando de este modo las pérdidas de energía en el transporte. En esta línea, y en virtud de lo establecido en la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética, la Unión Europea contempla que no más allá del 31 de diciembre de 2018, los edificios nuevos que estén ocupados y sean propiedad de autoridades públicas deberán ser edificios de consumo de energía casi nulo.

Ya hace unos años que en la Base Naval de Rota se vienen instalando módulos fotovoltaicos en algunos de sus edificios. Estas instalaciones están monitorizadas, de manera que en todo momento son conocidas la producción fotovoltaica, el consumo del edificio, la radiación solar, la temperatura ambiente, y la temperatura del panel. Todos estos datos podrían servir para el diseño de modelos de predicción, tanto de producción fotovoltaica, como de consumo del edificio, los cuales resultan imprescindibles para la implementación de un sistema inteligente de gestión de la energía.

El alcance de esta comunicación, no obstante, se limitará a exponer el estado del arte de modelos de pronóstico basados en métodos tales como redes neuronales artificiales, máquina de soporte vectorial, regresiones lineales múltiples, etcétera, todo ello con el fin de predecir la producción de energía en instalaciones fotovoltaicas, y en alumbrar alguno (concretamente el que se basa en redes neuronales artificiales) como modelo aplicable al caso de la Base Naval de Rota.

Palabras clave

Pronóstico energía fotovoltaica, redes neuronales artificiales, máquina de soporte vectorial, técnicas híbridas.

1. Introducción

La transición energética pasará por sustituir los grandes centros productores alejados de los consumidores, por centros de generación más cercanos a los receptores, o incluso instalaciones generadoras mucho más pequeñas, ubicadas en los mismos edificios a los que alimentan. En este punto es donde adquiere sentido hablar de los edificios de consumo de energía casi nulo (EECN).

Los orígenes normativos de los EECN se remontan al año 2010, concretamente a la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios [1]. En esta normativa, en su artículo 2, se define el edificio de consumo de energía casi nulo como un edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto, y que la cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida aquí la energía producida *in situ* o en el entorno. Asimismo, el artículo 9 de esa misma normativa propone unas fechas límite para que los estados miembros aseguren la implementación de estos edificios. Estas fechas son el 31 de diciembre de 2018, y el 31 de diciembre de 2020, para edificios nuevos de titularidad pública, y privada respectivamente [1].

Una de las líneas de investigación que se abren en la consecución del objetivo central de desarrollar sistemas de gestión energética para los EECN, es el diseño de modelos de pronóstico de producción de energía fotovoltaica. Son muchos los investigadores que han dedicado sus esfuerzos a este tema en particular [2]. La mayoría de los estudios recientes en este área se han centrado en investigar modelos de predicción directo de energía fotovoltaica, es decir, aquellos que permiten realizar el pronóstico de la producción fotovoltaica a partir de unos parámetros de entrada al modelo, como pueden ser los datos meteorológicos; en el lado opuesto están los indirectos, que tratan de pronosticar la irradiancia solar a partir de diferentes métodos y parámetros, para posteriormente calcular la producción solar empleando programas comerciales de simulación de energía fotovoltaica.

Estas investigaciones han conducido al desarrollo de modelos de pronóstico materializados a través de diferentes métodos, como son el de persistencia, el de promedio móvil auto-regresivo (ARMA), el de regresión, o el modelo físico, entre otros. En el desarrollo de estos modelos destacan los de aprendizaje automático, entre los cuales, los más importantes son los métodos de redes neuronales artificiales (ANN), y el de máquina de soporte vectorial (SVM). No podemos olvidar en esta relación los modelos híbridos, los cuales aúnan las ventajas de los métodos hibridados, y minimizan los problemas que pudieran tener cada uno de ellos por separado.

2. Modelos de pronóstico de producción fotovoltaica

2.1. Persistencia

Es un modelo de pronóstico muy elemental. En este modelo, la potencia de salida pronosticada es igual a la potencia de salida real del día anterior. Solo se requiere datos históricos de salida de potencia fotovoltaica para pronosticar la energía generada. Su precisión baja mucho con la inestabilidad climatológica,

por lo que no suele emplearse como modelo de pronóstico, sino más bien como patrón para medir el rendimiento de otros modelos.

$$P_f(t) = P_{pd}(t) \quad (1)$$

2.2. ARMA / ARIMA

El modelo de promedio móvil auto-regresivo (ARMA), es un método lineal para el modelado estadístico, muy útil para correlacionar datos históricos de series de tiempo. Este método puede incorporar diferentes tipos de datos de series de tiempo y extraer propiedades estadísticas de ellos. La debilidad de este modelo es que los datos de series de tiempo deben ser estacionarios.

$$X(t) = \sum_{i=1}^{p} \alpha_i X(t-i) + \sum_{j=1}^{q} \beta_j e(t-j) \quad (2)$$

ARIMA es una mejora de ARMA con una capacidad adicional para manejar datos de series de tiempo no estacionarios. Obtiene mejores pronósticos que su antecesor cuando el patrón climático que se predice es irregular. Sin embargo, en comparación con ARMA, ARIMA es más exigente desde el punto de vista del coste computacional debido a la inclusión de una función de suma e integración en el método.

2.3. Regresión

Se trata de un método estadístico utilizado para establecer una relación entre variables explicativas y variables dependientes; la variable dependiente se pronostica conociendo las variables explicativas. En el caso de predicción fotovoltaica, la potencia pronosticada se considera como una variable dependiente, y las variables meteorológicas se consideran como variables explicativas. Se tienen dos modelos de regresión diferentes: las regresiones lineales simples, y las múltiples. El modelo de regresión que utiliza irradiancia solar y temperatura como datos de entrada obtiene mejores resultados en comparación con los métodos que emplean uno solo de ellos. Se requiere un modelo matemático y varias variables explicativas para diseñar un modelo de pronóstico basado en regresión. A veces esto dificulta la aplicación del método.

2.4. Método físico

Consiste en un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen el estado físico y el movimiento de la atmósfera. Se diseña en función de las características de la planta fotovoltaica, como pueden ser su ubicación, las variables meteorológicas y la orientación. El rendimiento de las predicciones se ve afectado en gran medida por los cambios bruscos en las condiciones meteorológicas. Mejora sustancialmente hibridado con inteligencia artificial. No obstante, debe diseñarse específicamente para una planta y ubicación en particular.

2.5. Redes neuronales artificiales (ANN)

ANN es uno de los métodos más eficaces y populares entre los investigadores desde los años ochenta. Se ha empleado en diferentes aplicaciones de predicción con bastante éxito, incluida la predicción de la generación de energía fotovoltaica. Tolera bien la falta de linealidad en los datos meteorológicos. ANN es más adecuado en comparación con los métodos estadísticos cuando existe una vinculación no lineal entre los datos.

Una red neuronal consiste en un conjunto de unidades elementales (neuronas) conectadas de una forma concreta. Tan relevante es el modelo del elemento procesador como la forma en la que se conectan estos elementos. Tal y como puede apreciarse en la figura 1.a), en una red neuronal artificial puede distinguir-

se: una capa de entrada, donde se presenta los datos a la red; unas capas ocultas cuyo número dependerá de la complejidad de la red; y la capa de salida, que como se puede suponer, muestra los resultados.

$$U_N = b + \sum_{j=1}^{N} (W_j + I_j) \quad (3)$$

Las ANN están constituidas por elementos que se comportan de manera similar a la neurona biológica en sus funciones más comunes. Son capaces de aprender de la experiencia, generalizan de ejemplos previos a ejemplos nuevos, y abstraen las características principales de una serie de datos. En la figura 1.b) puede observarse un modelo explicativo de la neurona artificial. La estructura básica de la ANN es la neurona, la cual recibe y combina señales desde y hacia otras neuronas. La neurona es el elemento procesador.

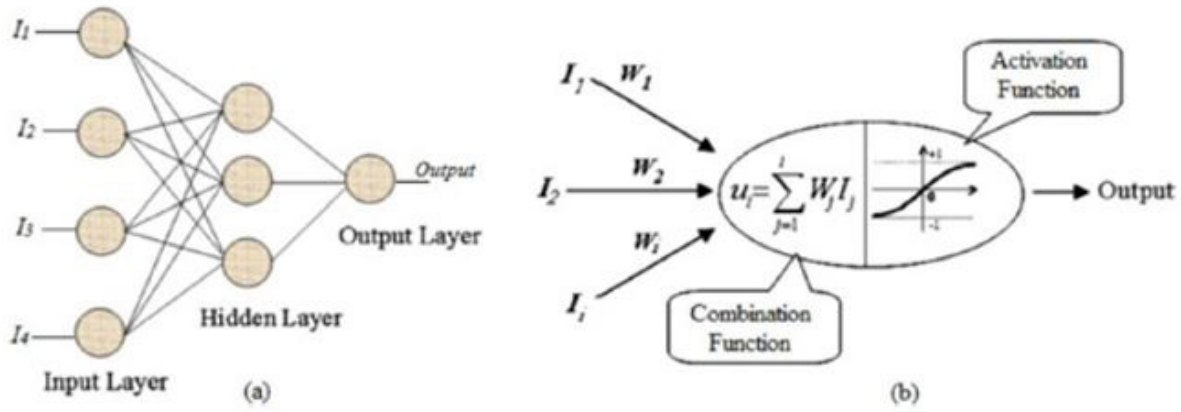


Figura 1. Esquema de ANN: a) Red neuronal con una capa oculta; y b) Modelo explicativo de neurona artificial.

2.6. Máquina de soporte vectorial

Se trata de un método supervisado de aprendizaje automático basado en el principio de minimización de riesgos estructurales. Fue desarrollado para resolver problemas de clasificación. Sin embargo, este método se ha extendido recientemente al dominio de los problemas de regresión. La aplicación de SVM en la regresión de series temporales se conoce como regresión vectorial de soporte (SVR). El pronóstico de la generación de energía fotovoltaica es un problema típico de análisis de series de tiempo, por lo que SVR es un método que puede ser empleado para el fin que se explica en esta comunicación.

2.7. Modelos híbridos

Una de las principales motivaciones de estos modelos es explorar las posibles combinaciones de diferentes tipologías para mejorar la precisión del pronóstico. Los modelos híbridos pueden aprovechar la ventaja de cada tipo individual y minimizar o incluso eliminar sus inconvenientes. En general, los modelos híbridos han logrado mejores resultados que las técnicas independientes para resolver el problema de pronóstico de energía fotovoltaica.

3. Correlación de parámetros, tratamiento previo de datos y optimización del modelo

3.1. Correlación de parámetros

El rendimiento de un modelo de pronóstico depende en gran medida de la correlación de los valores de entrada y salida del modelo. En este caso, las diferentes entradas meteorológicas que podemos tener,

como la irradiancia solar, la temperatura atmosférica, la temperatura del módulo, la velocidad y dirección del viento y la humedad, tienen más o menos correlación con el parámetro de salida, en nuestro caso, la energía fotovoltaica; es decir, es importante conocer cuánto de determinante son los parámetros de entrada con los valores de salida del modelo. Tampoco se puede olvidar que la correlación puede ser positiva o negativa. Las variables fuertemente correlacionadas se deben usar como un vector de entrada al modelo de pronóstico, y los datos de aquellos vectores de entrada débilmente correlacionados se deben rechazar. En el caso de modelos de pronóstico de energía fotovoltaica, la irradiancia y la temperatura exterior son los parámetros más influyentes.

3.2. Tratamiento previo de datos

Son muchos los modelos de pronóstico de la generación de energía fotovoltaica que han utilizado como parámetros de entrada al modelo tanto los datos históricos de salida de energía fotovoltaica como el histórico de datos meteorológicos. Estos datos pueden contener picos dispares y componentes no estacionarios debido a las condiciones climatológicas, sobre todo cuando estas son inciertas y cambiantes. Como resultado, estos picos y componentes no estacionarios en los datos de entrada conducen a errores de pronóstico. Además, las faltas en los datos históricos debido a errores de grabación, o de comunicación, o de cualquier otra índole, también pueden provocar errores en la predicción. El procesamiento previo de los datos de entrada puede reducir significativamente estos problemas, además de reducir sustancialmente el coste computacional en el proceso de aprendizaje del modelo. Por lo tanto, la precisión del modelo de pronóstico se puede mejorar considerablemente mediante el procesamiento previo de los datos de entrada. Los métodos más populares son la normalización y la transformada de Wavelet.

3.3. Optimización del modelo

Es lógico suponer que se deben desarrollar modelos de predicción de energía fotovoltaica con la precisión suficiente como para estabilizar las operaciones de la red eléctrica, e incrementar así el nivel de penetración de los sistemas fotovoltaicos. El rendimiento de los modelos de pronóstico, especialmente de los modelos de aprendizaje automático, depende en gran medida de ciertos parámetros propios de cada modelo. Por ejemplo, en ANN, los umbrales y los pesos son parámetros que se deben seleccionar para el modelo; en SVR, sin embargo, los parámetros propios del modelo que habría que seleccionar son el factor de penalización, el radio del tubo, y el parámetro de la función kernel. El rendimiento del modelo de predicción está directamente relacionado con la adecuada selección de los parámetros mencionados. En muchos casos los investigadores, en función de su experiencia, seleccionan el valor de estos parámetros por el método de prueba y error durante la etapa de aprendizaje; pero en otros casos se han empleado técnicas de optimización para determinar el valor óptimo. El algoritmo genético (GA) es uno de los algoritmos de inteligencia evolutiva más populares utilizados para optimizar los pesos y umbrales de los métodos de predicción basados en redes neuronales. Hay otros algoritmos de optimización: de enjambre de partículas (PSO), de luciérnaga (FF), o de colonia de hormigas (ACO), por citar solo algunos.

4. Propuesta de modelo para la Base Naval de Rota

4.1. Descripción de la instalación

Para desarrollar el modelo de predicción fotovoltaica, se contará con las instalaciones ubicadas en el edificio 2061 (REM) de la Base Naval de Rota. Se trata de un edificio de uso administrativo, de dos plantas: planta baja con 3.296,68 m^2; y planta primera con 1.576,07 m^2. En su cubierta se ha instalado una planta fotovoltaica con una potencia nominal de 31,2 kWp, totalmente monitorizada, de manera que se dispone de datos históricos de irradiancia solar, producción fotovoltaica, temperatura ambiente y temperatura de panel.

Figura 2. Campo solar edificio 2061 (REM).

4.2. Modelo propuesto: ANN + algoritmo de optimización

El método que se propone para diseñar un modelo de predicción de producción fotovoltaica para el citado edificio es el de redes neuronales artificiales, del tipo Perceptrón multicapa, al que se aplicará, además de un tratamiento previo de los datos (normalización), una optimización del modelo, empleando para ello un algoritmo basado en enseñanza – aprendizaje, el denominado *Teaching Learning Based Optimization* [3] (TLBO, por sus siglas en inglés).

El TLBO es un algoritmo de optimización global estocástico, basado en poblaciones y orientado a problemas de amplia escala. La novedad que aporta este algoritmo respecto a otros de inteligencia evolutiva es que no necesita parámetros de control específicos, solo precisa de los parámetros de control comunes, como población y número de generaciones. Esto supone una ventaja, debido a que la correcta elección de esos parámetros específicos en otros algoritmos supone un problema de optimización en sí mismo.

A continuación se muestran algunas de las expresiones que emplea este algoritmo de optimización en sus distintas fases.

Fase de aprendizaje:

$$Diferencia_{media(j,k,i)} = r_i + \left(K_{j,kbest,i} - T_F M_{ji}\right) \qquad (4)$$

Fase de enseñanza:

Si $X'_{total-P,i} < X'_{total-Q,i}$

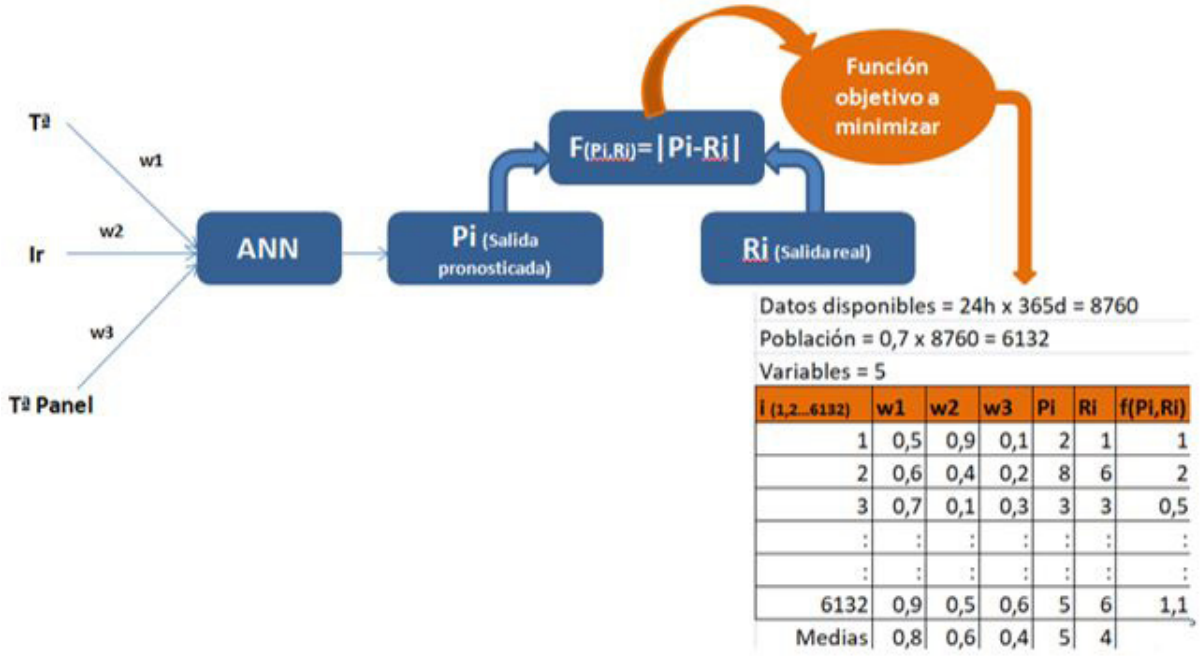
$$X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + r_i\left(X'_{j,P,i} - X'_{j,Q,i}\right) \qquad (5)$$

Si $X'_{total-Q,i} < X'_{total-P,i}$

$$X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + r_i\left(X'_{j,Q,i} - X'_{j,P,i}\right) \qquad (6)$$

Como puede verse en la figura 3, los vectores de entrada al modelo serán la irradiancia (Ir), la temperatura ambiente (Tª) y la temperatura del panel (Tª panel). La salida de esta red neuronal será el vector Pi, el cual se comparará con el vector Ri, que no es otro que el histórico de producción fotovoltaica. La

función objetivo del algoritmo TLBO será la diferencia entre los vectores Pi y Ri. Es decir, el algoritmo TLBO tratará de minimizar esta diferencia modificando los pesos y los umbrales de la red neuronal. De los datos disponibles para un año de cada vector implicado (8.760), se tomarán el 70 % de ellos para entrenar a la red, y el 30 % restante para su validación.



i (1,2...6132)	w1	w2	w3	Pi	Ri	f(Pi,Ri)
1	0,5	0,9	0,1	2	1	1
2	0,6	0,4	0,2	8	6	2
3	0,7	0,1	0,3	3	3	0,5
:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:
6132	0,9	0,5	0,6	5	6	1,1
Medias	0,8	0,6	0,4	5	4	

Figura 3. Esquema de principio del modelo.

En la figura 3 se representa un esquema de principio del modelo, y en la figura 4 un diagrama de flujo del modelo propuesto.

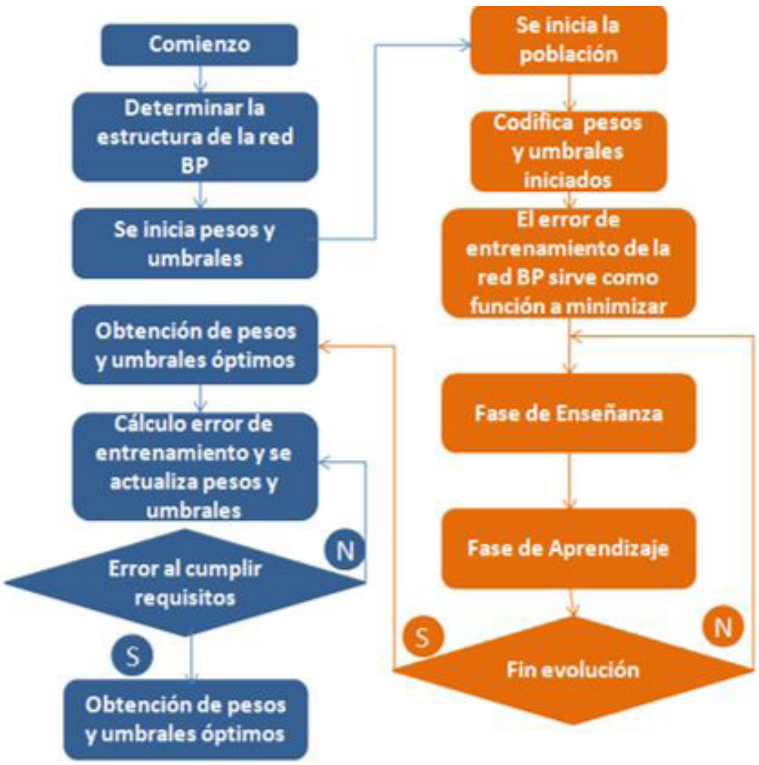


Figura 4. Diagrama de flujo del modelo.

5. Conclusiones

Habida cuenta de las inversiones realizadas hasta el momento en la Base Naval de Rota con la instalación de plantas fotovoltaicas en algunos de sus edificios, cabe esperar que el desarrollo de modelos de pronóstico de producción fotovoltaica en esta Base Naval redunde en beneficios económicos y medio ambientales para las Fuerzas Armadas. En este sentido se redacta este artículo, limitándose, como se ha indicado al principio, a los modelos de pronóstico de producción fotovoltaica, incorporando como novedades el empleo de la temperatura de módulo como parámetro de entrada al modelo, y del algoritmo de optimización TLBO.

Agradecimientos

Quisiera agradecer la inestimable colaboración en la redacción de este artículo a Dr. D. Luis Miguel Fernández Ramírez, y a Dr. D. Pablo García Treviño, ambos profesores titulares de la Escuela Politécnica Superior de Algeciras, de la Universidad de Cádiz.

Referencias

1. *Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo del 19 de mayo del 2011 relativa a la eficiencia energética en los edificios (refundición).*
2. *Das, Utpal Kumar; Tey, Kok Soon; Seyedmahmoudian, Mehdi; et al, «Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review», Renewable & Sustainable Energy Reviews, Volumen: 81, Páginas: 912-928, 2018.*
3. *R. Ventaka Rao. Teaching Learning Based Optimization Algorithm and its engineering applications, Springers, 2016.*

Un nuevo concepto de foto-condensador

Navarrete Astorga, Elena[1,*], Solís Cortés, Daniel[1], Rodríguez Moreno, Jorge[1], Martín Jiménez, Francisco[1], Ramos Barrado, José R.[1]

[1] Universidad de Málaga, Departamentos de Física Aplicada I & Ingeniería Química, (Unidad de Nanotecnología), E29071.

* Email: enavarrete@uma.es (ENA).

Resumen

Las misiones del Ejército en territorio extranjero suponen la instalación de bases de diversos tamaños. El uso de fuentes renovables tiene menos costes de mantenimiento y mayor autonomía. Esto supone producir energía y almacenarla. En muchas ocasiones se trata de suministrar energía a pequeños equipos o iluminación a contenedores de pequeño tamaño. Los sistemas de almacenamiento de energía electroquímica foto-recargables como los foto-condensadores, que utilizan la luz solar para generar energía eléctrica que se almacena directamente en el mismo dispositivo, son una excelente opción. Foto-condensadores transparentes de estado sólido con un rendimiento electroquímico elevado y una transparencia óptica relativamente alta han sido presentados por nuestro grupo en anteriores congresos dedicados a la aplicación de la nanotecnología a la defensa y seguridad.

En esta comunicación se presenta la fabricación y caracterización de un nuevo foto-condensador transparente utilizando un foto-ánodo de TiO_2 obtenido por magnetrón *sputtering*, un contra-electrodo de $LiFeO_2$-Ag desarrollado por nuestro grupo y un electrolito gel iónico desarrollado también por nuestro grupo, teniendo todos estos componentes alta transmitancia en el rango visible. Todo ello, sin el uso de colorantes para sensibilizar los electrodos, lo que supone un nuevo concepto.

El principio de funcionamiento de este foto-condensador se ha interpretado de la siguiente manera: debido a la iluminación, la película de TiO_2 (estructura de rutilo) se foto-excita dando como resultado una carga positiva parcial en la interfaz de gel con el TiO_2. Los iones BF_4 son atraídos por esa carga positiva provocando la separación de la carga del gel de iones y se forma una doble capa. Simultáneamente, los cationes del gel de iones $[HemIm]^+$ van a la interfaz del gel con el cátodo $LiFeO_2$. De este modo se obtiene un súper-condensador de doble capa. Por otro lado, en la oscuridad, la doble capa se reorganiza produciendo la descarga del dispositivo.

Palabras clave

Foto-condensador, energía solar, almacenamiento electroquímico.

1. Introducción

Los sistemas electroquímicos de almacenamiento de energía (baterías y súper-condensadores) juegan un papel crítico en las aplicaciones técnicas tanto civiles como militares. Se utilizan en SLI (arranque, luces, encendido) de vehículos y aviones, herramientas inalámbricas, estaciones de control remoto, alimentación e iluminación de emergencia, misiles, satélites, marcapasos, audífonos, computadoras, dispositivos de comunicación portátiles, vehículos eléctricos, controles industriales, naves espaciales, electrónica de tracción, etc. Las aplicaciones futuras pueden incluir automóviles descentralizados de potencia máxima, nivelación de carga y automóviles eléctricos de alto rendimiento. Para estas aplicaciones, se debe mejorar la vida útil, la potencia específica, la energía específica y el precio por kilovatio-hora.

Además, existe una conciencia cada vez mayor de los riesgos de seguridad y de los problemas ambientales inherentes a las diversas tecnologías. Esto ha resultado en un impulso para liberar a todas las baterías de materiales peligrosos. Los metales pesados como el mercurio, el plomo y el cadmio se han eliminado de las baterías. El plomo en las baterías de plomo-ácido se recicla cuidadosamente, lo que minimiza la liberación al medio ambiente. Las baterías usadas reciben atención especial en la recolección de residuos. En el desarrollo de nuevos sistemas de baterías, por lo tanto, se considera seriamente la elección de materiales ambientalmente benignos. Se necesitará un gran esfuerzo en la investigación de materiales para alcanzar los objetivos de rendimiento, vida, costo y medioambiente.

El mayor inconveniente de la energía solar fotovoltaica es que la generación de electricidad está directamente relacionada con la radiación solar fluctuante e intermitente (por ejemplo, día y noche, el clima), lo que hace que sea incapaz de proporcionar un suministro continuo de energía confiable.

La conversión de energía solar en energía química almacenada en dispositivos de almacenamiento electroquímicos de energía externos podría abordar el problema anterior. De hecho, la energía eléctrica producida por los paneles de células solares se transporta a dispositivos de almacenamiento a través de cables eléctricos externos. Este enfoque adolece de problemas tales como una estructura compleja y costosa, y la pérdida sustancial de energía durante el proceso de conversión y almacenamiento de energía de múltiples pasos; además, este tipo de soluciones está pensada para instalaciones medias y grandes, pero en muchas ocasiones se trata de suministrar energía a pequeños equipos o iluminación a contenedores de pequeño tamaño. Por lo tanto, es muy conveniente desarrollar un sistema integrado con procesos simplificados para realizar simultáneamente la recolección de energía óptica y el almacenamiento de energía eléctrica dentro de un dispositivo. De este modo, la energía almacenada puede liberarse y usarse a lo largo del día y de la noche. Recientemente, se han desarrollado diferentes sistemas de almacenamiento de energía electroquímica foto-recargables, es decir: baterías fotoeléctricas y foto-condensadores [1,2]. Un foto-condensador utiliza la luz solar para generar energía eléctrica, que se almacena directamente en un conjunto de almacenamiento integral. Se implementaría en el desarrollo de

fachadas transparentes o translúcidas capaces de transformar parte de la luz solar incidente en electricidad, es decir, fachadas solares activas.

2. Dispositivo

El desarrollo de súper-condensadores transparentes de estado sólido con un rendimiento electroquímico elevado y una transparencia óptica relativamente alta han sido informados por nuestro grupo en anteriores congresos dedicados a la aplicación de la nanotecnología a la defensa y seguridad [3]. Además, y siguiendo la idea que se discutió anteriormente, el desarrollo de un dispositivo integrador de conversión y almacenamiento de energía es una tarea desafiante.

Hay muy pocos informes de foto-condensadores de estado sólido en la bibliografía especializada y en general se basan en un foto-ánodo de TiO_2 sensibilizado con colorante o en un dispositivo con una parte de la célula solar de perovskita, pero estos dispositivos no son transparentes o pierden transmitancia durante el uso [4].

El electrolito juega un papel importante en el foto-condensador, ya que debe tener una alta conductividad iónica y una alta transmitancia. En nuestro grupo se han desarrollado dos electrolitos transparentes basados en PVP y probado en súper-condensadores: uno con una sal de litio como dopante y el otro utilizando un líquido iónico para obtener un gel electrolito de iones, encontrando una mejora con el segundo [5].

Esta comunicación trata de la fabricación y caracterización de un foto-condensador transparente utilizando un foto-ánodo de TiO_2 obtenido por magnetrón *sputtering*, un cátodo de $LiFeO_2$-Ag desarrollado por nuestro grupo y un electrolito de gel de iones desarrollado previamente también por nuestro grupo, teniendo todos estos componentes alta transmitancia en el rango visible.

El principio de funcionamiento de este foto-condensador se ha interpretado de la siguiente manera: bajo iluminación, la película de TiO_2 (estructura de rutilo) se foto-excita dando como resultado una carga positiva parcial en la interfaz de gel con el ánodo de TiO_2. Los iones BF_4 son atraídos por esa carga positiva que provoca la separación de la carga en el gel de iones y se forma una doble capa. Simultáneamente, los cationes de gel de iones $[HemIm]^+$ van a la interfaz de gel de ion con el cátodo de $LiFeO_2$. Así, se obtiene un súper-condensador de doble capa. Por otro lado, en la oscuridad, la doble capa se reorganiza teniendo lugar la descarga del dispositivo. Todo ello, sin el uso de colorantes para sensibilizar los electrodos, lo que supone un nuevo concepto de foto-condensador.

3. Caracterización

Con el objetivo de determinar la energía específica y la capacitancia específica del foto-condensador, se llevó a cabo la voltametría cíclica en la oscuridad a una velocidad de 100 mVs^{-1} (figura 1a). Capacidades específicas de 0,72 $\mu F\ cm^{-2}$ a 1,23 $\mu F\ cm^{-2}$ se lograron bajo oscuridad dependiendo del número del ciclo de voltametría. De la misma manera, se obtuvieron energías específicas de 0,13 $\mu J\ cm^{-2}$ a 0,22 $\mu J\ cm^{-2}$. Ambos valores disminuyeron con el número del ciclo, pero esta disminución no fue muy relevante teniendo en cuenta el número de ciclos que se llevaron a cabo (1.200). Para probar la capacidad de auto-carga bajo la iluminación del foto-condensador, el dispositivo fue foto-cargado a potencial abierto bajo iluminación durante 1 hora, y luego se apagó la luz por otra hora para realizar la auto-descarga. Esto también se llevó a cabo para un foto-condensador hecho con PVP / $LiClO_4$ como electrolito. En la figura 1b se presentan varios ciclos de foto carga / auto-descarga. Como se muestra, el potencial máximo aumenta con el número de ciclo y la auto-descarga alcanzó 0 V en una hora. Esto sucedió también con la batería de estado sólido foto-recargable desarrollada por Kanbara et al., pero en este trabajo se mejoró el voltaje de la celda. Como se muestra en la figura 1b, hay una tensión residual cuando la foto-carga comienza en los primeros ciclos, debido a que el dispositivo no se descargó completamente hasta 0 V.

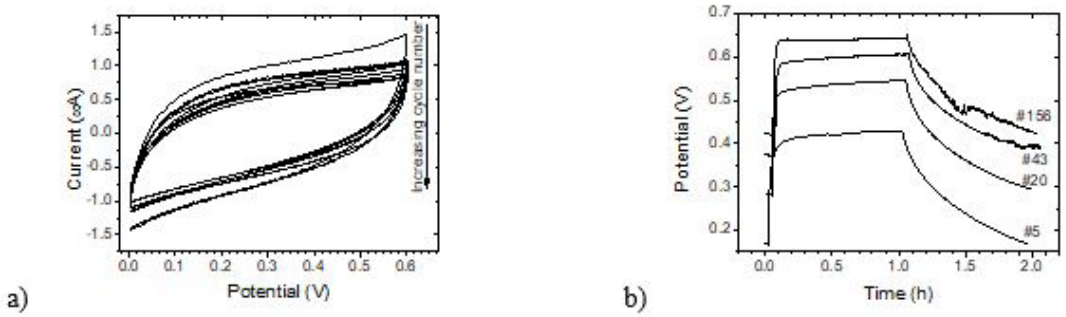


Figura 1. a) Voltametrías cíclicas del fotocondensador con electrolito de gel de iones, medido a 100 mVs-1 (1200 ciclos en oscuridad). b) Ciclos de fotocarga / autodescarga.

La foto-carga y descarga galvanostática se presentan en la figura 2a. El dispositivo se foto-cargó alcanzando 0,5 V en aprox. 30 minutos, y la descarga galvanostática llevada a cabo a 0,17 μA cm^{-2} tuvo lugar durante 167 s. Este tiempo de descarga podría ser comparable a otros foto-condensadores con corriente de descarga más alta. Como se ve en la figura 2b, el dispositivo emplea unas 16 horas en descargarse por completo (auto-descarga).

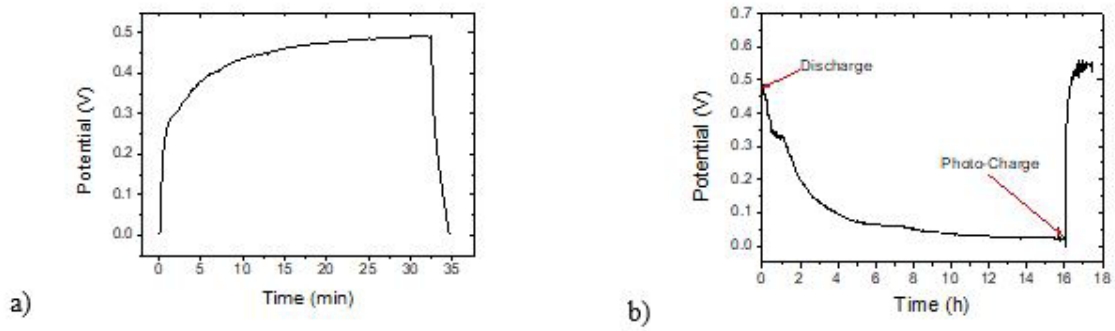


Figura 2. a) Fotocarga y descarga galvanostática con electrolito de gel de iones; descarga a 0,17 μA cm-2. b) Curva de fotocarga / autodescarga.

Figura 3. Fotografía del logotipo de la UMA debajo del dispositivo.

Con el fin de investigar las propiedades de transparencia del foto-condensador, se han realizado mediciones de transmitancia óptica para los componentes separados y todo el dispositivo completo antes y después del ciclado. La transmitancia óptica de la región IR visible cercana del dispositivo completo, con el gel de iones como electrolito, es aproximadamente 57 % y 54 % a λ = 555 nm (transmitancia óptica evaluada a esa longitud de onda porque la función de sensibilidad ocular tiene sensibilidad máxima en el rango espectral del verde a 555 nm) antes y después del ciclado. Se ha obtenido un foto-condensador transparente, ya que conserva una alta transmitancia después del ciclado. La figura 3 muestra una fotografía digital del dispositivo completo después del ciclado, mostrando su nivel de transparencia, dejando ver el logotipo de la Universidad de Málaga debajo de él.

4. Conclusiones

En resumen, se ha desarrollado un foto-condensador transparente, utilizando un gel de iones como electrolito. Aunque los valores de foto-carga y descarga galvanostática del foto-condensador desarrollados en este trabajo no serían comparables con otros dispositivos similares encontrados en la bibliografía (debido a la baja corriente de descarga que aplicamos), este sería un nuevo concepto de dispositivo que muestra una alta transmitancia en el rango visible, lo que permite su aplicación en ventanas de edificios auto-sostenibles o como almacenamiento en foto-sensores. Además, en este trabajo no se usaron moléculas de colorante para sensibilizar los electrodos, por lo que también es un nuevo concepto de foto-condensador de bajo costo. Los potenciales usos de este dispositivo están por desarrollar, siendo este uno de los objetivos de nuestro grupo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por la Comisión Europea por parte de los fondos de FEDER y del Ministerio de Ciencia e Innovación español a través del proyecto de investigación TEC2014-53906-R.

Referencias

1. *M. Yu, W. D. McCulloch, Z. Huang, B. B. Trang, J. Lu, K. Amine and Y. Wu, Solar-powered electrochemical energy storage: an alternative to solar fuel, J. Mater. Chem. A., 2016;4:2766–278.*
2. *D. Schmidt, M. D. Hager and U. S. Schubert, Photo-Rechargeable Electric Energy Storage Systems, Adv. Energy Mater, 2016;6:150036.*
3. *Francisco Martín, Jorge Rodríguez-Moreno, Elena Navarrete-Astorga, Enrique A. Dalchiele, José Ramón Ramos-Barrado, Semitransparent symmetric and asymmetric supercapacitor, NanoSecurity&Defense International Conference, Avila (Spain) 2014.*
4. *F. Zhou, Z. Ren, Y. Zhao, X. Shen, A. Wang, Y. Y. Li, C. Surya and Y. Chai,* Perovskite Photovoltachromic Supercapacitor with All-Transparent Electrodes, *ACS Nano, 2016;10:5900–5908.*
5. *J. Rodríguez-Moreno, E. Navarrete-Astorga, E. A. Dalchiele, L. Sánchez, J. R. Ramos-Barrado and F. Martín, PVP-$LiClO_4$ solid polymer electrolyte and its application in transparent thin film supercapacitor, Journal of Power Sources, 2013;237:270-276.*
6. *Xu, Z. Ku, Y. Zhang, D. Chao and H. J. Fan, Integrated Photo-Supercapacitor Based on PEDOT Modified Printable Perovskite Solar Cell, Adv. Mater. Technol. 2016;1(5):1600074.*

Sistemas energéticos compactos «HYCOGEN» basados en pilas de combustible, para aplicaciones portátiles en la defensa y la seguridad

Martínez Martínez, Angel[1,*] y Álvarez Abad, Juan[1]

1 JALVASUB Engineering

C/ Kálamos n.º 26 4-2.º-4 - 28232 Las Rozas – MADRID.

* Email: a.marmar@jalvasub.com (amm); jalvarez@jalvasub.com (jaa).

Resumen

Las crecientes necesidades de energía eléctrica detectadas para aplicaciones portátiles en el campo de la defensa y la seguridad indican que se requieren nuevas fuentes energéticas, más compactas y eficientes que las baterías actuales, siendo uno de los candidatos más prometedores las pilas de combustible tipo PEM basadas en tecnología del hidrógeno. Por ello, se ha estudiado el diseño conceptual de un nuevo sistema energético compacto, integrado por un sistema de generación de hidrógeno bajo demanda METALIQ, y por una pila de hidrógeno ULPHE-PEM de bajo contenido de platino y alta eficiencia, al que hemos denominado HYCOGEN.

Por la alta densidad energética que es posible obtener con este sistema, se considera que sus principales beneficiarios deberían ser, 1.º- el combatiente individual desplegado en operaciones, para dotarlo de alta capacidad de energía eléctrica con un menor peso a transportar (Programa SISCAP), 2.º- los vehículos de apoyo, para dotarlos de cargadores de baterías independientes y unidades de potencia auxiliar, y 3.º- los vehículos no tripulados tanto aéreos como navales.

Esta iniciativa tecnológica estaría recogida por la ETID 2015, dentro del Área de Actuación 3.- «Plataformas», en las Metas Tecnológicas MT-3.1.5 Almacenamiento de energía y MT-3.1.6 Micro generación de energía eléctrica, que contempla el «desarrollo de nuevos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica que posean una mayor capacidad de carga, mayor flexibilidad en la entrega de potencia y menor peso y volumen que las baterías actuales».

Palabras clave

Sistemas híbridos compactos de generación energética HYCOGEN, *Ultra Low Platinum High Efficient ULPHE-PEM Fuel-Cells*, sistema de generación de hidrógeno METALIQ, densidad energética, almacenamiento de energía, potencia y energía eléctrica.

1. Introducción

En noviembre de 2015 y con motivo de las XV Jornadas para presentación de empresas, organizadas por el Mando de Apoyo Logístico del E.T. (Dirección de Adquisiciones), quedaron patentes a través de las varias presentaciones efectuadas cuales eran las necesidades energéticas del Ejército de Tierra en lo que se ha venido a llamar «la frontera avanzada» (regiones del norte y centro de África, donde actualmente las Fuerzas Armadas españolas colaboran en misiones internacionales para frenar la expansión del integrismo islámico hacia Europa).

Estas eran: sistemas generadores con alta capacidad energética, con el mínimo peso y volumen, que puedan operar de forma aislada y en las condiciones del entorno atmosférico presentes en esas regiones, para dotar al combatiente de a pie y a los vehículos de apoyo con la energía necesaria para poder operar con la mayor autonomía posible los sistemas de que disponen, y cuyo apoyo logístico fuera compatible con los medios disponibles.

Ya en dichas jornadas, la empresa española Drage&Mate International (uno de los actuales colaboradores de JALVASUB), presentó bajo el título «Sistemas METALIQ de generación de energía para aplicaciones militares» su sistema de generación de hidrógeno bajo demanda e *in situ*. El objetivo de la presentación, que fue muy bien recibida, era dar a conocer los sistemas energéticos de pilas de combustible con tecnología METALIQ de generación de hidrógeno, que podrían satisfacer una serie de necesidades acuciantes del combatiente, como un menor peso y volumen de baterías transportadas, proporcionándoles a la vez una mayor autonomía.

Desde entonces, la empresa JALVASUB Engineering que es una pequeña empresa de base tecnológica, formada por un equipo de personal, socios y colaboradores con gran experiencia en proyectos energéticos y pilas de combustible, y que cuenta con las licencias de patentes y la colaboración y apoyo de D&M International, del Laboratorio de Física de Fluidos de la UNED y del Grupo de Hidrógeno y Pilas de Combustible del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC, avanzó en el diseño conceptual de un sistema energético compacto, totalmente español, al que se ha denominado HYCOGEN.

2. Sistemas HYCOGEN

Se trata de sistemas híbridos y compactos de generación de energía eléctrica, basados en tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible tipo PEM, formados por la integración del novedoso sistema de generación *in-situ* y a demanda de hidrógeno a partir del agua, denominado METALIQ y patentado por la empresa española DRAGE&MATE International, y por la pila de hidrógeno de última generación ULPHE-PEMFC con bajo contenido de platino como catalizador y alta eficiencia, desarrollada a partir de dos patentes de la UNED. El sistema se completa con un suministro continuo del oxidante (oxígeno del aire), un sistema de gestión de la corriente producida para adaptarla a las necesidades de los consumidores y una conexión con una pequeña batería recargable de Li-ión de alta capacidad «en tampón», para absorber picos y responder instantáneamente a demandas súbitas de potencia (de ahí su denominación como sistema «híbrido»).

Las ventajas que se prevé aportar con este sistema son las siguientes: mayor autonomía con menor peso y volumen; máxima densidad energética en peso, superior a tres veces la obtenida con las baterías recargables (> 750 W.h/Kg), favorecida por la recuperación del agua producida en la pila para su reutilización

en el sistema Metaliq; rápida puesta en marcha y facilidad para soportar demandas puntuales de potencia. Facilidad logística, con rápido reemplazo de los cartuchos Metaliq que son recargables y reutilizables.

En la figura se indica el diagrama de bloques con los componentes del sistema y a continuación se incluye la descripción de los dos subsistemas principales:

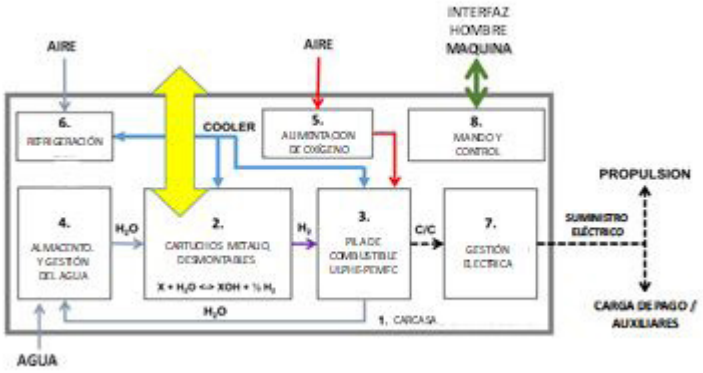


Figura 1. Diagrama de bloques sistema HYCOGEN.

2.1. Pila de combustible ULPHE-PEMFC

Las pilas de combustible **ULPHE-PEMFC** (*Ultra Low Platinum content & High Efficient Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, o pilas de combustible de membrana de intercambio de protones de alta eficiencia y ultra bajo contenido en platino), son pilas de combustible poliméricas, alimentadas por hidrógeno y el oxígeno del aire, cuya fabricación se basa en el uso de dos tecnologías propietarias, patentadas por la UNED-Laboratorio de Física Fluidos: 1) procedimiento de depósito nano-estructurado uniforme de partículas catalíticas por **electro spray** (patente WO2013/144390 A1), y 2) Pila con electrolito polimérico, con **placas monopolares duales** (patente WO2016/030565 A1).

La técnica de electro spray permite, mediante la utilización de un equipo sencillo y de coste relativamente reducido, que los electrodos (ánodo y cátodo) de cada celda sean elaborados aerosolizando suspensiones catalíticas que generan un depósito granular de nano partículas de platino altamente poroso y con una elevada superficie activa del catalizador distribuido en los poros del material. Con esta técnica se consiguen cargas de platino más de treinta veces menores lo que repercute en un menor coste de la pila. En la figura se indica el esquema y equipo para aplicar esta técnica.

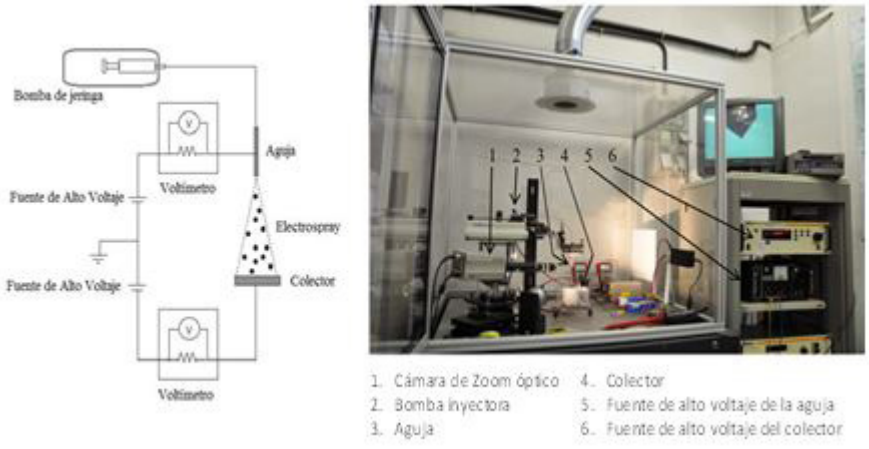


Figura 2. Técnica de deposición por electrospray.

La utilización de placas monopolares duales de menor espesor de material para comunicar el electrodo de un signo de una celda con el electrodo del mismo signo de la contigua, en sustitución de las placas bipolares tradicionales, aporta las siguientes ventajas: 1) menor peso y volumen de la pila (entre dos y

tres veces); 2) mejora de la conductividad electrónica; 3) mejora en la eficiencia de reparto de gases.; 4) no hay difusividad entre hidrógeno y oxígeno; 5) favorece la circulación del agua procedente del cátodo (menor probabilidad de fallos por condensación de agua), y su recuperación para uso del sistema Metaliq.

En la figura a continuación, se muestra una placa monopolar dual y un *stack* de tres placas durante las pruebas de laboratorio con más de 5.000 horas de funcionamiento.

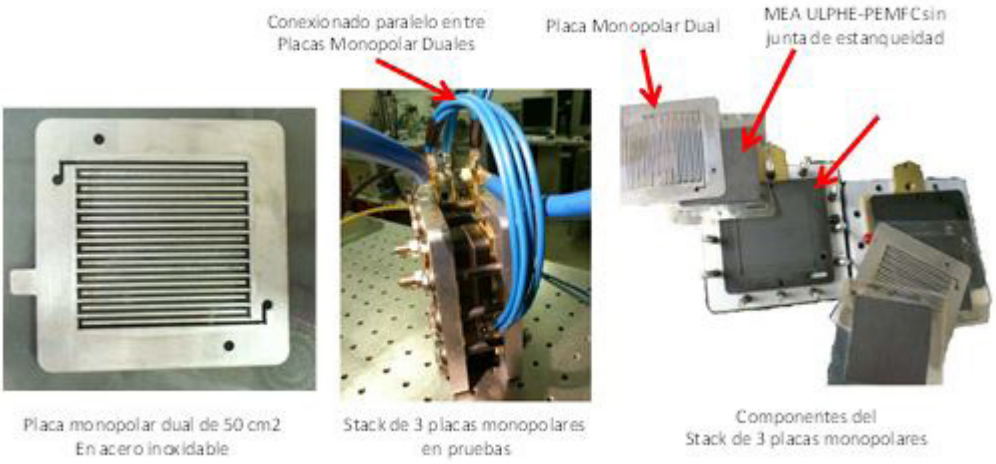


Figura 3. Placas Monopolares Duales.

2.2. Sistema de generación de hidrógeno METALIQ

El sistema METALIQ se basa en la reacción exotérmica de los metales alcalino o alcalino térreos tales como (Na, Li, K, Mg, o combinaciones de ellos), alguno de los cuales son muy abundantes en la naturaleza, con el agua para producir hidrógeno puro y como subproducto una disolución del hidróxido correspondiente en agua.

$$1.1.\ X + nH_2O \dashrightarrow X(OH)_n + n/2\ H_2$$

$$1.2.\ X = Li, Na, K, Mg, Alloys\ (NaK, LiNa, etc...).$$

La reacción tiene lugar en el interior de un cartucho pasivo (carente de partes móviles), cargado con un combustible formado en su mayor parte de metales como el sodio, al que solo se necesita alimentar con agua y del que solamente se extrae el hidrógeno puro que alimentará bajo demanda la pila de combustible ULPHE-PEM. Los cartuchos Metaliq son fácilmente reemplazables cuando se acaba el combustible, y recargables en una instalación apropiada, proporcionando el sistema una densidad energética en peso de unos 1.000 W.h/Kg muy superior a la de las otras alternativas de suministro de hidrógeno existentes en el mercado. El agua para el proceso irá almacenada en un depósito específico, el cual reutilizará también la que se produce en el cátodo de la pila.

El sistema está desarrollado por la empresa española Drage&Mate International, con la cual JALVASUB Engineering tiene firmado un acuerdo a nivel mundial para el desarrollo y suministro preferente de los sistemas METALIQ, desarrollados en base a sus dos patentes: 1) *A system for controlled on demand in situ hydrogen generation using a reciclable liquid metal reagent, and method used in the System*, con número de registro EP-2394953A1 y de fecha de publicación 13 de diciembre de 2011 y 2) *A system and a process for generating Hydrogen*, con número de registro EP-3095758A1 y de fecha de publicación 23 de noviembre de 2016.

El nivel de madurez tecnológica alcanzado por el sistema METALIQ para aplicaciones en UAV ha sido de un TRL7.

3. Aplicaciones en defensa y seguridad

A la vista de lo expuesto se considera, que los principales beneficiarios de los sistemas HYCOGEN deberían ser: el combatiente de a pie desplegado en operaciones (Programa SISCAP), los vehículos de apoyo a los mismos, y los vehículos no tripulados tanto aéreos (RPAS) como navales (de superficie USV ó submarinos UUV), por lo que a continuación vamos a analizar y hacer propuestas para los más urgentes:

3.1. Aplicación al combatiente de a pie (SISCAP)

1) Ya con el antiguo Programa COMFUT, se pretendía conseguir un combatiente individual integrado dentro de un pelotón o equipo, que fuera capaz de combatir en el campo de batalla digitalizado en el que operara la fuerza futura, previéndose que estaría equipado con modernos sistemas de protección, comunicación, mando y control, navegación, optrónica, así como de generación de energía y sostenimiento. El combatiente del futuro debería contar con enlace inalámbrico con el pelotón, conexión a través de Internet, visores para actuar de día y de noche, sensores para informar de su estado de salud, y un chaleco más ligero y resistente que ofreciera mayor protección y movilidad, todo lo cual requiere una importante cantidad de energía y potencia eléctrica. En consecuencia la generación, almacenamiento, distribución y gestión de la energía y potencia eléctrica debían diseñarse de forma que se minimizara el peso y volumen del sistema de energía transportado por el soldado.

Figura 4. Sistema Información y Comunicaciones del Combatiente.

En el mes de marzo del año 2017, IDS publicó un dossier bajo el titulo «Tecnologías del combatiente», en donde se analizaban los diferentes programas similares aparecidos en otros países como Alemania, EE. UU., Francia, Italia y Holanda, y se hablaba del nuevo Programa español SISCAP «Sistema de combatiente a pié», como una derivación del anterior programa del «Combatiente del futuro» (COMFUT).

El dossier de IDS analizaba otros aspectos mejorables como son el armamento, la protección pasiva, o el vestuario y equipo, pero quizás uno de los más interesantes sea el relativo a los «equipos de comunicaciones y electrónicos»: ***Los combatientes necesitan disponer de «conciencia situacional» adecuada a su cometido y situación para lo que deben recibir información, analizarla y difundirla. Esto implica disponer de equipos de comunicaciones, que deberán ser manejables y ligeros. Los diferentes componentes electrónicos requerirán disponer de generadores de energía con capacidad de producción autónoma de mayor capacidad y eficiencia, unificando en lo posible las fuentes de alimentación para los diferentes equipos. Otras soluciones para células de combustible como las basadas en SBH (Borohidruro de Sodio) ó AB (Ammonia Borane) ó los desarrollados sobre la base de sistemas de generación de hidrógeno, como la denominada DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), presentan unos costes razonables y tamaño reducido y pueden pro-***

porcionar energía suficiente para alimentar los dispositivos portátiles. Este último párrafo por extensión sería plenamente aplicable a los sistemas HYCOGEN, que pueden superar ampliamente a los sistemas SBH, AB o DMFC citados.

A partir de los datos recopilados por el grupo de investigación OTAN denominado SET-173, para sacar conclusiones sobre el Programa DSS, *Dismounted Soldier System*, analizando las diversas operaciones realizadas por los combatientes en Afganistán, así como el mix necesario de equipos de combate transportados según el tipo de misión, y los consumos eléctricos de cada uno de ellos, se ha llegado a establecer unas necesidades energéticas para cada combatiente individual de 20 W de potencia para una misión de 72 horas.

La solución que proponemos, por razones de redundancia incluye el uso de baterías recargables para los distintos equipos del combatiente (como hasta ahora se viene haciendo), pero en lugar de transportar baterías de repuesto para completar la misión, combinarla con un sistema portátil individual HYCOGEN de bajo peso y volumen y alta densidad energética, transportable por cada combatiente en una mochila o integrado en el uniforme de combate (a tal fin estamos en contacto con uno de los principales fabricantes de equipamiento de las FAS), que alimente a un cargador de baterías provisto con conectores normalizados para poder proceder a las recargas necesarias y en los momentos más apropiados, a lo largo de la duración de la misión.

En base a lo anterior, el «Sistema para el combatiente a pié» incluiría una pila ULPHE-PEMFC de 20 W, con una energía almacenada de unos 1.200 W.h, distribuidos en dos cartuchos METALIQ para mayor redundancia y seguridad, y con un peso aproximado total inferior a 2 Kg.

2) Adicionalmente al sistema energético relacionado con el combatiente individual de a pié arriba descrito, otro equipo que es bastante pesado de transportar en una mochila, además de requerir una importante alimentación de electricidad, a nivel sección, es la **radio portátil para comunicaciones AN/PRC-117G**, que tiene un consumo ≤ 2,5 Amps a 24,5 VDC (aproximadamente 60W), y un peso con baterías de 5,44 Kg.

Este equipo está actualmente alimentado con **baterías Li-ión del tipo BB-2590/U** de alta capacidad, que tienen un peso de 1,39 Kg, un voltaje de 30 V y proporciona 9,1 Amps.h (energía disponible = 230 W.h), lo que proporcionaría una autonomía de funcionamiento próxima a las 4 h, y una densidad energética en peso de alrededor de 170 W.h/Kg. En base a esta autonomía sería necesario transportar un gran número de baterías de repuesto para cumplir la misión.

Nuestra propuesta para este equipo incluiría un sistema compuesto por una pila ULPHE-PEM de 60 W, con una energía almacenada de 1.000 W.h en un cartucho METALIQ, con lo que manteniendo el mismo peso se obtendría una autonomía más de cuatro veces superior.

Figura 5. Cargador de Baterías Portátil PP-8498/U.

3) A nivel de sección, las Fuerzas Armadas de la OTAN llevan **cargadores de baterías portátiles BTC-70801 (PP-8498/U)**, para la recarga de baterías en operación. Actualmente, existen más de 3.000 efectivos en misiones en el extranjero que, a falta de sistemas energéticos centralizados como los del combatiente del futuro, necesitan recargar baterías constantemente para realizar su función. El cargador necesita alimentarse desde una red de corriente bien en tierra o desde un vehículo para operar. Sus características son: alimentación con CC. 22-28V, 15 A, alimentación con CA. 90-260 V, 47-420 Hz, 375 VA, y 12,5 Kg de peso. Es capaz de cargar de 2 hasta 8 baterías simultáneamente.

Con un peso equivalente, un sistema HYCOGEN compuesto por una pila de 60 W y una energía almacenada en cartuchos METALIQ de 3.000 W.h, podría cargar entre 32 y 40 baterías de forma autónoma.

4) Igualmente, los grupos de operaciones especiales en misiones ISR, con 12 efectivos y 72 horas de misión, necesitan disponer de grandes cantidades de energía para los equipos electrónicos de observación y comunicaciones, lo que actualmente supone disponer en sus mochilas de un gran número de baterías recargables. Con el fin de mejorar sus capacidades de misión, bien reduciendo espacio y peso o bien aumentando los equipos disponibles, sería conveniente contar con fuentes energéticas más eficientes, de un tamaño y peso compatible con su carga en mochila y de alta capacidad energética. Un **cargador de baterías portátil** con el sistema HYCOGEN de 60 W y 3.000 W.h podría cubrir esas necesidades. Esta solución sería también válida para otras fuerzas especiales, como el MOE, la FGNE de la Armada y el EZAPAC del Ejército del Aire.

3.2. Aplicación a los vehículos de apoyo

1) Las Fuerzas Armadas de la OTAN llevan también **cargadores de baterías sobre vehículo BTC-70836 (PP-8481B/U)**, para la recarga de baterías de equipos de comunicaciones en operación, con el vehículo en movimiento. El cargador necesita alimentarse desde las baterías del vehículo para operar. Sus características son: alimentación con CC. 22-28V, 15 A, alimentación con CA. 90-260 V, 47-420 Hz, 375 VA, y 15,7 Kg de peso. Es capaz de cargar hasta 16 baterías simultáneamente, pudiendo recargar cuatro BB-390 A/U en cuatro horas.

Con un peso equivalente, un sistema compuesto por una pila de 60 W y una energía almacenada en cartuchos METALIQ de 3.000 W.h, podría cargar entre 32 y 40 baterías de forma autónoma.

2) La empresa UROVESA está suministrando al E.T., UME e Iª de Mª un gran número de vehículos de alta movilidad tipo VAMTAC distribuidos a lo largo de varios años. Estos vehículos podrían ir provistos con una unidad de potencia auxiliar (APU), con capacidad de alimentar cargadores para recargar en forma aislada (independientemente de la batería del vehículo) varias baterías simultáneamente.

La potencia instalada y la energía disponible en la APU vendrían definidas en función de las necesidades de cada vehículo, pero se estima que podría ser suficiente un sistema HYCOGEN con una potencia de alrededor de 1 KW y una energía disponible de unos 12.000 W.h en corriente continua.

3) Igualmente los vehículos de alta movilidad táctica equipados con estructura Shelter para puestos de mando y control avanzados o para ambulancia, necesitan disponer de fuentes de energía para poder alimentar de forma aislada los sistemas de comunicaciones o de soporte vital. Hasta ahora, dependen de la corriente suministrada desde las baterías del vehículo, o desde un generador adicional, lo cual hace necesario su arranque haciendo al vehículo indiscreto y depender su operación de la disponibilidad de combustible. Sería deseable disponer de **unidades de potencia auxiliar** que pudieran suministrar energía a los equipos con independencia de la situación operativa del vehículo. A este fin, hemos estimado las necesidades de potencia eléctrica en unos 3 kW, a operar como mínimo durante más de 5 horas, lo que nos lleva a una necesidad de energía almacenada superior a los 15.000 W.h que podría ser proporcionada por nuestro sistema.

4) Este mismo sistema sería de aplicación para cubrir las necesidades en el caso de puestos móviles de mando avanzado y hospitales de campaña.

Referencias

1. *Dirección General de Armamento y Material. Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación. Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID-2015.*
2. *Calvo González-Regueral, Carlos. IDS eDossier n.º 1 Tecnologías del Combatiente; marzo 2017.*
3. *NATO AC/323(SET-173)TP/559 STO TECHNICAL REPORT: Fuel Cells and other Emerging Manportable Power Technologies for the NATO Warfighter- Part I: Power Sources for Manportable/ Manwearable Applications. Octubre 2014.*

4. *NATO AC/323(AVT-165)TP/543 STO TECHNICAL REPORT: Benefits and Barriers for Emerging Small Scale Power Sources. Agosto 2014.*
5. *EP 3 095 758 A1 European Patent Application. A System and a Process for generating Hydrogen. Drage & Mate International, S.L. Noviembre 2016.*
6. *Drage & Mate International -CONAMA 2014 «Tecnología Química para Sistemas Avanzados de Propulsión y Almacenamiento de Energía usando Hidrógeno» http://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/TFs%202014/1998969712_ppt_AGarrido.pdf*
7. *James Larminie Oxford Brookes University UK, Andrew Dicks University of Queensland Australia. «Fuel Cell Systems Explained» Second Edition.*
8. *Barreras F, Lozano A, LITEC, CSIC- Universidad de Zaragoza. «Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM».*

Diseño y desarrollo de una microrred para la gestión y el almacenamiento de energía eléctrica de origen renovable

Isorna Llerena, Fernando[1,*], López González, Eduardo[1] y Sáenz Cuesta, Jaime Luis[1]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Área de Energía. Ctra. Huelva-Matalascañas, km. 34. Mazagón (Huelva). Correos electrónicos: isornaf@inta.es (F.I.LL.); lopezge@inta.es (E.L.G.); saenzcl@inta.es (J.S.C.).

Email:

* Autor principal y responsable del trabajo; isorna@inta.es (F.I.LL.).

Resumen

El Laboratorio de Energía del Centro de Experimentación de El Arenosillo (CEDEA), perteneciente al Área de Energía del INTA, ha diseñado una instalación experimental para la evaluación y demostración de tecnologías electroquímicas para el almacenamiento de energía eléctrica de origen renovable, así como de otras tecnologías asociadas. Esta instalación experimental se forma a partir de una planta piloto para la producción de hidrógeno solar, en funcionamiento desde 1994, que ha experimentado sucesivas actualizaciones, incrementando el alcance y capacidades de esta instalación experimental.

En la actualidad, se dispone de una microrred en la que se combinan sistemas de generación de energía de origen renovable, sistemas de almacenamiento de esa energía eléctrica, diferentes consumos, tanto móviles (vehículos eléctricos) como estacionarios (la propia red del laboratorio y cargas eléctricas programables), y los correspondientes sistemas de monitorización, control y gestión de los flujos de energía entre los diferentes componentes de la microrred.

El objetivo de esta instalación es por tanto la demostración de tecnologías y componentes necesarios para una adecuada gestión de energías renovables, ajustando la generación a la demanda mediante la utilización de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica. Es una instalación que pretende ser flexible, y adaptarse a los requerimientos de diferentes proyectos en los que participa el Laboratorio de Energía del INTA.

Palabras clave

Microrred, energías renovables, almacenamiento de energía, sistemas híbridos.

1. Introducción

1.1. Definición de microrred

En los últimos años, las energías renovables han demostrado su capacidad para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, contribuir a la seguridad en el suministro de energía, y jugar un importante papel en la reducción de las emisiones de efecto invernadero. Sin embargo, en el uso de la energía renovable, un nuevo reto consiste en la generalización de una producción distribuida, donde la generación y el consumo, en gran medida, se producen en el mismo punto geográfico. A la disminución de la necesidad de grandes infraestructura se une la ventaja adicional de la disminución de las pérdidas por transmisión. Surge aquí el concepto de microrred [1].

Una microrred es un sistema de generación eléctrica bidireccional que permite la distribución de electricidad desde los proveedores hasta los consumidores, utilizando tecnología digital y favoreciendo la integración de las fuentes de generación de origen renovable, con el objetivo de optimizar la gestión, ahorrar energía, reducir costes e incrementar la fiabilidad [2].

Las microrredes son sistemas que integran la generación de electricidad y el almacenamiento energético y son capaces de reducir las pérdidas de transmisión y mejorar la eficiencia de utilización de electricidad y el calor. Normalmente están conectadas a una red centralizada convencional. Este único punto de conexión se puede desconectar, permitiendo que funcione de forma autónoma. Además, el sistema de gestión y generación inteligente permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [3].

1.2. Componentes de una microrred

- Generación renovable o no-renovable, en función del recurso energético (solar fotovoltaica, eólica, pilas de combustible, generadores convencionales, etc.).
- Almacenamiento, principalmente eléctrico, con posibilidad de integración de almacenamiento térmico (baterías, tecnología de hidrógeno, almacenamiento térmico, volantes de inercia, supercondensadores, etc,).
- Cargas, tanto eléctricas como térmicas, que pueden ser estacionarias o móviles (vehículos eléctricos).
- Sistemas de control: centrales, locales, comunicaciones, etc.

1.3. Ventajas de las microrredes

- Las microrredes permiten una mayor calidad del suministro, un mayor ahorro y una menor dependencia de la red de distribución.
- Podrían funcionar tanto conectados a la red pública de distribución como aisladas de la misma.
- Cercanía de la ubicación de las fuentes de generación y el aprovechamiento en red de los diversos sistemas de energía y calor aumentan considerablemente la eficiencia energética del conjunto.

- Las microrredes utilizan menos energía que los sistemas actuales de generación y distribución centralizada.
- Las microrredes reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero y potenciarían la implantación de energías renovables.
- Incluso los consumidores que no disfrutan de las ventajas directas de las microrredes también podrán beneficiarse de estos sistemas. Se debe a que un aumento en el uso de estas supondrá una reducción de costes de energía debido a la reducción de la demanda pico en la red de distribución.

2. Microrred experimental del laboratorio de energía de el arenosillo - CEDEA

2.1. Características principales

La microrred experimental del INTA es básicamente un sistema híbrido que integra sistemas de generación eléctrica, sistemas de almacenamiento y diferentes cargas, en AC y DC, conectados mediante un bus interno de 408 VDC, así como conexión a red de 230 VAC, correspondiente a la red que proporciona energía al Laboratorio.

El bus de DC, se encargará de interconectar los equipos con generación y cargas en DC, y vendrá impuesto por la tensión de operación de un banco de baterías.

Los generadores en DC corresponden a varios campos fotovoltaicos, a un aerogenerador, y pilas de combustible.

Los sistemas de almacenamiento de energía vendrán representados por las baterías y el uso de hidrógeno como vector energético, incluyendo su producción mediante electrólisis alcalina, almacenamiento en baja presión, hidruros metálicos y alta presión, y consumo a través de pilas de combustible.

En cuanto a la demanda, se contempla la interconexión e inyección desde el bus de DC a red mediante inversores monofásicos, así como una carga programable en corriente continua.

Todos los sistemas de generación y demanda serán monitorizados con sensores de tensión y corriente, con el objetivo de plantear distintas estrategias de gestión de la energía en base a valores empíricos medidos en tiempo real.

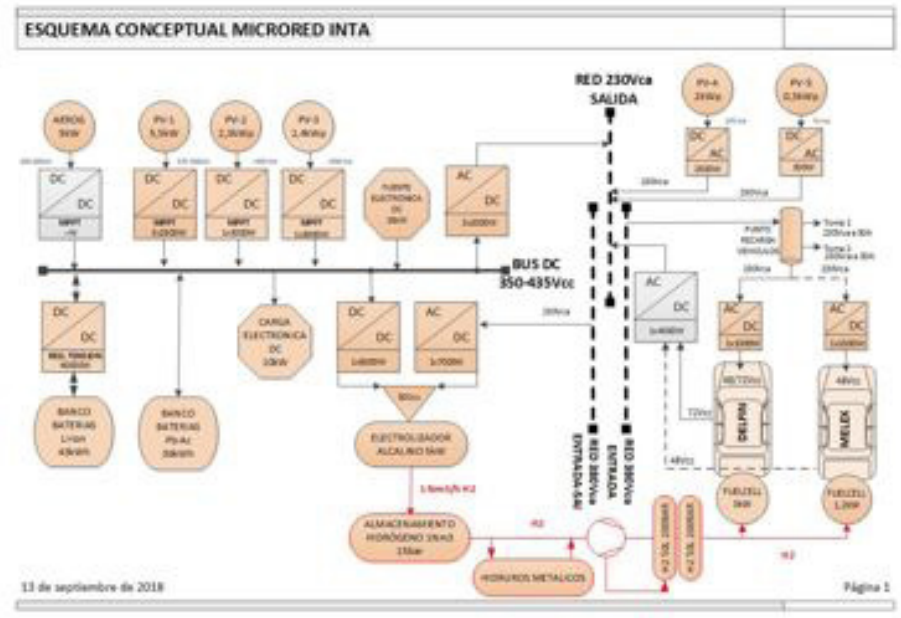


Figura 1. Diagrama de bloques de la instalación experimental.

2.2. Componentes

a) **Generación**

- Campo fotovoltaico 1: compuesto por 136 paneles BP60 de 60 Wp con una potencia total de 5200 Wp. Con una topología que garantiza una tensión de funcionamiento adecuada dentro del rango de trabajo de diseño de los convertidores tipo Boost (200 – 400 V) utilizados para la conexión al bus de la microrred.
- Campo fotovoltaico 2: se dispone de un campo fotovoltaico de paneles para integración arquitectónica, montados sobre superficie vertical en estructura especialmente diseñada para ello. Dicho campo fotovoltaico se compone de 15 módulos en serie de la marca Solar Innova modelo ESF-M-BIPV-GG-P156-40-161W de 161 Wp, teniéndose una potencia total de 2.415 Wp.

Figura 2. Campo fotovoltaico 1.

Figura 3. Campo fotovoltaico 2.

- Campo fotovoltaico 3: formado por paneles flexibles, montados sobre superficie inclinada a 37º sobre la horizontal. Dicho campo fotovoltaico se compone de 16 módulos en serie de la marca ENECOM modelo HF135 de 135 Wp, teniéndose una potencia total de 2.160 Wp.
- Campo fotovoltaico 4: con paneles montados sobre superficie inclinada a 37º sobre la horizontal. Este campo fotovoltaico se compone de 15 módulos policristalinos en serie de la marca Wuxi modelo SI-ESF-M- P156-125W de 125 Wp, teniéndose una potencia total de 1875 Wp.

Figura 4. Campo fotovoltaico 3.

Figura 5. Campo fotovoltaico 4.

- Aerogenerador: se trata de un aerogenerador trifásico de 230 VAC nominales de eje horizontal modelo AERO 5.000 W de 5 kWp. El aerogenerador dispone de freno electromagnético y método de orientación gracias al uso de un timón-cola. Debido a la tecnología usada, el aerogenerador no dispone de frenado aerodinámico, por lo que es necesario la monitorización de la velocidad del viento, con el objetivo de realizar un control de frenado mediante la variación de carga.

Figura 6. Aerogenerador.

b) Almacenamiento

- Banco de baterías de plomo-ácido: compuesto por 30 baterías en serie modelo UP-100 (12 V, 100 Ah) del fabricante U-Power de tecnología VRLA-AGM, según curvas de descarga suministradas por el fabricante (figura 10). La bancada de baterías de plomo ácido se encuentra directamente conectado al bus de DC, y es la encargada de mantener la tensión de operación y absorber y ceder energía en primera instancia. La conexión de estas baterías al bus se realiza a través de protecciones tipo fusible e interruptor contactor y magnetotérmico.

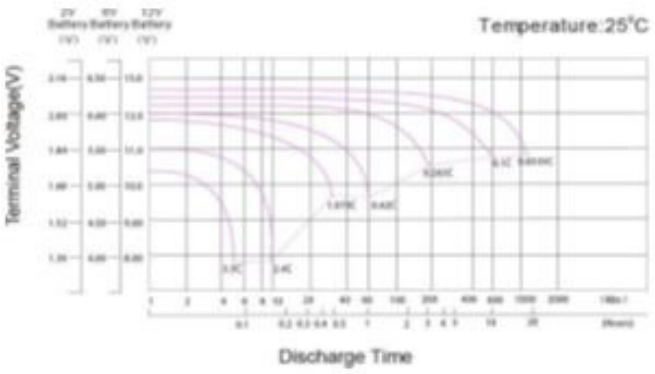


Figura 7. Curva de descarga de batería UP-100.

Figura 8. Bancada de baterías de plomo ácido.

- La bancada de baterías de ion Litio, compuesto de baterías de tecnología $LiFePo_4$ modelo ROOK3 del fabricante CEGASA está formada por 75 celdas en serie con una capacidad energética total de 43,2 kWh. Se encuentra conectada a través de un convertidor *buck-boost* bidireccional de 40 kWp con estrategia de seguimiento de tensión en torno a tensión de diseño del bus de continua. Dicho convertidor cuenta con protecciones contra sobrecorrientes y sobretensiones, y un protocolo de arranque y actuación ante diversos malfuncionamientos. La salida de los convertidores se conecta al bus de DC a través de protecciones tipo fusible e interruptor. De forma análoga, la bancada cuenta con una unidad de protecciones y control compuesta por un módulo BMS (*Battery Management System*) y una etapa de balanceo de celdas las cuales permiten desconectar, proteger y corregir desbalanceos excesivos entre baterías, así como situaciones de sobrecarga o sobredescarga.
- Electrolizador: de tecnología alcalina compuesto por 30 celdas, con una potencia máxima de 5 kW y un ratio máximo de producción de hidrógeno de 1 Nm^3/h. El hidrógeno producido es almacenado en un depósito de baja presión a 15 bar y es usado en la recarga de los vehículos con pila de combustible disponibles en el Laboratorio.

Figura 9. Bancada de baterías de Ion Litio.

Figura 10. Electrolizador alcalino.

c) Consumo

En este punto se incluye tanto la inyección en red mediante inversores como la utilización de una carga eléctrica programable para emulación de perfiles de consumo, así como los diversos vehículos eléctricos, híbridos a base de baterías y pilas de combustible y eléctrico a batería.

La inyección de energía a la red se realiza mediante tres inversores monofásicos de 3,3 kWp cada uno, limitados a 2 kW por programación. La conexión de los inversores al bus de DC se realiza a través de protecciones tipo fusible e interruptor.

Para permitir la simulación de perfiles de carga se dispone de una carga electrónica en corriente continua de la marca ADAPTATIVE POWER SYSTEMS modelo 5VP10-32. Dicho equipo dispone de dos rangos de potencia, uno inferior hasta los 1.000 W y uno superior hasta los 10 kW. El rango de tensión es único de 600Vcc. El rango de corriente es dual, de 32 A y 320 A.

Figura 11. Vehículos eléctricos híbridos.

Figura 12. Vehículo eléctrico y punto de recarga.

Figura 13. Imagen del sistema de control.

d) Sistema de adquisición de datos y control de la microrred

El sistema de adquisición y control está centralizado en un instrumento virtual desarrollado en la plataforma Labview en colaboración con la Universidad de Huelva. Dicho sistema SCADA permite tanto la monitorización de las variables eléctricas de los equipos como la actuación sobre distintos elementos de control que definen el encendido y apagado los mismos o consignas de potencia de trabajo. De manera adicional, se mostrarán todas las alarmas y errores asociados al malfuncionamiento de los distintos equipos, centrándose principalmente en condiciones de baja o alta tensión y corriente de funcionamiento.

La finalidad de este *software* es la integración y control de todos los equipos que forma la micro red experimental, de tal forma que sirva de soporte para el testeo e implementación de diferentes configuraciones y algoritmos de control y gestión de la energía eléctrica.

3. Resultados y discusión

Los principales elementos de la microrred se encuentran en fase de caracterización individual, operando cada uno en ensayos controlados para verificar sus prestaciones, conforme a las especificaciones iniciales. Hasta la fecha, se ha observado un funcionamiento satisfactorio en los sistemas de almacenamiento de energía en baterías e hidrógeno. Se está aún en fase de pruebas preliminares y ajuste de los convertidores DC/DC y DC/AC, como paso previo a la operación de toda la operación en su conjunto.

4. Conclusiones

Se dispone en el Laboratorio de Energía del INTA en El Arenosillo, Huelva, de una microrred experimental que integra sistemas de generación de energía eléctrica, de origen renovable; almacenamiento, en baterías (ion litio y plomo ácido) e hidrógeno (electrolizador, almacenamiento y pila de combustible) y diferentes cargas (edificios de laboratorios, vehículos eléctricos y cargas programables). En esta instalación experimental se ofrece soporte a diferentes proyectos de I+D en los que está involucrado el Laboratorio, relacionados con la evaluación de diferentes tecnologías y componentes en el almacenamiento y la gestión de energía eléctrica de origen renovable, en aplicaciones móviles y estacionarias, a la vez que se dispone de una instalación de ensayos adecuada para evaluar y ensayar equipos y sistemas de fabricantes del sector en condiciones reales. Los ensayos realizados hasta la fecha han permitido la evaluación de varios sistemas de almacenamiento de energía en baterías, y el desarrollo de componentes para el acondicionamiento de potencia en DC y AC.

Agradecimientos

La microrred experimental del Laboratorio de Energía del INTA en El Arenosillo, Huelva, se está implementando gracias a la financiación recibida en los siguientes proyectos:

- Ayuda de Fondos FEDER para Infraestructuras y Equipamiento Científico-Técnico (Subprograma Estatal de Infraestructuras Científicas y Equipamiento) convocada en el 2015 por el MINECO, correspondiente al Proyecto: «Instalación para I+D en tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica de origen renovable» (Referencia INTA15-CE-3771).
- Proyecto AGERAR «Almacenamiento y gestión de energías renovables en aplicaciones comerciales y residenciales», cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) dentro del Programa INTERREG V A España Portugal (POCTEP), con referencia 0076_AGERAR_6_E.

Referencias:

1. *Lasseter, R. H., 2002. Microgrids. IEEE Power Eng Soc Transm Distrib Conf, 305–8.*
2. *Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Canizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A. H., Gomis-Bellmunt, O., Saeedifard, A., Palma-Behnke, R., Jimenez-Estevez, G. A., Hatziargyriou, N. D., 2014. Trends in microgrid control. IEEE Trans on Smart Grid 5 (4).*
3. *Bidram, A., Lewis, F. L., Davoudi, A., 2014. Distributed control systems for small-scale power networks. IEEE Control Systems Magazine, 34 (6), 56–77.*

3B. Materiales

Evaluación de la integridad estructural en soldaduras de casco resistente de submarinos

Romero Valiente, Germán[1,*], Vicente Hernández, Manuel[2]

1 Jefe de Ingeniería del Astillero Dársena de Cartagena. Astillero Dársena de Cartagena NAVANTIA (Grupo SEPI), Carretera de La Algameca, s/n, 30205 Cartagena (Murcia). Correo electrónico: gromero@navantia.es

2 Ingeniero de Estructuras, responsable de Fabricación. Departamento de Ingeniería. Astillero Dársena de Cartagena NAVANTIA (Grupo SEPI), Carretera de La Algameca, s/n, 30205 Cartagena (Murcia). Correo electrónico: mvicenteh@navantia.es

* Autor principal y responsable del trabajo.

Resumen

Las soldaduras en el casco resistente de un submarino son críticas desde el punto de vista de la seguridad. Estas soldaduras son el resultado de unir aceros de alto límite elástico y se realizan en condiciones de alto embridamiento, que introducen un nivel de tensiones residuales elevado. Se requiere un conocimiento profundo de las propiedades de los materiales base y de las propias soldaduras para evaluar la integridad estructural de las mismas. Desde el punto de vista de calidad, los criterios de aceptación también son muy restrictivos y los ensayos no destructivos requeridos (END) muy demandantes.

El proyecto de I+D RENACESOL que desarrolla Navantia, tiene los siguientes objetivos: 1) desarrollar capacidades para evaluar la integridad estructural de soldaduras en submarinos; 2) definir criterios de aceptación de las soldaduras basados en requisitos de alto nivel; 3) implementar nuevas técnicas de END (basadas en ultrasonidos avanzados) como alternativa a las de radiografías.

Palabras clave

Tenacidad a la fractura (K), master curve, tamaños críticos de defecto, temperatura de referencia del material (T_o).

1. Introducción

Las soldaduras en el casco resistente de un submarino son críticas desde el punto de vista de la seguridad. Estas soldaduras son el resultado de unir aceros de alto límite elástico y se realizan en condiciones de alto embridamiento, que introducen un nivel de tensiones residuales elevado. Se requiere un conocimiento profundo de las propiedades de los materiales base y de las propias soldaduras para evaluar la integridad estructural de las mismas. Desde el punto de vista de calidad, los criterios de aceptación también son muy restrictivos y los ensayos no destructivos requeridos (END) muy demandantes.

El proyecto de I+D RENACESOL que desarrolla Navantia, tiene los siguientes objetivos: 1) desarrollar capacidades para evaluar la integridad estructural de soldaduras en submarinos; 2) definir criterios de aceptación de las soldaduras basados en requisitos de alto nivel; 3) implementar nuevas técnicas de END (basadas en ultrasonidos avanzados) como alternativa a las de radiografías.

La consecución de los objetivos del proyecto de I+D RENACESOL es muy beneficioso para la construcción de submarinos, ya que permitiría admitir defectos en las soldaduras que en otras circunstancias tendrían que ser reparados y por otro lado mejorar las condiciones de trabajo y la seguridad durante las inspecciones. La reducción del número de reparaciones de soldaduras y la eliminación de la necesidad de radiografías tiene un claro impacto en el ahorro de costes.

También existe un claro beneficio en el ciclo de vida puesto que la metodología validada ayudaría a predecir el crecimiento de defectos y por tanto a anticipar la necesidad de inspección evitando un fallo inesperado.

2. Desarrollo

El proyecto de I+D Renacesol de Navantia es un proyecto de cinco años que empezó en 2014.

2.1. Metodología propuesta

Los criterios de aceptación de las soldaduras de los códigos de diseño están basados en la experiencia acumulada y en buenas prácticas de construcción, pero en algunos casos pueden resultar muy demandantes en cuanto al número de reparaciones que implican. Reparar no implica una estructura más segura ya que dichas reparaciones pueden introducir mayores tensiones residuales y/o afectar al material base. Por tanto, considerar una aproximación en términos de adecuación al servicio (*fitness-for-purpose*) podría ser más apropiado para el diseño y la evaluación de soldaduras de casco resistente de submarinos.

Dicha aproximación, resumida en la figura 1, tratará de definir el tamaño máximo de defecto admisible durante la construcción. Para conseguirlo, es necesario considerar cómo dichos defectos crecerán durante el servicio del submarino y garantizar que, al final de la vida del casco resistente, se mantenga su capacidad de soportar las condiciones de diseño. Las condiciones a considerar son tanto estáticas (debidas a la inmersión) como dinámicas (debidas a una posible explosión submarina).

El casco resistente de un submarino experimentará durante su vida determinadas cargas que harán que los defectos crezcan a través del metal soldado y/o del metal base. El perfil operacional del submarino, que variará dependiendo de las misiones de las diferentes Armadas, generará cargas cíclicas que producirán el crecimiento de defectos por fatiga. Normalmente estas cargas están definidas, en condiciones de diseño, en términos de un equivalente de número de ciclos operando a la máxima profundidad, basado en el histórico de datos de operación del cliente. También puede generarse para un perfil definido, donde el número de ciclos para cada profundidad sea conocido, empleando una aproximación de daño equivalente.

El escenario de choque será considerado para calcular el tamaño de defecto crítico al final de la vida. Dicha carga de choque también proviene de los requisitos de las Armadas y se basa en las amenazas que se esperan afrontar. Se define un factor de choque considerando la masa (kilogramos equivalentes de TNT) y la distancia (*stand-off distance*) de la potencial carga explosiva al submarino.

La metodología que se propone puede ser utilizada para vincular los requisitos de alto nivel de las Armadas con los criterios de aceptación de soldaduras. La norma BS7910 [2] ha sido empleada como referencia básica de soporte para todo el proceso.

2.2. Uniones soldadas estudiadas

El proyecto está inicialmente enfocado a las principales soldaduras del casco resistente que afectan a la integridad estanca, es decir, las soldaduras a tope circunferenciales y longitudinales de la envoltura cilíndrica y cónica, los domos que cierran el casco resistente en los extremos de proa y de popa y las uniones en T de los pasos de casco (penetraciones de casco). Las uniones en T de las cuadernas del casco resistente, refuerzos transversales requeridos para resistir la carga externa y evitar el colapso prematuro, también son evaluadas. En una fase subsecuente del proyecto, serán analizadas otras soldaduras.

2.3. Datos de entrada

Como en cualquier aproximación de adecuación al servicio, deben considerarse tres aspectos principales: las condiciones ambientales, los materiales empleados y las tensiones aplicadas.

Condiciones ambientales

Tanto la temperatura como la naturaleza corrosiva del ambiente tienen un efecto en las condiciones de fractura de los materiales.

Cuanto menor es la temperatura, menor es la tenacidad a la fractura del material, por lo que en los análisis de mecánica de la fractura deben considerarse las temperaturas mínimas esperadas en las uniones.

Además, los ambientes corrosivos pueden tener influencia en la ley de crecimiento de grieta por fatiga y en el crecimiento de grieta bajo carga sostenida. En base a esto, en el caso del casco resistente del submarino se han considerado tanto el escenario de condiciones de corrosión libre en agua de mar como el de corrosión en agua de mar con protección catódica (con posibilidad de ambiente hidrogenado) en los ensayos de caracterización del material y en los cálculos.

Características del material

El material base se trata de un acero de alto límite elástico (templado y revenido). Para realizar análisis de integridad estructural es necesario conocer propiedades de las soldaduras adicionales a las que normalmente se evalúan para la calificación de procedimientos de soldeo, como son: 1) caracterización del comportamiento dúctil-frágil del material en términos de tenacidad a la fractura, 2) desarrollo de diagramas FAD (*Failure Assessment Diagram*), 3) definición de leyes de crecimiento de grieta (Paris-Erdogan), 4) cálculos/ensayos de tensiones residuales de soldadura.

Se requieren propiedades del material tanto en condiciones estáticas como dinámicas (alta velocidad de deformación). Las propiedades en condiciones estáticas son utilizadas en los cálculos en condiciones de operación, incluida la fatiga (crecimiento de grieta). Las propiedades en condiciones dinámicas son requeridas en escenarios de explosión submarina (choque).

La tenacidad a la fractura estática es obtenida mediante ensayos de master curve basados en la norma ASTM E 1921 [4]. La temperatura de referencia del material (T0) es obtenida a partir de los resultados de los ensayos y a partir de esta puede determinarse la tenacidad a la fractura del material (KIC) para cualquier temperatura de interés. Los valores de KIC se utilizan para calcular los tamaños críticos de defectos para las tensiones estáticas en escenarios operativos.

Previo a los ensayos de master curve, se han llevado a cabo ensayos Charpy con probetas KCV a diferentes temperaturas y en diferentes zonas de la soldadura. La temperatura de transición es obtenida para una energía de 27J. La temperatura de transición permite establecer una temperatura de partida para los ensayos de master curve.

Aunque es posible obtener valores de CTOD para una temperatura concreta a partir del valor de T0 obtenido en los ensayos de master curve, se han llevado a cabo ensayos CTOD específicos a diferentes temperaturas para validar estos resultados. Los resultados obtenidos han mostrado una buena correlación. Los valores de CTOD han sido utilizados para determinar las soldaduras más críticas que deberían ser evaluadas con ensayos adicionales (*flawed bulged explosion*, FBE) en la fase de validación.

Los cálculos de crecimiento subcrítico de grieta debido a tensiones operativas cíclicas durante la vida de la estructura requieren leyes de crecimiento de grieta (ley de Paris) como dato de entrada (por ejemplo los parámetros «C» y «m» de la ley de Paris y el valor umbral del rango de factor de intensidad de tensiones). La norma BS7910 [2] proporciona valores conservadores tanto para condiciones en aire como en agua de mar, no obstante los materiales han sido ensayados para obtener leyes específicas para los casos de estudio. Se ha ensayado tanto en aire como en agua de mar con protección catódica (ambiente hidrogenado).

El crecimiento de grieta bajo carga sostenida en agua de mar ha sido ensayado de acuerdo a ASTM E 1681 [3] para verificar si este efecto debe ser considerado en los cálculos de crecimiento de grieta o no.

Las propiedades mecánicas en tracción son necesarias en los cálculos de T0. Además los valores de límite elástico permiten calcular las tensiones residuales de acuerdo a los perfiles que se definen en la norma BS7910 [2]. Los valores de KIC y las propiedades mecánicas de tracción permiten construir los diagramas FAD.

Las propiedades dinámicas del material son necesarias para calcular el tamaño crítico de defecto en escenarios de explosión submarina (choque). La tenacidad a la fractura dinámica (K1d) se ensaya de acuerdo a la ASTM E 1921 [4] y las propiedades dinámicas en tracción se ensayan mediante el método de la barra de Split-Hopkinson.

Tensiones aplicables

Las tensiones primarias a considerar en cálculos de fractura son obtenidas mediante modelos de elementos finitos en las regiones del casco resistente donde se ubican las uniones soldadas.

Se consideran tensiones perpendiculares al plano del defecto, por lo que son de interés tanto las tensiones longitudinales como transversales en relación a la dirección de la unión de interés: las tensiones longitudinales cuando se evalúan defectos transversales a la soldadura y las tensiones transversales cuando se evalúan defectos longitudinales a la soldadura.

Las tensiones de flexión y de membrana se derivan a partir del perfil de tensiones a través del espesor por medio de modelos de elementos finitos y son implementadas en los cálculos de los factores de intensidad de tensiones.

Las tensiones residuales de soldadura son consideradas como tensiones secundarias en los análisis de fractura y son calculadas en base a la norma BS7910 [2]. Un valor constante equivalente al valor del límite elástico del material de aporte puede adoptarse como primera aproximación y cuando ciertos criterios se cumplen, se puede emplear el perfil de tensiones residuales propuesto por la norma.

2.4. Cálculos

Se han llevado a cabo cálculos para evaluar si un defecto existente (superficial o embebido) en una estructura puede ser aceptable o no.

Los defectos existentes son considerados como planos en los cálculos. A partir de las tensiones (primarias y residuales) y los bloques de carga cíclica (cargas de fatiga) en escenarios operativos, es posible predecir mediante la mecánica de la fractura el crecimiento de grieta de un defecto a lo largo de la vida del submarino. Son necesarios los rangos de factores de intensidad de tensiones y la ley de Paris para calcular el tamaño del defecto al final de la vida de la estructura.

Deben satisfacerse dos criterios para poder aceptar un defecto existente en la estructura: 1) el factor de intensidad de tensiones máximo debe ser menor que la tenacidad a la fractura a la temperatura de análisis durante la vida de la estructura en el escenario operativo; 2) el tamaño final del defecto al final de la vida de la estructura debe ser menor que el tamaño de defecto crítico calculado en el escenario de explosión submarina (carga de choque).

Los factores de intensidad de tensiones se han calculado en base a la norma BS7910 [2], considerando defectos superficiales y embebidos. Se han considerado las tensiones de flexión y de membrana (primarias) y las residuales (secundarias). Las tensiones primarias se obtienen mediante elementos finitos (MEF) y los perfiles de tensiones residuales están basados en los proporcionados por la norma BS7910 [2]. Entonces se calcula el crecimiento de grieta en base a la ley de Paris y los rangos de factores de intensidad de tensiones.

El factor de intensidad de tensiones se calcula al final de la vida de la estructura y es comparado con la tenacidad a la fractura estática a la temperatura de análisis (obtenida a partir de la temperatura de referencia del material).

El CTOD en condiciones dinámicas puede calcularse a partir del límite elástico dinámico y del K1d. Entonces se obtiene el tamaño crítico de defecto para un defecto a través del espesor. A partir de este puede calcularse un tamaño crítico de defecto equivalente para otros tipos de defectos tanto superficiales como embebidos. El tamaño de defecto al final de la vida de la estructura se compara con el tamaño crítico de defecto. Si este es menor al crítico, entonces el defecto existente en la estructura es aceptable.

2.5. Validación

Han sido definidos una serie de ensayos de validación para verificar: 1) crecimiento subcrítico de grieta en soldaduras bajo tensiones primarias cíclicas de compresión (ensayos de fatiga); 2) tamaños críticos de defectos en escenarios de explosión submarina (ensayos de explosión).

Ensayos de fatiga

El objetivo principal de los ensayos de fatiga es verificar el crecimiento subcrítico de grietas bajo cargas cíclicas de compresión en las uniones a tope, circunferenciales y longitudinales del forro del casco resistente.

La norma BS7910 [2] requiere emplear el rango de tensiones completo para los cálculos de crecimiento de grieta, incluso para cargas primarias de compresión. Esto se basa en la asunción de que las tensiones residuales adquieren valores del orden del límite elástico del material.

Aunque los niveles de tensión en el casco resistente pueden ser altos, la norma BS7910 [2] parece ser demasiado conservadora al asumir el rango completo de tensiones de cargas cíclicas en compresión y no tener en consideración el perfil de tensiones residuales en el espesor. Por tanto podría proponerse una aproximación menos conservadora basada en rangos de factores de intensidad de tensiones en lugar de rangos de tensiones primarias. Dicha aproximación considera la posibilidad de que no haya crecimiento de grieta (o que este sea menor) cuando ocurran tensiones primarias predominantes en compresión.

Es deseable ensayar probetas a escala real, pero ello no resultó factible en una primera aproximación, considerando las capacidades disponibles en los laboratorios de ensayo, por lo que se han empleado probetas prismáticas más delgadas.

Se han fabricado cupones soldados de dos espesores diferentes (14 mm y 23 mm), de los cuales se han mecanizado probetas prismáticas (100 x 100 mm aprox.) a las cuales se les ha practicado un prefisurado (grieta superficial).

Se han efectuado dos tipos de ensayos de fatiga en probetas soldadas: 1) grietas superficiales transversales a la dirección de soldadura: 2) grietas superficiales paralelas a la dirección de soldadura.

Se han ensayado cinco probetas de cada tipo. Las tensiones de compresión se han aplicado siempre perpendicularmente al plano del defecto. Se han aplicado diferentes niveles de tensión a compresión para cada tipo de probeta, basado en los análisis de tensión del casco resistente.

Las probetas ensayadas no evidencian crecimiento de grieta para las tensiones de interés. Sin embargo, se llevarán a cabo más investigaciones para confirmar este comportamiento, concretamente se pretende medir tensiones residuales en las probetas prismáticas para verificar si existe una relajación durante el corte, el prefisurado y/o durante el ensayo.

Ensayo de explosión

Puede verificarse que el escenario de explosión submarina es el que determina el tamaño crítico de defecto, antes que las cargas operativas.

El objetivo de los ensayos de explosión es demostrar el nivel de conservadurismo en la metodología de cálculo de las soldaduras de interés.

Se han llevado a cabo ensayos *Flawed Bulge Explosion* (FBE) basados en la norma DEF STAN [5]. Se ha considerado que los ensayos FBE se ajustaban mejor a este propósito en relación a otro tipo de ensayos de explosión [1].

Se realizan ensayos de Charpy previos y en base a los resultados de cristalinidad es posible evaluar la probabilidad de éxito de los ensayos FBE.

Dos paneles soldados son ensayados para cada soldadura de interés. Todos los paneles soldados son prefisurados por fatiga hasta alcanzar el tamaño de defecto verificado por medio de la metodología propuesta para el cálculo de tamaños críticos de defectos.

La carga para la explosión submarina se calibra en paneles sin soldar de modo que se alcance un valor de deformación plástica requerido para el espesor y material que se trata.

Los ensayos son efectuados a la temperatura de diseño en el material, el cual se enfría a una temperatura inferior, antes de la inmersión. La temperatura del material es controlada durante el ensayo. Cuando esta alcanza el valor de diseño, entonces tiene lugar la explosión.

Si no ocurre la extensión de la grieta tras la explosión, la soldadura ensayada se considera que ha pasado el ensayo y la metodología para los cálculos de tamaño crítico de defecto podría ser empleada para otros espesores y temperaturas diferentes a los ensayados, considerando uniones soldadas con el mismo procedimiento de soldeo que el ensayado.

Han sido ensayadas satisfactoriamente tres soldaduras.

2.6. Próximos pasos

El proceso de validación está proporcionando informaciones que requieren trabajos adicionales en relación a la caracterización del material, además de los propios ensayos de validación, por tanto las próximas actividades serán: 1) Completar la caracterización del material. Ensayos de tracción a baja velocidad de deformación en probetas con entalla para verificar que el material no es susceptible al crecimiento de grieta bajo carga sostenida aplicada por efecto del medio ambiente (agua de mar). Ensayos adicionales de K1d para el metal de soldadura, para investigar la tenacidad a la fractura dinámica del material de manera conjunta con los ensayos de explosión. Ensayos adicionales de crecimiento de grieta por fatiga para confirmar las leyes de Paris obtenidas con anterioridad en soldaduras. 2) Completar los ensayos de validación. Medición de tensiones residuales de soldadura en probetas prismáticas, para verificar si ha habido una relajación significativa de las mismas durante su extracción a partir de los cupones soldados. 3) Completar el desarrollo de nuevos criterios de aceptación basados en la metodología descrita anteriormente para soldaduras de interés. 4) Desarrollar procedimientos de inspección basados en ultrasonidos avanzados (por ejemplo *phased array* y ToFD) en sustitución de las radiografías.

3. Figuras

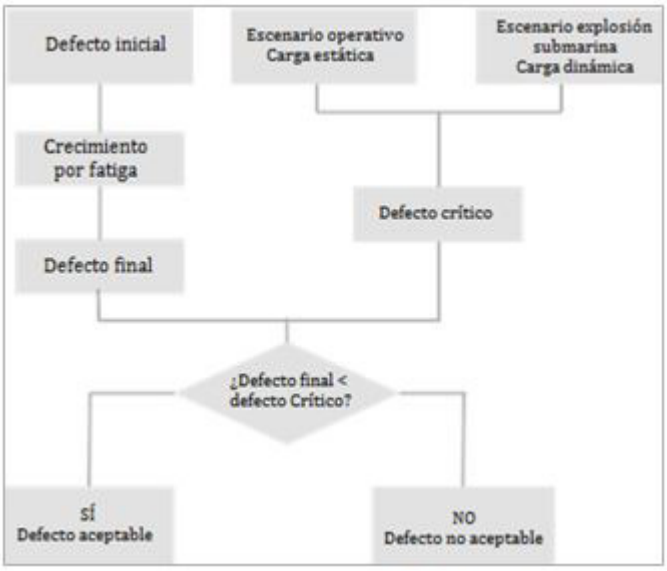


Figura 1. Visión general del proceso de evaluación de un defecto en una soldadura del casco resistente.

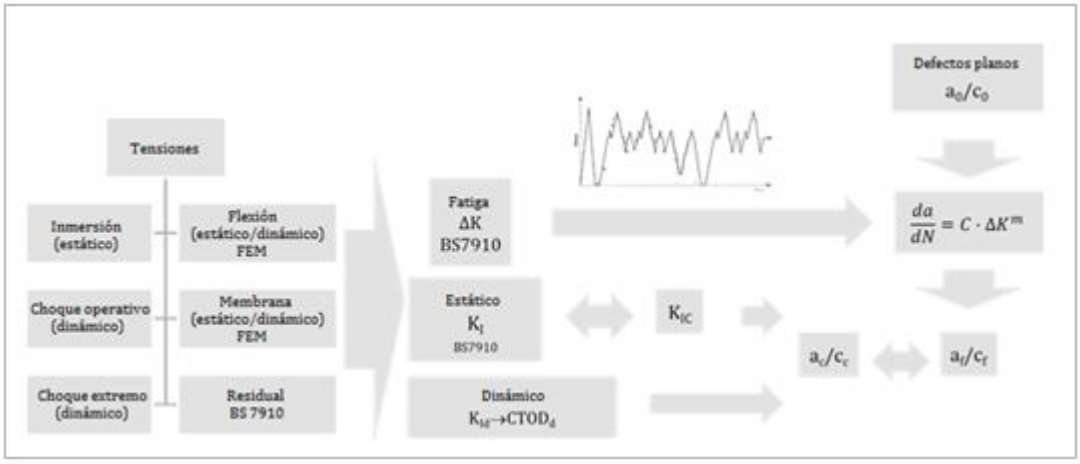


Figura 2. Metodología de cálculo.

Referencias

1 *Sumpter, J. D. G., Fracture avoidance in submarines and ships. Advances in Marine Structures -2, Ed Smith and Dow, Elsevier, 1991.*

2 *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, BS 7910:2013+A1:2015.*

3 *Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials, ASTM E 1681 – 03.*

4 *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, To, for Ferritic Steels in the Transition Range, ASTM E 1921 – 13A.*

5 *Welding and Fabrication of High Strength Steels Part 2 Approval of Welding Procedures for Submarine Construction and Upkeep. DEF STAN 02-770 Pt 2.*

Estudios de simulación y de campo de la influencia en la resistencia balística de acero tratado con poliurea

De Zavala Díaz, Carlos[1,*], Laguna Iglesias, Manuel[1], Loya Lorenzo, José Antonio[2], Tortosa del Carpio, Julio Roberto[3]

1 Escuela Técnica Superior de Armas Navales (ETSIAN), C/ Arturo Soria 287, 28033, Madrid, España. czavdia@gmail.com (CZD); mlagigl@fn.mde.es (MLI).

2 Universidad Carlos III de Madrid (UC3M). Avda. de la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid, España. jloya@ing.uc3m.es (JALL).

3 Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA). jtordel@et.mde.es: (JTC).

* Autor principal y responsable del trabajo: czavdia@gmail.com (CZD).

Resumen

Este trabajo estudia la influencia en la resistencia balística de un acero al ser recubierto con poliurea, con vistas a desarrollar un material compuesto multilaminar heterogéneo. Para ello, se utilizó el código de elementos finitos ABAQUS/Explicit con objetivo de predecir las respuestas dinámicas de los materiales implicados ante las cargas consideradas, indicando la manera más adecuada de cómo disponerlos. Posteriormente, se realizaron ensayos balísticos en laminados de placas de acero recubiertas de poliurea con distinta configuración. Se analizaron los efectos en relación con el impacto y las fuerzas de unión entre la poliurea y el acero, comparando los resultados obtenidos con los calculados numéricamente.

Palabras Clave

Blindaje multilaminar, elementos finitos, acero con poliurea.

1. Introducción

A lo largo de toda la historia, se han desarrollo episodios que marcaron el curso de la humanidad. Citemos ejemplos, como la I y II Guerra Mundial, pues además de ocasionar cambios significativos a nivel mundial, permitió que aspectos como las municiones y otros recursos de ataque o defensa se perfeccionaran.

Durante los últimos años, científicos e ingenieros han mostrado un creciente interés por la solución de problemas relacionados con el impacto de sólidos. Se trata de una disciplina ampliamente estudiada sobre todo en el campo militar (vehículos terrestres, aeronaves o protección personal). Los avances en el desarrollo de armas y municiones de gran capacidad de penetración han supuesto la imposibilidad de los materiales tradicionales de protección para afrontar con éxito estas nuevas amenazas.

En resumen, durante siglos las personas han tratado de protegerse de cualquier elemento que pueda suponer una amenaza, como los proyectiles. Estas protecciones han evolucionado desde escudos hechos de cuero o de madera, a los de acero, con metales especiales, etc. Esta progresión se ha producido conforme ha ido evolucionando también el tipo y la velocidad de los proyectiles utilizados en el combate.

Como punto de inicio podemos decir que existe la necesidad ineludible de la búsqueda de nuevos materiales que sean capaces de satisfacer los requerimientos de diseño y fabricación de estructuras más ligeras, a la vez que resistentes. El tipo de protección requerida es acorde al tipo de proyectiles que se esperan recibir. Actualmente la protección se basa en protegerse frente a proyectiles de alta velocidad o de gran capacidad de perforación.

Los materiales compuestos multicapa abren nuevas posibilidades a la hora de conseguir prestaciones inalcanzables para los materiales tradicionales. La utilización de materiales de distinta naturaleza, combinados a una escala adecuada y con una organización jerárquica de sus componentes da lugar a la aparición de propiedades no cubiertas por los materiales tradicionalmente empleados en diversas ramas de la ingeniería [1,2].

2. Desarrollo

Para realizar este trabajo se han empleado varios materiales con propiedades mecánicas diferenciadas. Una vez estudiadas sus capacidades por separado, se ha analizado cómo combinarlos para finalmente extraer alguna posible conclusión acorde a los resultados obtenidos.

El desarrollo de este trabajo consiste en el estudio de la influencia en la resistencia balística de un acero recubierto con poliurea, con vistas a desarrollar un material compuesto multilaminar heterogéneo. Para ello se ha llevado a cabo un estudio bibliográfico, un desarrollo numérico (computacional) y el análisis de la balística de efectos realizada en Polígono de Experiencias.

Para poder tener un mejor conocimiento de la colocación de los distintos elementos que forman un material compuesto, una buena solución es simular su comportamiento con un programa informático de elementos finitos. En este caso, se ha empleado el código comercial de elementos finitos ABAQUS/Explicit.

Con todo lo anterior, que reúne el conocimiento básico del comportamiento de los materiales implicados que indica la manera más adecuada de cómo disponerlos. Junto a la bibliografía consultada, sirve de base para diseñar y fabricar diferentes modelos de «blindajes».

La elección de los prototipos a fabricar es una de las tareas planteadas al comenzar este trabajo. Para los modelos fabricados, se ha buscado algún blindaje con el que cuenta la Armada y que se pueda utilizar como referente en este trabajo, teniendo en cuenta los materiales disponibles en el mismo. De esta manera, se pretende fabricar un material compuesto lo más parecido posible al blindaje empleados en los puestos de tirador en los alerones de las fragatas tipo «Santa María», donde se instalan unos manteletes con el fin de dar seguridad a los tiradores en caso de recibir disparos de armas de pequeño y mediano calibre.

Una vez decididos los materiales a vamos a utilizar (acero y poliurea) y el espesor que debe tener el material compuesto resultante, se han desarrollado varios tipos de composiciones para, de esta forma, poder extraer resultados.

Antes de comenzar a realizar los ensayos en el programa computacional. Debido a la experiencia, a las distintas fuentes bibliográficas consultadas [3,4] y a la complejidad en el uso de este tipo de programas, se debe tener presente que existen numerosos factores que pueden influir en los resultados a analizar (tipo de mallado, forma geométrica del proyectil y del blanco, caracterización del material, implementación de modelos constitutivos y de fallo, etc.), siendo fundamental el proceso de calibración numérica de los modelos empleados.

De este modo, conforme a los resultados obtenidos en la parte computacional y al estudio bibliográfico llevado a cabo, se fabrican siete modelos de blindaje atendiendo a combinaciones distintas entre acero y poliurea.

La parte experimental consistió en la fabricación y preparación de probetas para la realización de ensayos balísticos, con el fin de investigar el comportamiento de los diferentes modelos frente a cargas de alta velocidad de deformación y examinar las respuestas dinámicas de las placas de acero recubiertas de poliurea. Se analizaron los efectos según los espesores de poliurea, la ubicación del recubrimiento en relación con la carga y las fuerzas de unión entre la poliurea y el acero bajo impacto de alta velocidad. De la misma manera, se pudieron comparar los resultados extraídos con los calculados numéricamente.

3. Listas, figuras y tablas

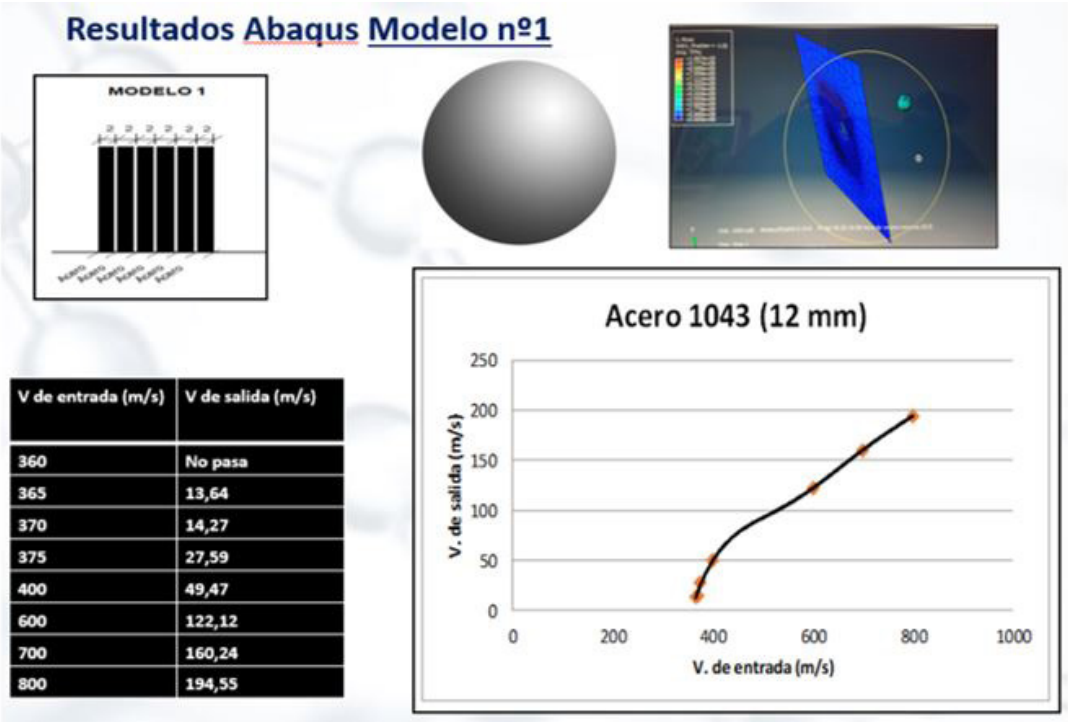


Figura 1. Representación gráfica y animada de resultados del ABAQUS del modelo n.º 1 (acero multicapa 12 mm) [5].

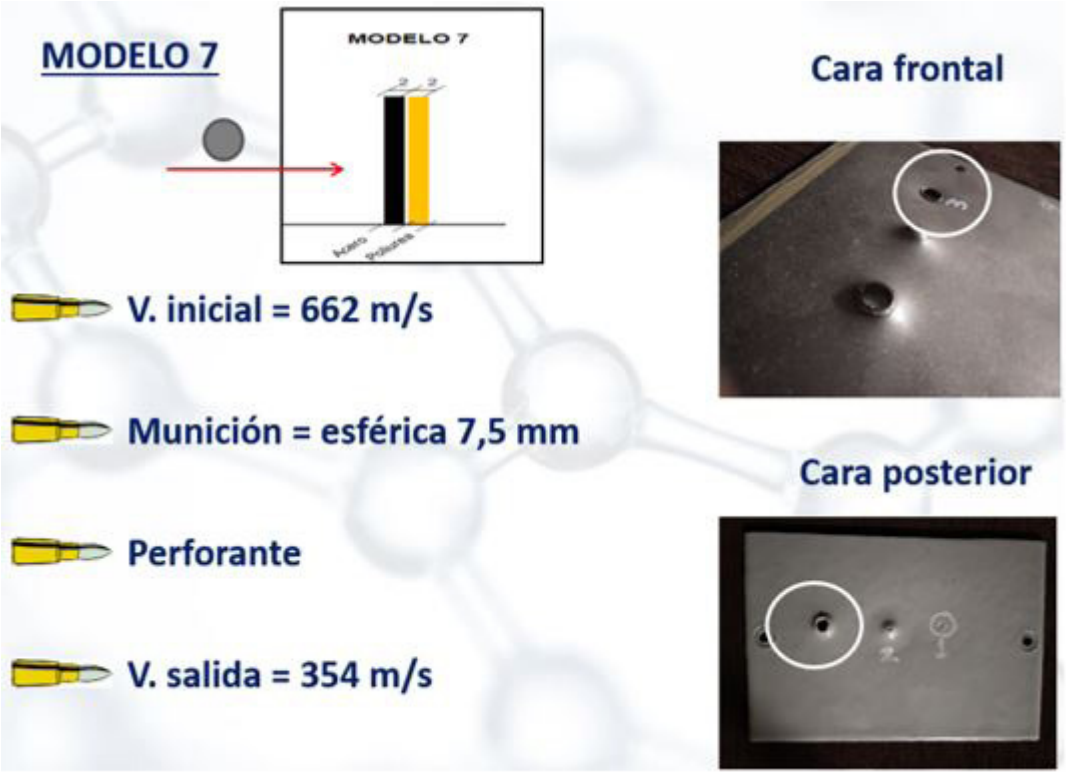


Figura 2. Resultados obtenidos en la parte experimental correspondiente al modelo n.º 7 (2 mm de espesor de acero AISI 1043 + 2 mm de espesor poliurea) [5].

(12 mm) $V_o \approx$ 800m/s	MODELO 1	MODELO 2
Peso	Materiales Acero	Materiales Acero Poliurea 28,3 %
Penetración	Profundidad del orificio ≈ 7mm Deformación de la chapa en su parte posterior 1,2 mm	Profundidad del orificio≈ 8 mm Deformación de la chapa en su parte posterior 1,8 mm
Perforación	NO	NO
Sellado	NO	SI
Resistencia (F_r)[7]	≈ 78 x 10^3 N	≈ 74 x 10^3 N

Figura 3. Resultados y comparación entre los modelos n.os 1 y 2 (modelo de acero monolítico y modelo multicapa de acero y poliurea) [5].

4. Resultados y discusión

Finalmente, después de todo lo desarrollado en este trabajo, procedemos a comparar, analizar y comprobar los efectos en la resistencia balística de acero tratado con poliurea.

5. Conclusiones

Según el estudio realizado, el uso de la poliurea como material de refuerzo en acero en un material multilaminar posee una gran capacidad de resistencia al impacto. Comparado un material formado por acero monolítico frente al acero multilaminar con poliurea, este presenta casi de la misma resistencia al impacto pero con una importante reducción de peso.

Se ha comprobado que la poliurea presenta muy buenas capacidades de absorción de energía y resistencia al impacto gracias a su resistencia a la tracción, y sobre todo de elongación, confiriendo una recuperación extrema al sufrir un impacto. Podemos pensar, de la misma manera, que se comporta bien protegiendo a las superficies del desgaste.

Tal y como se deduce de la parte computacional, y de la misma manera que también lo avala la bibliografía consultada [3], se ha verificado que es más efectivo el uso de la poliurea como revestimiento en la cara frontal de un material que en su cara opuesta para las condiciones experimentales realizadas. En los ensayos realizados se ha observado que este hecho produce una disminución de la velocidad de salida considerable al absorber gran parte de la energía.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración establecida entre ETSIAN, UC3M e INTA, que ha permitido impulsar esta línea de investigación, y muy especialmente al apoyo recibido desde ARTLUX EUROPA, responsable de la elección del tipo de poliurea y su proyección sobre las probetas. Además, agradecen la financiación parcial recibida del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto DPI2017-88166-R.

Referencias

1. *M. Laguna y A.J. Vázquez. «Estudio preliminar sobre la resistencia al impacto de un material multilaminar», 1998.*
2. *T.N. Alejandro de Ory Guimerá. «Blindajes – Optimización de blindajes para munición de armas ligeras.» Proyecto fin de carrera ETSIAN, mayo 2016.*
3. *Chien-Chung Chen «A study of blast effects on polyurea coated steel components». The Pennsylvania State University, The Graduate School College of Engineering 2009.*
4. *C.Z.Duan, T.Dou, Y.J.Cai, Y.Y.Li, «Finite Element Simulation and Experiment of Chip Formation Process during High Speed Machining of AISI 1045 Hardened Steel,» International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 1, No. 5, May 2009.*
5. *T.N. Carlos De Zavala Díaz. «Estudio de la mejora en la resistencia balística de acero tratado con poliurea» Proyecto fin de carrera ETSIAN, Mayo 2018.*

Evaluación del daño en muros de ladrillo con diferentes refuerzos a escala real tras una explosión

Chiquito Nieto, María[1,*], López Sánchez, Lina M.[1], Castedo Ruiz, Ricardo[1], Santos Yanguas, Anastasio P.[1], Pérez-Caldentey, Alejandro[2], Martínez Almajano, Santiago [3] y Ropero Azañón, Miguel A.[4]

[1] E.T.S.I. de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid. C/Ríos Rosas Núm. 21, C.P. 28003, Madrid. Correo electrónico: maria.chiquito@upm.es (MCN), lina.lópez@upm.es (LML), ricardo.castedo@upm.es (RCR) y tasio.santos@upm.es (APS).

[2] Fhecor Ingenieros Consultores. Calle del Barquillo, 23, 28004 Madrid. Correo electrónico: apc@fhecor.es (APC).

[3] Escuela Politécnica Superior del Ejército. C/ Joaquín Costa Núm. 6, C.P. 28002, Madrid. Correo electrónico: smalmajano@et.mde.es (SMA).

[4] Centro LABINGE – INTA. C/ Princesa Núm. 36-38, C.P. 28008, Madrid. Correo electrónico: roperoama@inta.es (MRA).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: maria.chiquito@upm.es (MCN).

Resumen

El objetivo de este trabajo es la comparación de diferentes soluciones constructivas para mejorar la integridad de muros de fábrica de ladrillo contra explosiones moderadas. Este tipo de elementos constructivos genera en muchos casos, cuando no se produce el colapso de la estructura, un gran número de víctimas debido al desprendimiento de fragmentos. Para este propósito, se construyeron 16 muros a escala real. La carga explosiva para los ensayos varió desde 18 hasta 38 kg, y se ubicó a 5 m del objetivo. La distancia escalada fue calculada para que el daño en los muros fuera intermedio a fin de detectar diferencias entre las soluciones probadas. Se ensayaron tres alternativas de refuerzo: un mortero a base de cal con fibras, una malla de fibra de carbono reciclada impregnada con una resina epoxi y una malla polimérica de fibra de vidrio aplicada con una resina de imprimación. El daño resultante se ha evaluado a ambos lados del muro a través de 20 puntos definidos sobre ellos utilizando un esclerómetro. Se han creado mapas de daño para cada muro mediante interpolación de los puntos evaluados y se ha obtenido el valor del daño medio. El daño también se ha evaluado en términos de *spalling*. De acuerdo con los resultados, los refuerzos influyen significativamente en la respuesta.

Palabras clave

Muros de ladrillo, daño, explosión, ensayos a escala real.

1. Introducción

Aunque la amenaza terrorista no es un problema nuevo, en los últimos años hemos experimentado un cambio tanto en la manera de llevar a cabo los ataques terroristas como en las localizaciones en las que se producen. Hoy en día, cualquier edificio de uso civil como un colegio, un teatro o incluso un hospital se pueden convertir en objetivo de un atentado. Debido a esto se plantea un nuevo reto para la comunidad científica. Mejorar la resistencia de los muros de fábrica en los edificios resulta tan importante como asegurar la integridad de los mismos ya que, cuando la estructura no colapsa, los muros de fábrica se convierten en la principal fuente de víctimas y heridos por fragmentos [1]. Además, la búsqueda de soluciones que mejoren la respuesta de los muros de fábrica debe ser tal que pueda aplicarse en edificios existentes y no solo en nuevas construcciones [2].

Existen numerosos trabajos sobre refuerzos de estructuras, pero solo un reducido número de ellos presenta ensayos con explosivos a escala real [3] sobre muros de ladrillo. Trabajar a escala real es fundamental para la validación de los resultados.

El objetivo de este trabajo es la comparación de diferentes soluciones constructivas de refuerzo que son candidatas a mejorar la respuesta de los muros de ladrillo frente a explosiones moderadas. Dichas soluciones se pueden aplicar de manera sencilla tanto en edificios nuevos como en estructuras existentes.

2. Descripción de los ensayos

Se han realizado cuatro ensayos a escala real utilizando tres soluciones de refuerzo diferentes en cada ensayo. Además, en cada ensayo se ha colocado un cuarto muro sin ningún tipo de protección para poder comparar y evaluar el comportamiento de las diferentes soluciones. La carga se sitúa centrada, a cinco metros de distancia de los cuatro muros. Los ensayos uno y tres (T1 y T3) tenían la misma disposición con la solución de refuerzo colocada en la cara exterior de los muros, que es la cara expuesta directamente a la carga explosiva. Por el contrario, en los ensayos dos y cuatro (T2 y T4), la solución de refuerzo se colocó en la cara interior, que es la cara opuesta. Todos los muros se anclaron únicamente por la parte superior mediante un perfil de acero soldado a una estructura soporte (también de acero). La parte inferior del muro se apoya directamente en el suelo, soportando su propio peso, simulando la sujeción normal o habitual de cualquier muro. La figura 1 muestra la disposición de los ensayos.

2.1. Distancia escalada y carga explosiva

El método más difundido para escalar los parámetros de las explosiones se basa en el escalado mediante raíz cúbica. Este método establece que se producen ondas de presión similares a una distancia escalada z:

$$z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

Donde *R* es la distancia desde el explosivo y *W* es la masa de la carga. Atendiendo a trabajos publicados sobre muros de fábrica de ladrillo [4, 5, 6], un muro sin refuerzo podría colapsar si la distancia escalada es inferior a 1,82 m/kg$^{1/3}$. La distancia escalada seleccionada inicialmente para el ensayo uno (T1) fue 1,91 m/kg$^{1/3}$ ya que el objetivo era conseguir un daño intermedio para poder observar diferencias en la respuesta de las soluciones. Este valor se fue reduciendo progresivamente (1,71 m/kg$^{1/3}$ para T2 y T3 y 1,49 m/kg$^{1/3}$ para T4) para incrementar el daño en los muros.

El explosivo utilizado fue de tipo Dinamita – un explosivo civil con un equivalente TNT experimental basado en presión de 0,79. La forma de la carga fue aproximadamente cilíndrica y se inició en el centro mediante un detonador convencional. La masa explosiva se situó sobre un soporte cúbico de porexpan de manera que la altura de la carga (*i.e.* la distancia desde el centro de la carga al suelo) fue 50 cm para el T1 y 70 cm para el T2, T3 y T4.

2.2. Datos constructivos

Se han construido 16 muros a escala real para los ensayos. Todos los muros medían 2,5 m de largo por 2,5 m de alto y tenían un espesor de 240 mm. Se construyeron con ladrillos cerámicos unidos mediante un mortero estándar. Además, se colocaron tres soluciones de refuerzo diferentes desarrolladas por MAPEI ®. Cada solución se colocó en cuatro muros diferentes.

Solución A: es un mortero de revoco micro-armado a base de cal hidráulica natural NHL libre de cemento y con fibras poliméricas que sustituyen a cualquier red de refuerzo.

Solución B: malla de fibra de carbono bidireccional de alta resistencia con un adhesivo tixotrópico epoxídico bicomponente que tiene una consistencia semifluida para la impregnación mediante «sistema en seco».

Solución C: tejido bidireccional de fibra de vidrio con un adhesivo monocomponente «listo para usar» a base de dispersión poliuretánica al agua.

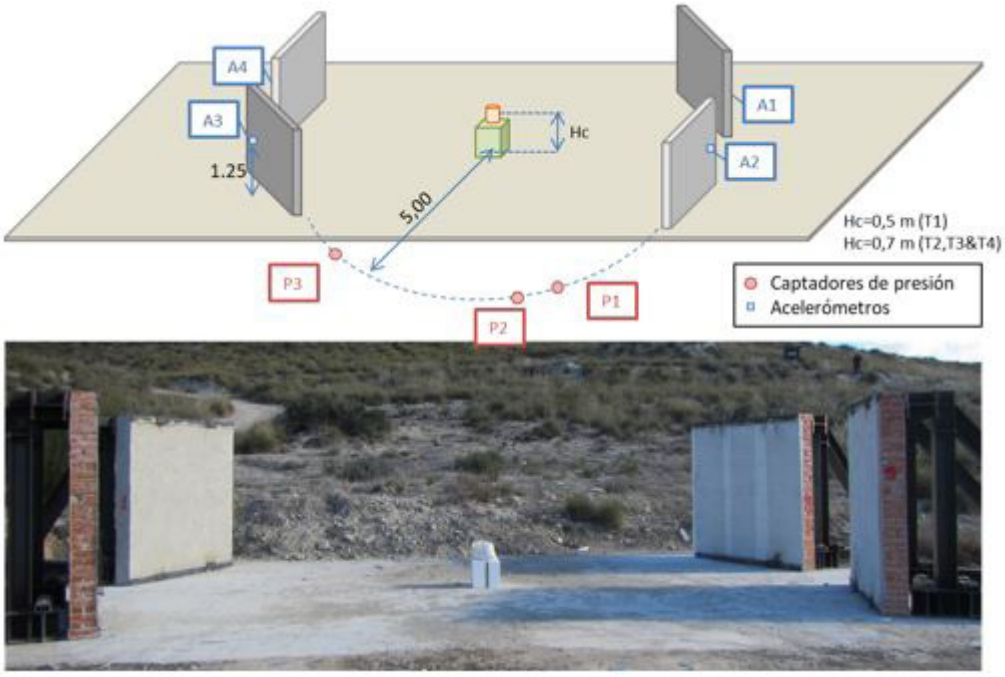


Figura 1. Disposición de los ensayos.

2.3. Instrumentación

Con el objetivo de caracterizar la explosión, los ensayos fueron monitorizados con captadores de presión, acelerómetros, cámara de alta velocidad y cámaras convencionales. La figura 1 muestra la posición de los captadores de presión y acelerómetros. Se colocaron tres captadores de presión (P1 a P3) situados

en el suelo a la misma distancia de la carga que los muros (5 metros) de modo que registraran la presión incidente. Los captadores utilizados son de alta frecuencia con protección ablativa y un rango de 5.000 PSI. Los acelerómetros se situaron en la parte trasera de cada muro a media altura (A1 a A4). Eran de tipo shock, ceramic-shear, con un rango de 5000 g. El equipo de adquisición de datos fue un DATA-TRAP II de MREL. Se trata de un equipo de adquisición de datos portátil y rugenizado de ocho canales. El rango de grabado por canal es de 10 MHz con 14-bit de resolución.

3. Resultados y discusión

Los resultados del T1 fueron de un nivel muy bajo de daño incluso en el muro sin refuerzo. Debido a esto, la carga se incrementó de 18 a 25 kg eq. TNT para el T2 y el T3, obteniendo en estos casos un daño intermedio. Finalmente en el T4, con una carga explosiva de 38 kg de TNT, el resultado fue el colapso completo del muro sin reforzar y del muro con la malla de fibra de carbono (figura 2).

Figura 2. Resultado del ensayo 4 (T4).

3.1. Sensores: presión y aceleración

Los picos de presión registrados en los diferentes ensayos oscilan entre 320 kPa para el T1 hasta 1.251 kPa registrados en el T4. Los captadores de presión se situaron a la misma distancia de la carga que los muros por lo que la presión incidente registrada se puede asimilar a la de los muros también. La máxima aceleración positiva en g se registró para los ensayos T1 a T3. No hay datos de aceleración para el T4 porque no se colocaron acelerómetros debido al alto riesgo de colapso que existía. Los picos de aceleración oscilan entre los 660 g y los 1.494 g. Los acelerómetros y captadores se inician con el detonador, de modo que el tiempo cero corresponde con la iniciación de la detonación, y el tiempo de llegada de las diferentes señales se puede usar como parámetro de la onda de choque. Los niveles de presión registrados, muy similares a los que predice el UFC 3-340, soportan el hecho de que la carga explosiva ha tenido una detonación total en todos los casos.

3.2. Evaluación del daño

La evaluación del daño se lleva a cabo en ambas caras del muro utilizando un martillo de Schmidt digital tipo L [7]. Aunque el esclerómetro [8] nos ofrece una rápida y barata medida para chequear la uniformidad del material, posee algunas limitaciones que pueden afectar al índice de rebote como son el estado de la superficie o el tipo de material.

La norma ASTM C 805 [9] fue adoptada como norma de método de ensayo en 1979. En la versión de 2002, así como en su versión europea EN 12504-2:2012 [10] se manifiesta que este método se puede aplicar para: evaluar *in situ* la uniformidad del hormigón, delimitar zonas en la estructura de calidad pobre u hormigón deteriorado y estimar la evolución de la resistencia *in situ*. En este caso, el objetivo es encontrar variaciones en el índice de rebote después de un evento explosivo y no una correlación directa con la resistencia.

El daño se evalúa en 20 puntos en cada cara de los 16 muros. Cada una de las 20 localizaciones se define por una plantilla que contiene 12 puntos distribuidos uniformemente en el interior de un rectángulo: 6 para la evaluación antes de la explosión y los otros 6 para la evaluación posterior. Q_1 es la mediana de los 6 puntos evaluados antes A_i y Q_2 es la mediana de los 6 puntos evaluados después D_i. La plantilla ha sido previamente validada para asegurar la fiabilidad de los resultados asegurando que A_i y D_i pertenecen a la misma población. De este modo, de existir diferencias en ambas poblaciones tras los ensayos, podrán ser atribuidas a la explosión.

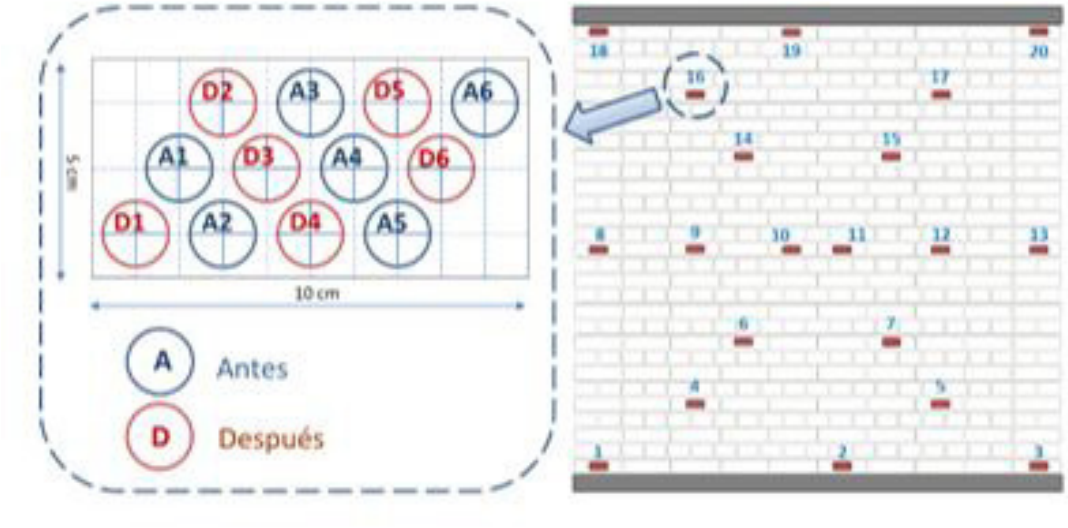


Figura 3. Localizaciones de puntos a medir en el muro y plantilla utilizada.

En cada una de las localizaciones se aplica el Wilcoxon Rank-Sum test [11] para evaluar si hay daño. Este test es una alternativa no paramétrica al T-Test de dos muestras y que se basa en las medianas en lugar de las medias, que es un estimador más robusto y, por consiguiente, menos sensible a los atípicos. El test de Wilcoxon es válido para datos de cualquier distribución, ya sea normal o no. Un p-valor menor de 0,05 muestra que ha habido una disminución en el índice de rebote con un nivel de confianza del 95 %. Definimos daño como:

$$p \leq 0{,}05 \rightarrow D = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \qquad (2)$$
$$p > 0{,}05 \rightarrow D = 0$$

Donde Q_1 y Q_2 son ahora las medias de los seis valores antes y después del ensayo respectivamente. Los valores de daño oscilan desde 0 para un punto «sin daño» hasta 1 para «daño total». Se asigna daño 1 cuando el punto está localizado sobre una superficie donde no es posible medir el índice de rebote debido a la incompetencia del material. Se han representado mapas de daño ajustando una superficie a los datos mediante una interpolación cúbica basada en la triangulación. La figura 4 muestra los mapas de daño de algunos de los muros ensayados. Para obtener el daño medio global de cada muro, se crea una malla de 200 puntos equiespaciada en cada dirección (horizontal y vertical). Se puede definir el daño global medio considerado (d_{200}) como la media de los valores interpolados en esos 200 puntos. Los valores del daño medio obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Para completar la evaluación del daño, se ha usado el área de daño (d_A) para clasificar el comportamiento de las estructuras. Se define la superficie de daño (d_A) como la superficie del muro con daño total (daño igual a 1) respecto de la superficie total del muro, basándonos para ello en datos de campo y no en los mapas de daño. Finalmente, la masa de fragmentos también fue recogida y pesada.

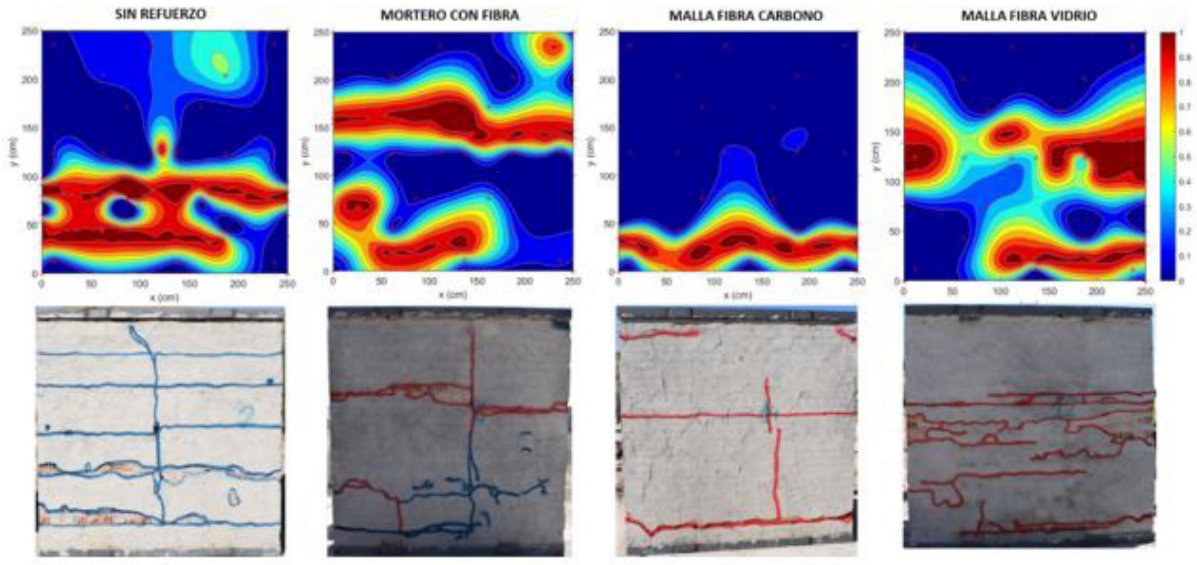


Figura 4. Mapas de daño realizados para el ensayo T2 en la cara exterior de los muros y su comparación con las fotografías tomadas tras el ensayo.

Tabla 1. Valores del daño obtenidos

Ensayo	Muro	Cara	Solución constructiva	d_{200} %	d_A %	Fragmentos kg
1	1	Exterior	Sin refuerzo	0,8		
1	2	Exterior	Mortero reforzado con fibra	2		
1	3	Exterior	Malla de fibra de carbono	9,29		
1	4	Exterior	Fibra de vidrio	4,39		
1	1	Interior	Sin refuerzo	0,21		
1	2	Interior	Sin refuerzo	0,08		
1	3	Interior	Sin refuerzo	0,07		
1	4	Interior	Sin refuerzo	0,11		
2	1	Exterior	Sin refuerzo	44,77	6,96	10,280
2	2	Exterior	Sin refuerzo	38,24	3,65	5,149
2	3	Exterior	Sin refuerzo	4,49	1,68	2,104
2	4	Exterior	Sin refuerzo	20,33	5,71	7,747
2	1	Interior	Sin refuerzo	7,87		
2	2	Interior	Mortero reforzado con fibra	0		
2	3	Interior	Malla de fibra de carbono	10,88		
2	4	Interior	Fibra de vidrio	5,5		
3	1	Exterior	Sin refuerzo	23,44		
3	2	Exterior	Mortero reforzado con fibra	14,85		
3	3	Exterior	Malla de fibra de carbono	17,11		
3	4	Exterior	Fibra de vidrio	7,25		
3	1	Interior	Sin refuerzo	4,49		
3	2	Interior	Sin refuerzo	1,19		

Ensayo	Muro	Cara	Solución constructiva	d_{200} %	d_A %	Fragmentos kg
3	3	Interior	Sin refuerzo	5,76		
3	4	Interior	Sin refuerzo	0,61		
4	1	Exterior	Sin refuerzo			
4	2	Exterior	Sin refuerzo	40,73	12,63	15,606
4	3	Exterior	Sin refuerzo			
4	4	Exterior	Sin refuerzo	31,73	14,06	20,763
4	1	Interior	Sin refuerzo	-		
4	2	Interior	Mortero reforzado con fibra	3,68		1,875
4	3	Interior	Malla de fibra de carbono	-		
4	4	Interior	Fibra de vidrio	9,24		

En el T1, los valores del daño fueron mínimos debido a la baja carga. Solo se aprecian unas grietas en ambas caras de los muros. Para los ensayos T2 y T3, la carga fue la misma y mayor que para T1. Los refuerzos en el T2 se colocaron en la cara interior y en el T3 en la cara exterior.

Diferentes lecturas se pueden extraer de los resultados. En T2 (ver Tabla 1), se puede observar que todas las soluciones mejoran la respuesta del muro aunque en diferentes grados. En este caso, la mejor opción es el refuerzo de fibra de carbono, que reduce el daño hasta el 4 % frente al 44 % del muro sin reforzar. Siendo la mejor solución, se debe tener en cuenta que la cara interior resulta la más dañada, aunque con valores relativamente bajos. Esto se puede deber a la rigidez extra que le aporta la malla al muro y que impide que este flexione con la onda de choque. El muro con fibra de vidrio, para este ensayo no funcionó correctamente debido a que la fibra se desprendió durante la explosión. Esto sucedió debido a las bajas temperaturas registradas en el momento de la aplicación de los productos sobre los muros. En el caso del mortero reforzado con fibra, aunque aparentemente no existe daño superficial alguno, este no es un resultado veraz. En realidad, resultó el muro más dañado de todos, con grandes grietas que rompían completamente el muro. Este hecho no se refleja en la superficie debido al espesor de la capa de refuerzo (unos 15 mm). Puesto que la metodología basada en el índice de rebote solo tiene en cuenta la capa superficial del material, no es un método fiable para evaluar el daño en este tipo de materiales, aunque sí se podría usar combinándolo con otros métodos.

En T3, los resultados son diferentes. Aunque se puede ver que las soluciones mejoran la respuesta del muro, su comportamiento ha cambiado colocándolas en la cara exterior. En este caso, la fibra de carbono presenta una peor respuesta, probablemente porque la «bola de fuego» afecta directamente a las propiedades del adhesivo epoxi. La mejor respuesta se obtiene por parte del muro con fibra de vidrio, la cual sí que trabajó correctamente en este ensayo. El mortero reforzado con fibra presenta daño superficial en este caso, ya que el material ha recibido el impacto de la onda de choque directamente. Sin embargo, al igual que en T2, el muro se encontraba completamente roto y desplazado.

Para T4 la carga se incrementó nuevamente. En este caso, dos muros colapsaron: el muro sin reforzar (como estaba previsto) y el muro con la malla de fibra de carbono. En este último caso, hubo dos problemas que desencadenaron el colapso: la malla no estaba fijada correctamente al muro (debido nuevamente a las bajas temperaturas registradas durante la aplicación) y el soporte superior falló desprendiéndose con la explosión. Los otros dos muros resultaron seriamente dañados, pero la malla de fibra de vidrio retuvo los fragmentos perfectamente.

4. Conclusiones

Se han ensayado tres soluciones de refuerzo diferentes para mejorar y aumentar la resistencia de muros de fábrica de ladrillo frente a eventos explosivos. Todas ellas han resultado ser buenas candidatas para

este propósito. Mientras que la malla de fibra de carbono funciona bien colocada en la cara interior del muro, su comportamiento es ligeramente peor si se sitúa en la cara exterior, aunque mejorando en cualquier caso la respuesta del muro. La malla de fibra de vidrio protege bien en la cara exterior, evita el colapso y sostiene perfectamente la masa de fragmentos siempre y cuando se encuentre correctamente fijada al muro soporte. Aunque los muros con mortero reforzado con fibra muestran grandes grietas en los ensayos T2 y T3, la solución ha demostrado tener un buen comportamiento evitando el colapso del muro en el T4.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido llevada a cabo dentro del proyecto PICAEX, financiado por el Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI). Agradecer la colaboración a todo el personal de TAPUSA, MAPEI y FHECOR quienes han contribuido en el diseño y realización de los ensayos. Agradecer además el apoyo del personal de La Marañosa (ITM-INTA) por la ayuda prestada en el campo de pruebas.

Referencias

1. *Davidson J.S., Fisher J.W., Hammons M.I., Porter J.R., Dinan R.J. Failure mechanisms of polymer-reinforced concrete masonry walls subjected to blast. Journal of Structural Engineering. 2005; 131(8):1194–205.*
2. *Muszynski L.C., Purcell M.R. Use of Composite Reinforcement to Strengthen Concrete and Air-Entrained Concrete Masonry Walls against Air Blast. Journal of Composites for Construction. 2003; 7(2):98-108.*
3. *Buchan P.A., Chen J.F. Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures – A state-of-the-art review. Composites: Part B: Engineering. 2007; 38: 509–522.*
4. *Varma, R.K., Tomar, C.P.S., Parkash, S., Sethi, V.S. Damage to brick masonry panel walls under high explosive detonations. Structures Under Extreme Loading Conditions. 1997; ASME, PVP-Vol. 351:207-216.*
5. *Ahmad, S., Elahi, A., Pervaiz, H., Rahman, A.G.A., Barbhuiya, S. Experimental study of masonry wall exposed to blast loadings. Materiales de construcción. 2014; 64(313).*
6. *Chen, L., Fang, Q., Fan, J., Zhang, Y., Hao, H., Liu, J. Responses of masonry infill walls retrofitted with CFRP, steel wire mesh and laminated bars to blast loadings. Advances in Structural Engineering. 2014; 17 (6):817-836.*
7. *Corbett, D. Advancing the Rebound Hammer Method: A New Concrete Test Hammer. Nondestructive Testing of Materials and Structures, RILEM Bookseries Springer, 2013; Volume 6:149-154.*
8. *Malhotra, V.M. Surface Hardness Methods. Handbook on nondestructive testing of concrete, 2nd ed. (Malhotra V.M., Carino N.J., Eds.; CRC Press), 2004.*
9. *ASTM, American Society for Testing and Materials. ASTM C805-02 - Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, 2002.*
10. *EN 12504-2:2012 «Testing concrete in structures. Part 2: Non-destructive testing. Determination of rebound number», 2012.*
11. *Bergmann, R., Ludbrook, J., Spooren, W.P.J.M. Different outcomes of the Wilcoxon−Mann−Whitney test from different statistics packages. The American Statistician. 2000; 54(1):72-77.*

Simulación de muros de ladrillos y su resistencia ante explosiones cercanas

Martínez Almajano, Santiago[1], Castedo Ruiz, Ricardo[2], Alcaide Saguillo, Coral[2], Chiquito Nieto, María[2], Santos Yanguas, Anastasio P.[2], López Sánchez, Lina Mª [2], Yenes García, Jose I.[3]

1 Escuela Politécnica Superior del Ejército. C/ Joaquín Costa Núm. 6, C.P. 28002, Madrid. Email: smalmajano@et.mde.es

2 E.T.S.I. de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Ríos Rosas Núm. 21, C.P. 28003, Madrid. Emails: ricardo.castedo@upm.es, coral.alcalde.saguillo@alumnos.upm.es, maria.chiquito@upm.es, tasio.santos@upm.es y lina.lópez@upm.es

3 Subdirección General de Proyectos y Obras, Dirección General de Infraestructuras, Ministerio de Defensa. Paseo de la Castellana 109, CP 28071, Madrid, España. Email: jyengal@et.mde.es

Resumen

En la lucha contra el terrorismo es fundamental conocer los daños potenciales que las cargas explosivas pueden tener sobre personas y/o estructuras (materiales). Como es sabido, los muros de ladrillo son uno de los elementos constructivos más empleados en el mundo tanto para fachadas como para las divisiones interiores de un edificio. Estos muros en numerosas ocasiones están revestidos de una capa de mortero sobre la que luego se pueden aplicar numerosos acabados. Dentro de la primera fase del proyecto PICAEX (Protección de Infraestructuras Críticas frente a Explosiones) se han ensayado 16 muros de ladrillo con aparejo inglés a escala real con diferentes cargas explosivas a cinco metros de distancia. Cada ensayo constaba de tres muros con diferentes soluciones de protección y uno más sin refuerzo como control. En muchos de los casos se han tomado medidas de aceleración y presión, las cuales sirven para la posterior validación del modelo numérico creado en LS-DYNA resuelto mediante una solución Lagrangiana. El modelo se ha desarrollado en 3D con elementos sólidos, replicando las condiciones de contorno de los ensayos reales. Se ha empleado el material «Concrete damage rel_3» para la descripción de las propiedades de los ladrillos y el contacto «Automatic Surface to Surface tiebreak» para la descripción de la rotura de las llagas y los tendeles del muro por efecto de la carga explosiva. El explosivo se ha simulado con la tarjeta Load_Blast_Enhanced que reproduce los datos experimentales del manual del ejército americano UFC 3-340-02, antiguo TM 5-1300. Los datos de presión obtenidos concuerdan bastante bien con los medidos. En cuanto a las aceleraciones de los muros los datos están en el rango de los valores experimentales.

Palabras clave

LS DYNA®, explosión, muros de ladrillo, escala real.

1. Introducción

La amenaza terrorista no es algo nuevo, lo que sí ha supuesto un importante cambio en los países occidentales, es el hecho de que ahora cualquier edificio puede ser objeto de un ataque. Este cambio de filosofía se manifestó de una manera especialmente cruenta en los atentados del Wolrd Trade Center en el año 2001; pues hasta entonces la mayor parte de los objetivos habían sido edificios gubernamentales. Como consecuencia de esta agresión, el Departamento de Seguridad Nacional de los EE. UU. comenzó a publicar normas que ayudarán a diseñar edificios más seguros ante las explosiones. Este tipo de estudios estaban fundamentalmente orientados a estructuras de hormigón y metálicas, dedicándose un menor esfuerzo a los edificios de fábrica de ladrillo. El objetivo de este trabajo es el de estudiar el comportamiento de este tipo de estructuras ante explosiones cercanas con ayuda de modelos numéricos.

2. Descripción del problema

Si profundizamos un poco más en una de estas posibles amenazas, los atentados con explosivos, nos damos cuenta de que tristemente ha sido un modo habitual de generar un enorme daño. Mirando al pasado tenemos casos dentro y fuera de nuestro país. En España sufrimos ataques como el del Hipercor de Barcelona en 1987, en el que murieron 21 personas o el de la Casa Cuartel de Zaragoza en el año 1997, que ocasionó 11 muertos. Fuera de nuestras fronteras, tenemos el de Oklahoma en 1995 en el que perecieron 168 personas, el de las Torres Khobar en 1996 que dejo un balance de 20 víctimas mortales o el de las Embajadas de Nairobi y Dar es Salaam en 1998, que dejó 224 fallecidos, por citar algunos ejemplos.

Todos ellos presentan similitudes: en primer lugar, se trata de edificios civiles, no diseñados para soportar actos terroristas; además nos demuestran que todos los edificios pueden ser objeto de un atentado, lo que nos obliga de nuevo a plantearnos la necesidad de incluir la seguridad en el diseño de cualquier edificio, y/o infraestructura.

2.1. Normativa de referencia

La siguiente pregunta que nos surge es cómo podemos protegernos; si bien a priori podría parecer que no existen normas para el diseño en seguridad, dicha afirmación carece de fundamento, ya que como consecuencia del ataque a las Torres Gemelas en 2001, se produjo un importante esfuerzo por parte del Departamento de Seguridad Nacional de los Estados Unidos (Homeland Secutiry), que desarrolló normas como la FEMA 426 [1] y sucesivas. Esta colección normativa, formada por un total de 9 normas, se basaba en documentos del Departamento de Defensa, que desde mucho antes había constatado la necesidad de marcar los principios del diseño en seguridad; en particular resulta especialmente interesante el documento *Guide Installation Force Protection* [2], que puede considerarse como base de la normativa FEMA posterior.

Como podemos ver en nuestra pequeña reseña de atentados, los edificios han sido objeto de ataque habitual mediante bombas, por lo que existe mucha normativa en la que se estudia cómo puede afectar un ataque con bomba a las distintas tipologías de edificios en los Estados Unidos, y cómo minimizarlo. Al

analizar toda esta información, resulta evidente que no se tratan los casos de los edificios de fábrica de ladrillo o simplemente fachadas de fábrica de ladrillo, dado que no es una tipología habitual en USA, al contrario de lo que pasa en otras muchas partes del mundo, y en particular en España.

2.2. Modelización de fábricas de ladrillo ante explosiones

El ladrillo constituye uno de los elementos de construcción más utilizados en la antigüedad gracias a sus buenas propiedades como aislante, a su buena resistencia a compresión y lo fácil y económico que resulta fabricarlo. En concreto, en España, la mayor parte de los edificios siguen teniendo las fachadas construidas con ladrillos, lo que hace que el estudio de este tipo de estructuras ante una explosión sea especialmente importante.

Por ello, en los últimos años se han estado dotando programas de investigación del Plan Nacional, con el fin de caracterizar el comportamiento de las fachadas de ladrillo ante cargas explosivas; buscando la forma de hacer menos vulnerables aquellos edificios con fachadas de fábrica que pudieran ser objeto de un ataque terrorista.

El análisis de este tipo de fenómenos se puede afrontar de distintas maneras: de manera experimental realizando ensayos con explosivos (a escala real o reducida), mediante modelos teóricos simplificados, o realizando modelos numéricos con la ayuda de códigos de elementos finitos.

Los modelos experimentales proporcionan los resultados de mayor calidad, pero tienen varios inconvenientes, entre los que destacan el altísimo coste que tienen y el riesgo que supone el manejo de explosivos. Además, al tratarse de ensayos experimentales, y con el fin de asegurar la calidad de los resultados, es necesario un cierto grado de repetitividad en los mismos, lo que incide de nuevo en el coste. Por todo ello, el número de tipologías (aparejo, tipo de ladrillo, distancia y altura de la detonación, cantidad de explosivo, condiciones de sustentación de la fábrica o condiciones ambientales) que pueden ser analizadas es limitado.

Los modelos teóricos simplificados han sido desarrollados en base a una serie de simplificaciones. Por ello, los resultados que se obtienen, serán tanto más reales cuanto más se parezcan, las condiciones de nuestro problema, a las condiciones para las que fue validado el modelo teórico; de esta manera, los resultados obtenidos, constituyen una solución aproximada de nuestro problema.

Los modelos numéricos tienen el inconveniente del alto coste inicial que supone el manejo de complicados códigos de elementos finitos, así como la ejecución y validación del modelo; a cambio, una vez realizado el modelo, resulta relativamente sencillo ir modificando las condiciones del problema. Así, con ayuda de los modelos numéricos, podemos analizar cómo se comportaría un muro con distintas cargas explosivas, a distintas distancias, con distintos tipos de materiales o distintas condiciones de sustentación.

La pregunta que nos surge es: ¿cuál es el enfoque más adecuado en este tipo de problemas? La aproximación más adecuada es una combinación de todos los modelos. En primer lugar, se debe estudiar el problema con ayuda de un modelo teórico que nos permitirá obtener una solución aproximada. En base a esa solución aproximada que nos ayude a centrar el problema, procederemos a desarrollar nuestro modelo numérico, que posteriormente debe ser validado a través de ensayos experimentales. Es importante entender que un modelo teórico no validado es una solución muy poco fiable. Como veremos más adelante, los modelos numéricos manejan una infinidad de variables, y el inadecuado ajuste de algunas de ellas puede cambiar el resultado del estudio.

3. Descripción de los ensayos

El estudio objeto del presente artículo se encuentra encuadrado dentro de un proyecto de investigación del Plan Nacional RETOS 2016 llamado PICAEX «Protección de Infraestructuras Críticas frente a Explosiones». El objetivo general del proyecto PICAEX es reducir la vulnerabilidad de las infraestructuras críticas ante ataques en los que se empleen explosivos. Para ello, se pretende mejorar el comportamiento de los materiales tradicionales ante explosiones; concretamente, las fábricas de ladrillo, mediante la

adición en alguna de sus caras de un mortero de revoco micro-armado con fibras poliméricas, malla de fibra de carbono bidireccional con adhesivo o tejido bidireccional de fibra de vidrio.

La parte experimental del proyecto consiste en estudiar el comportamiento de un muro de fábrica de ladrillo de dimensiones 2,50 m x 2,50 m y con aparejo inglés ante cargas de 18, 25 y 38 Kg de TNT equivalente situadas a 5,00 m de distancia del muro y una altura de 0,7 m. Las condiciones de sustentación del muro intentan reproducir las de un muro de fachada habitual.

En los ensayos se han dispuesto captadores de presión y acelerómetros, además de realizar una grabación con cámara de alta velocidad. Asimismo, se efectuó un estudio de daños para ver el grado de afección de los muros después de la explosión, este último es objeto de otro estudio paralelo.

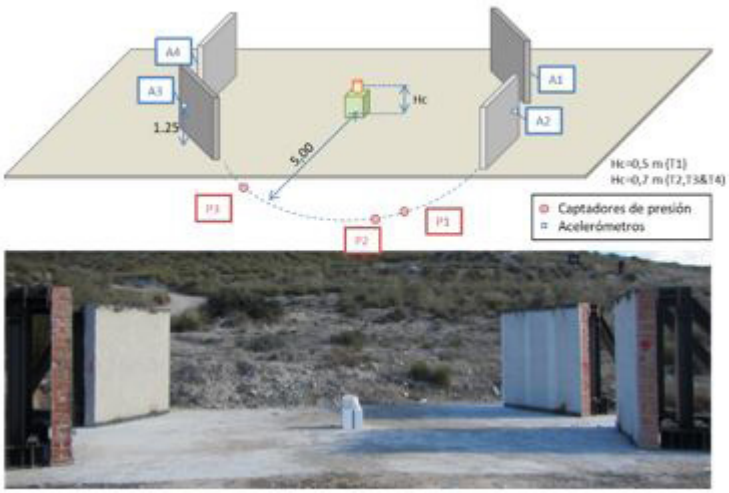


Figura 1. Disposición del ensayo.

4. Modelización numérica

En paralelo al estudio experimental se ha desarrollado un modelo numérico que pretende ser validado con la información obtenida de los ensayos experimentales. Una vez ajustado el modelo numérico, se podrán cambiar las condiciones de carga, distancia, altura de carga, tipo de ladrillo, tipo de aparejo, geometría del muro y condiciones de sustentación. El resultado completo del estudio nos permitirá analizar escenarios más realistas donde los muros puedan formar parte de edificios o simplemente tengan geometrías más complicadas.

4.1. Fases de la modelización

El primer paso en la ejecución del modelo numérico consiste en construir la geometría del modelo, que se ha llevado a cabo con ayuda de un programa de diseño gráfico, en el que se han ido dibujando todos y cada uno de los ladrillos, respetando las llagas y tendeles.

A continuación, y mediante un código de elementos finitos, en concreto LS DYNA[3], se ha procedido a ir implementando el resto de los parámetros del modelo: selección de unidades, tiempo de duración, paso y tipo de integración, mallado del modelo, elección del tipo de elemento de mallado, elección del modelo de material, condiciones de contorno, contacto entre elementos, cargas (gravedad y explosión), selección de herramientas de control, selección de los datos y frecuencia de los datos que deben ser registrados. La discusión de cada uno de estos parámetros podría ser por sí solo objeto de un artículo, por lo que se realizará una somera explicación de cada uno de ellos con el fin de permitir al lector entender el modelo en su conjunto, y pueda valorar la complejidad de este tipo de análisis dado el enorme número de variables que afectan a los mismos.

La selección de unidades [4] es el primer paso a la hora de afrontar el modelo; es preciso hacerlo correctamente, pues una de las fuentes más habituales de errores, ya que cualquier incongruencia en las mismas nos produce errores que impiden el cálculo. En nuestro caso se ha optado por trabajar con: g, mm, ms, N, MPa y N-mm.

El segundo problema al que nos tenemos que enfrentar es el de la elección del tiempo de integración; para ello, haremos uso de la normativa de referencia más habitual para este tipo de problemas, la UFC 340 -02 [5], que implementa los modelos de onda aérea desarrollados por Kingery and Bulmash; de este modo, obtenemos todos los parámetros de la explosión, y en concreto: el tiempo de llegada, el tiempo de duración de la fase positiva y el tiempo de duración de la fase negativa [5].

A continuación debemos elegir el método de integración que queremos realizar: implícita o explícita. La integración implícita resulta más adecuada para problemas de dinámica estructural y tiempos de simulación elevados (del orden de segundos) con una respuesta de frecuencias bajas como terremotos o vibraciones en maquinaria. La integración explícita es más adecuada para problemas dinámicos de corta duración con respuestas de frecuencias altas (impactos, choques, penetración y explosiones) como es nuestro caso. La resolución de la ecuación se lleva a cabo de forma directa, en base a los resultados de los pasos anteriores. El cálculo es eficiente y rápido en pasos de tiempo pequeños, por lo que es necesario controlar este parámetro para asegurar la convergencia. El paso de tiempo se debe restringir mediante la condición de Courant- Friedrichs, que nos relaciona el tamaño de la malla con el paso de integración.

Para el mallado se ha elegido un elemento sólido de ocho nodos con un único punto de integración, lo que permite reducir de manera significativa el tiempo de cálculo, aunque como contrapartida se hace necesario llevar a cabo un control de la deformación artificial (producida sin esfuerzos) que se produce en los elementos no integrados; para ello LS DYNA® [3] dispone de una función diseñada al efecto, denominada *hourglass*.

La elección del modelo de fallo del material constituye una de las decisiones más complicadas en la ejecución del modelo. La mejor forma de afrontar este problema es por medio de un amplio estudio bibliográfico, que nos permite conocer qué propiedades del material tienen influencia en nuestro problema, y cuáles podemos obviar en el modelo; problema que es incluso más complicado en el caso las fábricas de ladrillo, pues a diferencia de otros materiales que han sido estudiados de manera profusa, como puedan ser los metales y el hormigón, por ser materiales de interés para el sector de defensa; las fábricas de ladrillo han sido muy poco estudiadas desde el punto de vista de su comportamiento ante explosiones.

Como resultado del estudio bibliográfico anteriormente citado, se ha llegado a la conclusión de que el material más adecuado para simular las fábricas de ladrillo desde el punto de vista de un estudio académico es el MAT 072 Concrete Damage REL3 [6]. La utilización de este material exige una ingente cantidad de datos, en concreto cuarenta y dos, ya que hay que definir las tres curvas de fallo del tipo Morh Coulomb para cada material (ladrillo u mortero). Para este trabajo, nos hemos basado en los estudios de modelización numérica de fábricas de ladrillo ante explosiones realizados por [7] y [8].

El siguiente paso es introducir en el modelo las condiciones de contorno, y han de ser capaces de reproducir fielmente lo que ocurre en el modelo ensayado. Como puede verse en las fotografías de la muestra, el muro fue fijado al marco con ayuda de dos perfiles metálicos UPN que limitan completamente el movimiento de la primera y última hilada en sentido horizontal, y parcialmente en dirección vertical.

Para simular la forma en que se relacionan los diferentes elementos del modelo hemos recurrido a la definición de contactos a través de la función «Automatic Surface to Surface Tie-Break». Los contactos *tiebreak* [9], [10] y [11] permiten aplicar, inicialmente, un criterio de rotura basado en las tensiones normales y tangenciales.

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1 \qquad (1)$$

Donde y son las tensiones normal y tangencial solicitantes, *NFLS* y *SFLS* son las tensiones normal y tangencial capacitivas. Una vez superado el criterio de rotura, se pasa a un nuevo modelo de contacto controlado por el rozamiento.

$$\boldsymbol{\mu = FD + (FS - FD)e^{-DC \cdot v_{rel}}} \qquad (2)$$

Donde FS representa el coeficiente de rozamiento estático, FD el coeficiente de rozamiento dinámico, DC el coeficiente de amortiguamiento exponencial y V_{rel} la velocidad relativa entre los elementos en contacto.

Cuando nos planteamos simular numéricamente una explosión, los códigos de elementos finitos en general, y más concretamente LS DYNA®, nos permiten afrontar el problema mediante tres procedimientos, tal y como explican los autores [12] y [13]:

1. *Load Blast Enhanced* (LBE): en el que se considera la explosión como una solicitación exterior que afecta directamente al blanco sin que se produzca simulación ni del explosivo, ni del aire. El cálculo de la carga se basa en el programa CONWEP desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Tiene como ventaja el bajo coste computacional, ya que el tiempo para obtener una solución se mide en minutos. Sin embargo, no es capaz de captar los efectos por interacción entre la estructura y el medio que la rodea. Tampoco es útil si el blanco se encuentra tapado por algún objeto.
2. *Muti – Material Arbitrary Lagragian – Eulerian* (MM-ALE): en este tipo de cálculos se simula el explosivo, el medio (aire) y el blanco. Da resultados mucho más precisos, pero tiene un alto coste computacional, los tiempos de cálculo van desde unas cuantas horas a varios días. Además, exige definir las ecuaciones de estado tanto del explosivo como del medio.
3. *Smooth Particle hydrodynamics* (SPH): en este tipo de cálculos se simula el explosivo pero no el aire. Son modelos Lagrangianos sin malla, especialmente adecuados para explosiones no aéreas. Tienen un alto coste computacional.

En el caso de nuestro modelo, se ha optado por simular la explosión con ayuda de la función LBE, por lo que los únicos datos que debemos precisar son: la carga TNT equivalente, la posición relativa de la carga con respecto al o los blancos y el tipo de explosión (aérea, en superficie o cerca de la superficie, se forma frente de Match).

Para poder tener en cuenta la gravedad en el cálculo es necesario que la estructura haya sido cargada previamente, lo que hacemos con ayuda de la herramienta de relajación dinámica de la que dispone LS DYNA[3].

Por último, es necesario configurar las herramientas del control e indicar la frecuencia y tipo de datos que se desea leer durante el cálculo, en nuestro caso, los parámetros de onda aérea y los parámetros que afectan a la estructura (deformaciones y tensiones) y esfuerzos en los contactos.

5. Resultados y discusión

Se han ensayado tres soluciones de refuerzo diferentes para mejorar y aumentar la resistencia de muros de fábrica de ladrillo frente a eventos explosivos. Como puede verse en la figura, la adición de fibra mejora el comportamiento de los muros, aunque esta mejora depende de la cara en que se disponga el refuerzo.

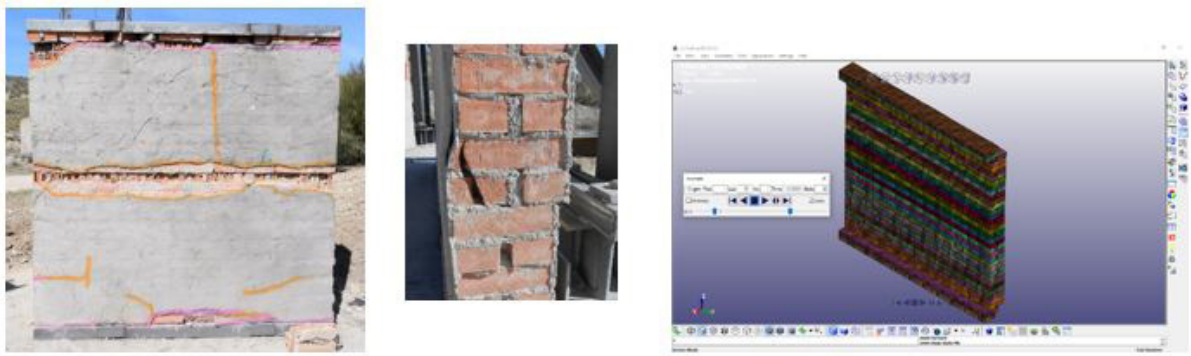


Figura 2. Resultados del ensayo con 38 kg TNT.

Con respecto a la modelización numérica, *únicamente se ha finalizado* el modelo del muro testigos sin reforzar. Los resultados muestran una buena correlación entre los resultados experimentales y los de la modelización numérica, tanto en los parámetros físicos de la explosión, como en los parámetros estructurales del muro. Los resultados del trabajo son muy preliminares. Ya que solo se ha realizado la modelización numérica del modelo de muro sin reforzar. Y además no se ha terminado la calibración del modelo.

Las presiones registradas por los captadores de presión dispuestos en el suelo son del mismo orden de magnitud que las calculadas por el programa. Del mismo modo, las aceleraciones registradas en los acelerómetros son también similares a las obtenidas en la simulación. En cuanto a la geometría de las fisuras aparecidas en las caras de los muros, los modelos únicamente nos permiten reproducir las fisuras más importantes, las que se producen en el centro de vano y las que se forman por cortante cerca de los apoyos. Por último, el modelo es capaz de reproducir las formas de daño del muro.

6. Conclusiones

Se han realizado diversos modelos con distintas cargas que nos pueden dar una idea de cómo se comportarán los muros ensayados, pero resulta imprescindible calibrar el modelo para tener la seguridad de que los resultados obtenidos por el mismo son realistas dada la gran cantidad parámetros que condicionan la solución.

Una vez calibrado el modelo será posible extrapolar la solución a estructuras mucho más complejas, con geometrías variadas, con distintos tipos y configuraciones de cargas, y distintos tipos de condiciones de contorno. Todo esto nos permitirá caracterizar el comportamiento de edificios con muros de fábrica ante una explosión, pudiendo evaluar sus vulnerabilidades y proponer soluciones que atenúen el dañado generado.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido llevada a cabo dentro del proyecto PICAEX, financiado por el Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI). Agradecer la colaboración a todo el equipo del proyecto PICAEX sin el cual no hubiera sido posible llevar a cabo este tipo de estudios.

Referencias

1. *FEMA 426. Federal Emergency Management Agency. Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings. 2003.*
2. *USA Air Force. Guide Installation Force Protection. 1998*
3. *Livermore Software. Ls-dyna Theory Manual. 2006.*
4. *Dynamore. dynasupport. https://www.dynasupport.com/howtos/general/consistent-units. 2018.*
5. *DoD. Departamento de Defensa de los Estados Unidos, UFC 340-02 «Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions». 2002.*
6. *Schewr, Leonard E. Mat_072r3 Concret Damaged Model. JRI LS-DYNA USER WEEK. 2005.*
7. *Chen L., Fang Q., Hao H. y Hong J. Calibration and discussion of parameters of MAT_72REL3 constitutive model on clay brick and motar materials. 15th International Symposium on the interaction. 2010.*
8. *Hao, Hong. Numerical modelling of masonry wall response to blast loads., Australian Journal of Structural Engineering. 2009.*
9. *Bala, Suri. Tie-Break Contacts in LS-DYNA. s.l. : Liver more Software. 2001.*
10. *DoD2. Development of computational models and Input sensitivity study of polymer Reinforced concrete masonry walls Subjected to blast AFRL-ML-TY-TR-2006-4522.Departamento de Defensa de los Estados Unidos, 2006.*

11. *Seyedehshadi, B.E. Modeling of arching unreinforced masonry walls subjected to blast loads. Universidad de Hamilton. 2011.*
12. *Comparation between three different blast methods in LS-DYNA. Tabatabaei, Zahra S. 12 Internacional LS-DYNA User Conference. 2012.*
13. *Schewr, Leonard E. Lecture Air Blast-Load Blast Enhanced. 2016.*

Compuestos con resinas epoxi y materiales de cambio de fase para almacenamiento térmico en aplicaciones militares

Gil, María José[1], Arce, Elena[2,*], Álvarez-Feijoo, Miguel Ángel[2], Rey, Guillermo David, Alonso, Cristina[3], y Fernández-González, Raquel[4]

[1] Armada Española. maryjogilfedz@gmail.com (MJG).

[2] Centro Universitario de la Defensa en Escuela Naval Militar. elena.arce@cud.uvigo.es (EA), alvarezfeijoo@cud.uvigo.es (MAAF), guillermo.rey@cud.uvigo.es (GDR), catristan@ubu.es (CA), raquelf@uvigo.es (RFG).

[3] Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior. catristan@ubu.es (CA).

[4] Universidad de Vigo. raquelf@uvigo.es (RFG).

* Autor principal y responsable del trabajo; elena.arce@cud.uvigo.es (EA).

Resumen

Los compuestos con resinas epoxi son idóneos como base para integrar y combinar materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés). La resina actúa como una cápsula que evita pérdidas de masa cuando el material cambia de estado, en este caso de fase sólida a fase líquida. El objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar las propiedades térmicas y mecánicas, así como el nivel de homogeneidad de nuevos compuestos con PCM orgánico. Los composites estaban formados por PCM (parafina, en este caso), agentes espesantes, resinas epoxi y partículas metálicas. La metodología Plackett-Burman se aplicó para diseñar el estudio de las muestras y para identificar los factores más importantes, permitiendo reducir el número de ensayos. Se utilizó calorimetría diferencial de barrido (DSC) para analizar el comportamiento térmico de las muestras. Las propiedades mecánicas se analizaron a través de mediciones de durezas shore A y D. La microscopía electrónica de barrido (SEM), proporcionó información morfológica sobre la superficie de las probetas, lo que ayudó a entender el comportamiento de las mismas, además de ser una forma muy visual de testar la homogeneidad de las probetas. Los resultados indican que la matriz epoxi puede actuar como un contenedor para la fase PCM sin obstaculizar el comportamiento de absorción de calor de los PCM utilizados. Los PCM orgánicos presentaron transformaciones de fase reversibles en ciclos múltiples. Tal y como se esperaba, la entalpía de las muestras orgánicas de PCM-epoxi aumentó linealmente con el contenido de PCM en la matriz. El uso de agentes espesantes evitó problemas de segregación de fases y permitió la fabricación de muestras con altos contenidos en PCM. La fase conductora (partículas metálicas) ayudó a mejorar la transferencia de calor y las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

Palabras clave

PCM, compuesto PCM-epoxi, almacenamiento de energía térmica, parafina, Plackett-Burman.

1. Introducción

La necesidad de implementar políticas ambientales y prácticas de ahorro energético está cada vez más presente a nivel local, nacional o internacional [1]. Esto ha llevado al desarrollo y optimización de recursos energéticos y sistemas de almacenamiento de energía [2-4]. Estos últimos presentan dos ventajas importantes: la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y la posibilidad de igualar la oferta y la demanda de energía cuando no coinciden en el tiempo [5]. En el caso de los materiales de construcción, las prácticas de ahorro de energía se pueden lograr mediante el uso de sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES, por sus siglas en inglés). El almacenamiento de calor sensible mediante el cambio de la temperatura de un material de almacenamiento, es un método muy común de almacenamiento de energía, ya que la energía térmica se almacena y se libera de forma pasiva. Sin embargo, su principal desventaja es que necesita un gran volumen de material para almacenar la misma energía que otros sistemas basados en el calor latente del cambio de fase. Por lo tanto, una forma efectiva de almacenar energía térmica es mediante la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) en los sistemas de almacenamiento de energía térmica de calor latente pasivo (LHTES, por sus siglas en inglés) [6]. Los PCM son sustancias que absorben o liberan calor durante un cambio de fase. En estos sistemas, los materiales de cambio de fase tienen la capacidad de adaptar los periodos de suministro de energía a los de demanda. Lo que crea un campo de investigación en el ámbito la mejora de la eficiencia energética. Sin embargo, el uso de PCM que cambian de estado sólido a líquido tiene un inconveniente: la dispersión en el estado líquido. Este hecho reduce la eficiencia de la transferencia de calor y aumenta los costes de producción. Para resolver este problema, se pueden elegir diferentes soluciones. En el presente estudio, con el objetivo de resolver los problemas de dispersión, se utiliza una matriz de polímero (resina epoxi) como material de soporte del PCM.

2. Metodología

2.1. Preparación de las muestras

En la figura 1 se muestra el esquema de trabajo. Las masas están ordenadas atendiendo a la secuencia de agregación en la mezcla.

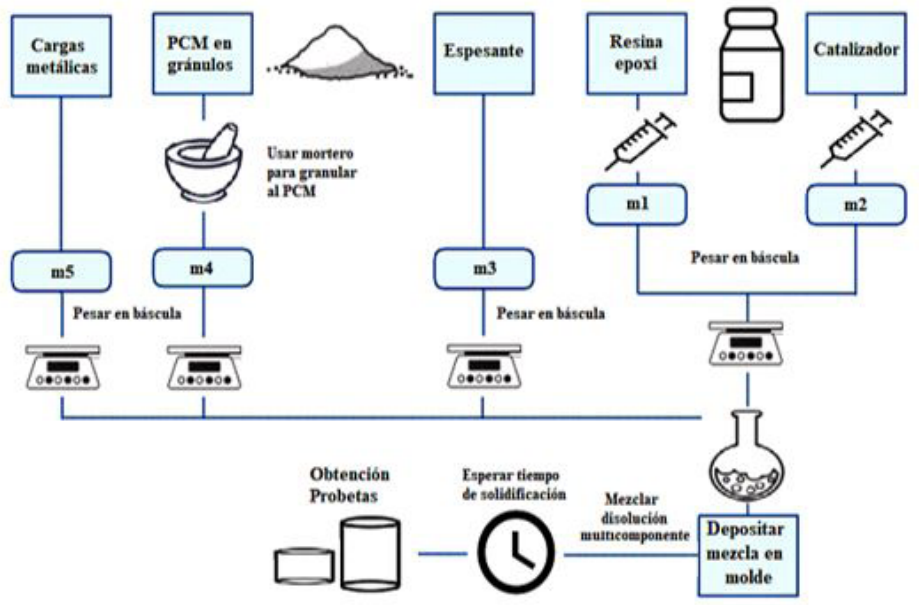


Figura 1. Flujo de trabajo para el desarrollo de las probetas.

2.2. Materiales de cambio de fase y resinas estudiadas

Las características que se buscaron en los componentes de los recubrimientos fueron que:

- Generen un proceso de cambio de fase que sea reversible y únicamente dependiente de la temperatura (se estudiará con TGA-DSC).
- Sean químicamente estables en el tiempo evitando su descomposición y contaminación.
- Su temperatura de transición vítrea o cambio de fase se encuentra entre 60 y 80°C. Se selecciona este rango de temperaturas, en base a un estudio previo de análisis térmico de la sala de máquinas de las lanchas de instrucción en la Escuela Naval Militar.
- Posean una gran capacidad de almacenamiento de calor sensible (en estado sólido y líquido), acompañada de una elevada entalpía de cambio de fase: calor latente.
- Tengan una alta conductividad térmica que faciliten la transferencia de calor.
- Conserven un razonable CVP de acuerdo a su coste y utilización.

En este trabajo, se decide utilizar la parafina cera candelilla (ceras Martí), ampliamente empleada en el ámbito de la cosmética. Su punto de fusión va de 69°(min) a 73°C (max), el índice de acidez ( )varía de 12 a 22 y el índice de saponificación va de 43 a 63 . Esta parafina posee propiedades adhesivas, protectoras destacables junto a una alta estabilidad química, impermeabilidad y propiedades dieléctricas. Al igual que la cera de carnauba, es altamente reconocida por su alta dureza con resistencia al desgaste y además, ejerce como barrera contra la humedad debido a su alto contenido de hidrocarburos.

La tabla 1 es una síntesis de las características de la resina epoxi y el endurecedor empleados. La relación de la mezcla en peso debe ser estrictamente respetada, ya que ello resulta en una pérdida de propiedades mecánicas. Las dos sustancias se presentan envasadas en estado líquido.

	Resina 1070 ECO	**Endurecedor 1074 ECO**
	Hasta 73°C	
Relación mezcla en peso	100	35
(g/cm³)	1,18	0,96
(mPa.s)	1.750	50
Color	Púrpura	Transparente

Tabla 1. Resumen de las propiedades de la resina epoxi 37% de contenido Bio

En este estudio se analizó también el efecto de adicionar cargas metálicas a los compuestos. En concreto, este análisis se hizo a través de la matriz de diseño experimental de Plackett-Burman. Como carga metálica se decide emplear aluminio en polvo. A través de la carga metálica se intenta controlar la inercia térmica que el aditivo aporta al conjunto.

2.3. Diseño del experimento Plackett-Burman

El diseño experimental de Plackett-Burman se empleó para identificar los factores más importantes en el estudio y reducir el número de ensayos. Se diseña considerando cinco factores relevantes que se evaluarán con dos niveles (+1 corresponde a proporciones mayores y -1 a las menores) como se indica en la tabla 2. En la matriz Plackett Burman se introdujeron dos variables *dummy*, es decir, variables ficticias que se emplean poder discernir las variables estadísticamente significativas al comparar su efecto con el de las anteriores. Para la caracterización térmica y mecánica, se realizan cuatro probetas: dos que solo tengan en cuenta los factores A (base: resina y endurecedor) y otras dos compuestas por A y B (base y espesante) a dos niveles ±1.

Factores	***Descripción***	***+1***	*%*	***-1***	*%*
A	Resina	8,52 g	42,6 %	12,37 g	61,9 %
	Catalizador	2,98 g	14,9 %	4,33 g	21,6 %
B	Espesante	0,50 g	2,5 %	0,30 g	1,5 %
C	PCM	6,00 g	30,0 %	2,00 g	10,0 %
D	Partículas metálicas	2,00 g	10,0%	1,00 g	5,0%
E	Tiempo de mezclado	30 min		10 min	

Tabla 2. Diseño factorial de selección: factores analizados y niveles experimentales

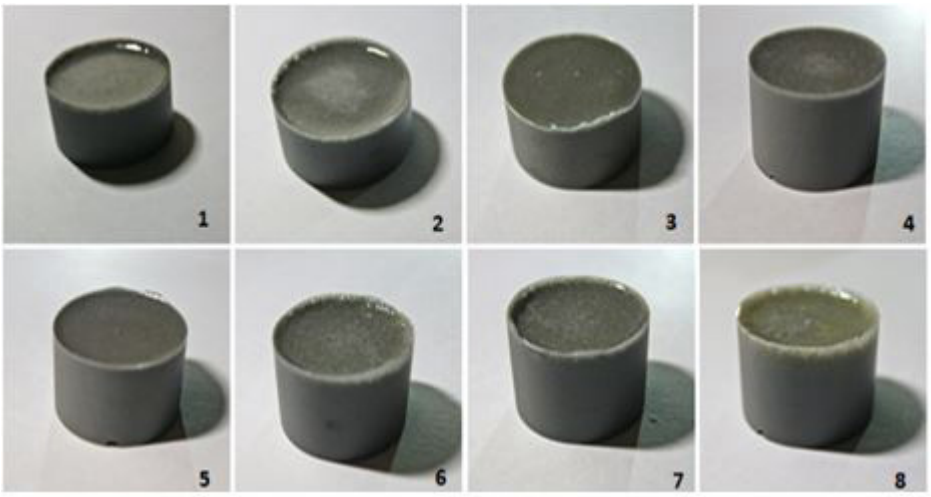


Figura 2. Probetas resultantes del diseño experimental Plackett-Burman.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización térmica

Utilizando un equipo de termogravimetría de barrido (TGA-DSC), se analizaron los procesos exotérmicos y endotérmicos, tras someter a ciclos de calentamiento y enfriamiento a cada muestra de la matriz de Plackett-Burman. Concretamente, se sometieron a 3 ciclos, para poder observar con claridad si existe reversibilidad en los materiales de cambio de fase (figura 2). Los resultados del análisis TGA-DSC confirmaron al aumentar la proporción de parafina en la disolución, se consiguen mejores resultados

entálpicos. En un sistema de recuperación térmico como el desarrollado en el trabajo, el intercambio de energía se lleva a cabo en forma de calor sensible, y calor latente especialmente.

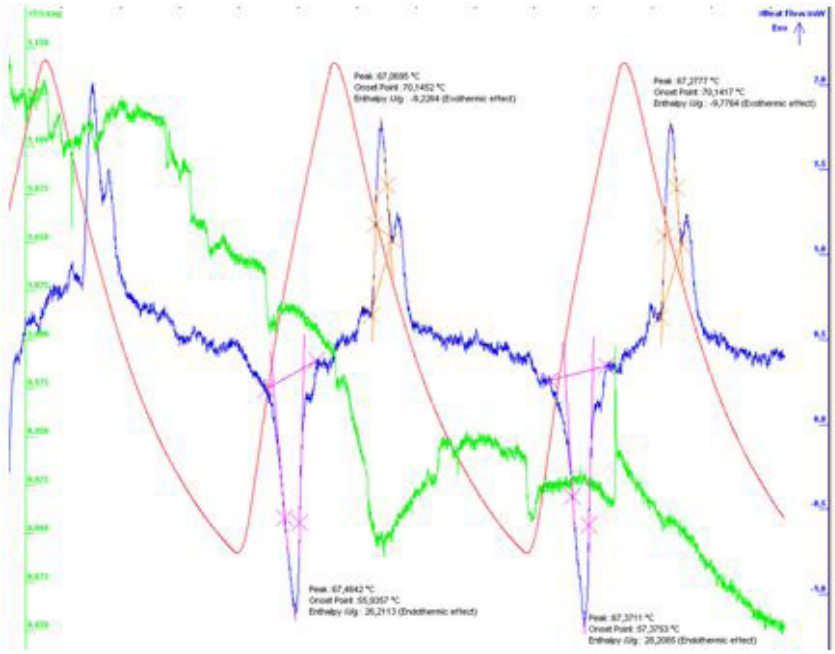


Figura 3. Resultados TGA-DSC para una de las muestras.

3.2. Caracterización mecánica

Se midieron durezas shore A y shore D, obervando que la inclusión de PCM, debilita la estructura de la resina. En media, se reduce su dureza un 8,14 %.

3.3. Análisis SEM-EDS

El resultado del análisis cualitativo EDS de la figura 4 es un mapa composicional realizado para una microestructura de 100 µm constituido por cantidades de carbono, oxígeno, aluminio, silicio, cloro y magnesio. El silicio se concentra en pequeñas zonas formando una sombra más brillante. La suma de cada uno de los componentes genera la imagen total de la izquierda. El elemento que mejor se aprecia es el aluminio, debido a su mayor número atómico, y el que peor apreciación tiene es el magnesio.

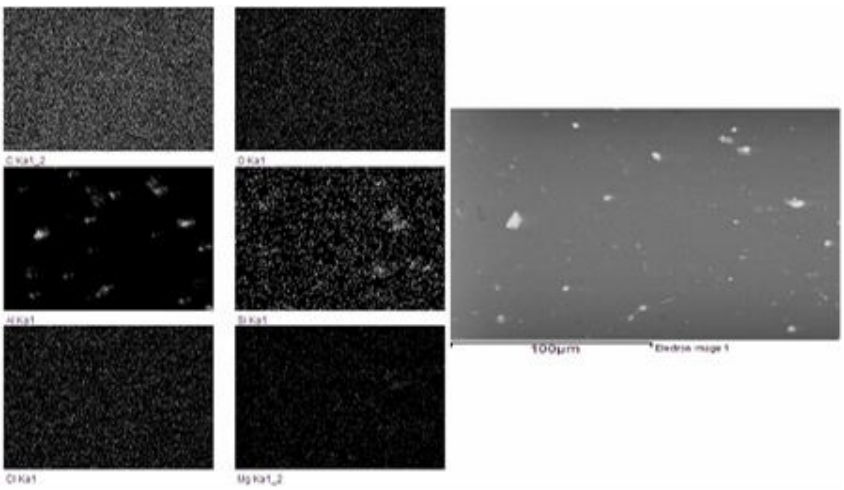


Figura 4. Mapeo y composición de la muestra para un enfoque puntual de 100 µm.

En la figura 5 se puede apreciar que el silicio sigue concentrándose en pequeñas áreas que generan una sombra más brillante. El mapa obtenido se realiza para una microestructura de 40 µm. La composición es la misma, pero en esta se puede apreciar que el aluminio aparece en la esquina derecha. El tamaño de las partículas de aluminio es mayor que las del resto de sustancias. Además, aparece como elemento a tener en cuenta el azufre, aunque su visualización en las imágenes sea difícil debido a su bajo número atómico.

Figura 5. Mapeo y composición de la muestra para un enfoque puntual de 40 µm.

La morfología de las partes analizadas de la muestra es semejante. Los análisis EDS comparados muestran un enriquecimiento en carbono y oxígeno. En la figura 6 se presentan datos cuantitativos, en unidades arbitrarias y porcentajes aproximados, de los distintos elementos químicos identificados. Los datos son dispuestos en orden alfabético.

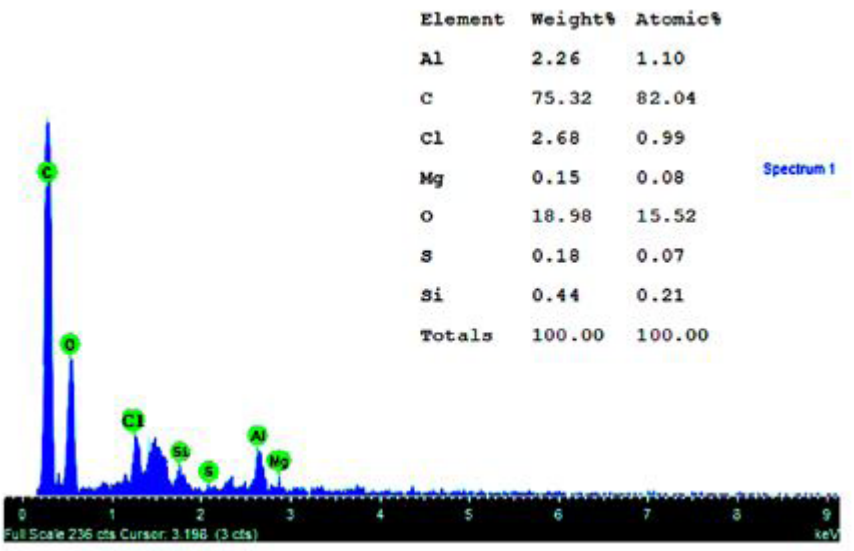


Figura 6. Espectro atómico y cuantificación por el equipo SEM-EDS.

A modo de resumen, se puede extraer, del análisis SEM-EDS, que el aluminio es un elemento que tiende a formar inclusiones no metálicas (fases no metálicas que contienen más de un compuesto), y que, en

presencia abundante, podría originar problemas en la homogeneidad microestructural, debiendo conocerse la proporción exacta (en el experimento la carga metálica disuelta es del 5 y 10 % en peso). En los mapas composicionales se observa que las fases están unidas en la matriz.

3.4. Análisis estadístico

Utilizando el *software* Statistica, se analizó la importancia de cada uno de los factores que intervienen en la matriz de Plackett-Burman:

1. Base (resina epoxi y catalizador).
2. Espesante.
3. PCM, cera candelilla.
4. Cargas metálicas: aluminio en polvo.
5. Tiempo.
6. Variable dummy d1.
7. Variable dummy d2.

Los resultados (figura 7) establecen al PCM como el primer factor que más afecta a la entalpía un 50,21 %: la entalpía es directamente proporcional a la cera candelilla. La base es el segundo factor más influyente con un peso de 14,96 %, sin embargo, la entalpía es inversamente proporcional a la mezcla: a menor cantidad de base, mayor entalpía, era de esperar como se venía adelantando en los resultados del DSC-TGA. Y por último el aluminio afectando de la misma manera que la base con una influencia del 11,71 %. Es reseñable que el factor más irrelevante es el espesante, situándose por debajo de las variables dummy.

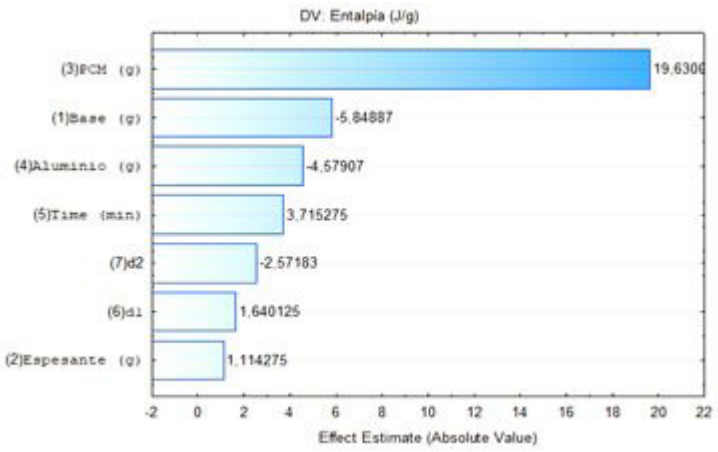


Figura 7. Diagrama de Pareto con siete factores y entalpía como variable dependiente.

4. Conclusiones

Basándonos en los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas a lo largo del desarrollo del presente trabajo, se han podido extraer un conjunto de conclusiones, resumidas en los siguientes puntos:

- Las resinas epoxi pueden actuar como material de soporte de PCM.
- La cantidad de PCM agregada a la mezcla influye de forma directa en las propiedades térmicas y de forma inversa en las propiedades mecánicas.
- La adición de espesante favorece la homogeneidad y compacidad de las muestras.
- El aluminio tiende a formar inclusiones no metálicas que perjudican a la homogeneidad.

- Reacciones de curado con mayor exotermia, favorecen las propiedades mecánicas.
- La pérdida de masa depende directamente de la entalpía.

Referencias

1. *Pérez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. A review on buildings energy consumption information. Energy Build. 2008, 40, 394-398.*
2. *Panwar, N.; Kaushik, S.; Kothari, S. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011, 15, 1513-1524.*
3. *Ibrahim, H.; Ilinca, A.; Perron, J. Energy storage systems—characteristics and comparisons. Renewable and sustainable energy reviews 2008, 12, 1221-1250.*
4. *Palomares, V.; Serras, P.; Villaluenga, I.; Hueso, K.B.; Carretero-González, J.; Rojo, T. Na-ion batteries, recent advances and present challenges to become low cost energy storage systems. Energy & Environmental Science 2012, 5, 5884-5901.*
5. *Chen, K.; Yu, X.; Tian, C.; Wang, J. Preparation and characterization of form-stable paraffin/polyurethane composites as phase change materials for thermal energy storage. Energy Conversion and Management 2014, 77, 13-21.*
6. *Soares, N.; Costa, J.J.; Gaspar, A.R.; Santos, P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. Energy Build. 2013, 59, 82-103.*

Determinación de la causa de rotura de un tubo de presión del control de combustible de un motor

Valles González, María Pilar[1,*], González Meije, Alejandro[1], Pastor Muro, Ana[1] y García Martínez, María[1]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Ctra. Torrejón-Ajalvir, Km. 4, 28850 Torrejón (Madrid).

* Email: vallesgp@inta.es

Resumen

Han sido bastante numerosos los casos de rotura que se han producido en tubos de presión pertenecientes al control de combustible de motores de avión. El objetivo de este trabajo es la determinación de la causa de rotura de un tubo de presión del control de combustible de un motor. El conjunto estaba compuesto por el tubo propiamente dicho, un conector soldado al mismo, zona en la que se ha producido la rotura, y una tuerca de unión al racor. La rotura se ha producido en una región próxima a la salida del cuerpo de apoyo de la tuerca de unión al conector. El estudio que se ha llevado a cabo ha consistido en realizar un examen de la superficie de fractura del tubo y después de analizarla a ojo desnudo y a través de una lupa binocular, se han determinado los caracteres macrofractográficos de la misma, extrayendo información de si hay macrodeformación plástica, si existe deterioro en la superficie, si se han producido en ella procesos de corrosión, si la rotura ha tenido lugar en uno o varios planos y la orientación entre los mismos, cómo es la textura de la superficie de fractura, etc. Se ha caracterizado el material química, mecánica y microestructuralmente, para comprobar si encuentra en el estado de tratamiento correcto. Se examinó de nuevo la superficie de fractura en un microscopio MEB-EC, para determinar sus caracteres microfractográficos y así obtener información del mecanismo que ha originado la fractura. Se han observado estriaciones, que son caracteres típicos de un mecanismo de rotura progresiva por fatiga, cuyo origen se encuentra en alguno de los defectos que se encuentran en la superficie exterior del tubo, consumándose la rotura final por sobrecarga estática.

Palabras clave

Tubo de presión, fractografía, rotura, fatiga.

1. Introducción

El acero del tipo X6CrNiTi18-10 es un acero inoxidable austenítico, que como los de su grupo Cr-Ni, presenta unas buenas propiedades de resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad, y además al estar estabilizado con Ti, mejora su comportamiento frente a la corrosión intergranular y la resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Por todas estas propiedades este acero tiene múltiples aplicaciones tanto en la industria del tratamiento térmico empleándose en los quemadores, hornos, cestillos, tubos, bandejas, etc., así como en la industria petroquímica, en la del procesado de alimentos, así como en tubos, vasos y conducciones de reactores nucleares. Es no magnético en la condición de recocido y solo puede ser endurecido por trabajo en frío [1]. Este tipo de acero también se utiliza para la fabricación de tubos de conducción de combustible, refrigerante, etc. en sistemas aeronáuticos. La rotura de estos tubos puede producirse por múltiples razones, y cuando tiene lugar en un tubo que transporta combustible puede ser especialmente peligroso ya que puede conducir a un fallo catastrófico [2]. Son numerosos los casos que se citan en la bibliografía siendo las principales causas del fallo fatiga, corrosión, desgaste, fluencia y sobrecarga. El mecanismo de fallo más común en los componentes de motores suele ser la fatiga inducida por carga cíclica termomecánica, que puede acelerarse por un ambiente corrosivo. La fatiga también se puede producir por deficiencias en la fabricación, diseño y manipulación en el servicio de los tubos [3, 4]. La rotura en esta ocasión se ha detectado durante la entrada en pista de la aeronave para realizar el despegue, por lo que no se han producido daños irreparables. Debido a los múltiples casos similares detectados, en el manual de mantenimiento del motor ya se establecieron precauciones que se deben tener en cuenta en su manipulación.

En este trabajo se presenta el procedimiento que se ha seguido para determinar la causa de rotura de un tubo de presión perteneciente al control de combustible de un motor.

2. Materiales y métodos. Sección experimental

El análisis químico del material del tubo fue realizado mediante un equipo de fluorescencia de rayos X (FRX), Panalytical modelo PW2404, y por las técnicas de fusión y combustión con equipos LECO, y se muestra en la tabla 1. Según esta composición, el material corresponde a un acero inoxidable del tipo **X6CrNiTi18-10** (**UNE EN 10886-1:2006**).

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	N
Base	0,03	0,57	1,63	0,024	0,002	17,1	10,2	0,42	0,48	0,30	0,0126

Tabla 1. Composición química (% peso)

Sobre una sección transversal del tubo en una zona alejada de la zona de rotura, se realizó un ensayo de dureza empleando para ello un microdurómetro **Future FM7 4310/MT/0199/00-S-00**, obteniéndose los valores en la escala Vickers, que aparecen en la tabla 2.

Muestra	Dureza (HV_{300g})
Sección transversal	212±6

Tabla 2. Dureza ($HV_{300\ g}$)

Las probetas metalográficas utilizadas para la caracterización microestructural se obtuvieron embutiendo las zonas de interés en resina conductora y, después de un pulido adecuado y un ataque químico con el reactivo Superpicral (10 g de ácido pícrico, 5 ml de HCl en 100 ml de etanol), se determinó la microestructura en un microscopio óptico Leica MEF4M.

Para la observación de la superficie de fractura se utilizaron una lupa binocular Leica Wild M10 y un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo (MEB-EC) Jeol 6500F, equipado con un sistema de microanálisis por dispersión de energías de rayos X (EDE) Oxford.

3. Resultados y discusión

3.1. Observación visual y estudio macrofractográfico

La rotura del tubo objeto de estudio, es de desarrollo transversal con una inclinación aproximada de 30º respecto del plano normal a la generatriz. Se sitúa en las proximidades de la zona de unión del terminal del conector al tubo. Presenta una cierta deformación en su diámetro y las superficies, en la mayor parte de la fractura, muestran una textura suave y brillante, figura 1.

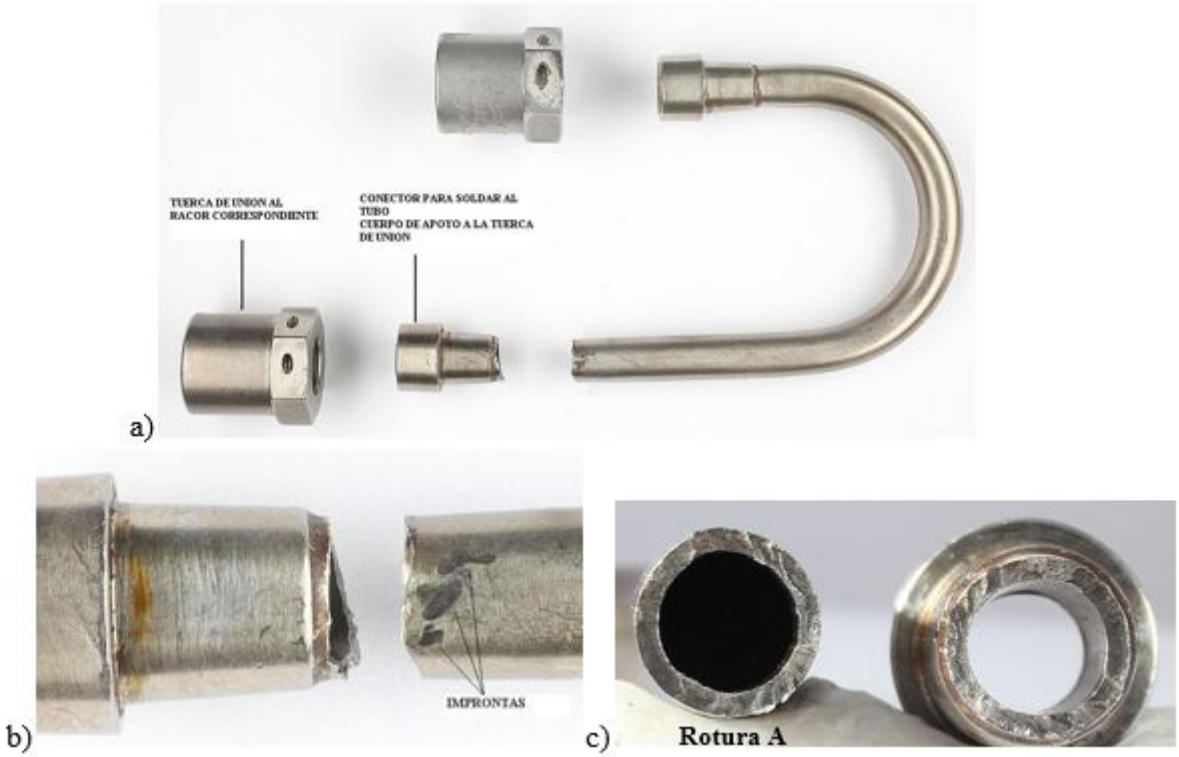


Figura 1. a) Vista del conjunto implicado en la rotura del tubo. b) Vista lateral de la zona de rotura. c) Rotura A y contrarrotura.

Se estudió la superficie de fractura de la rotura 1A, que aparece en la figura 1c. En dicha superficie fueron seleccionadas seis zonas, como se indica en la figura 2.

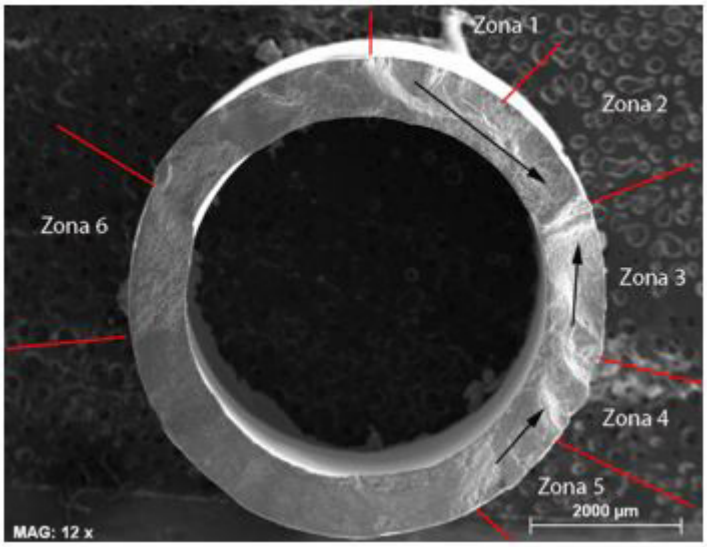


Figura 2. Vista frontal de la superficie de fractura de la rotura A. Las flechas indican el sentido de propagación de la rotura.

3.2. Caracterización microestructural

Se procedió a la embutición de dos probetas de una sección longitudinal y otra transversal del tubo de una zona alejada de la rotura.

La microestructura del material del tubo, figura 3, está constituida por granos equiaxiales de austenita, carburos y carbonitruros de titanio y carburos de molibdeno, que fueron analizados por EDE.

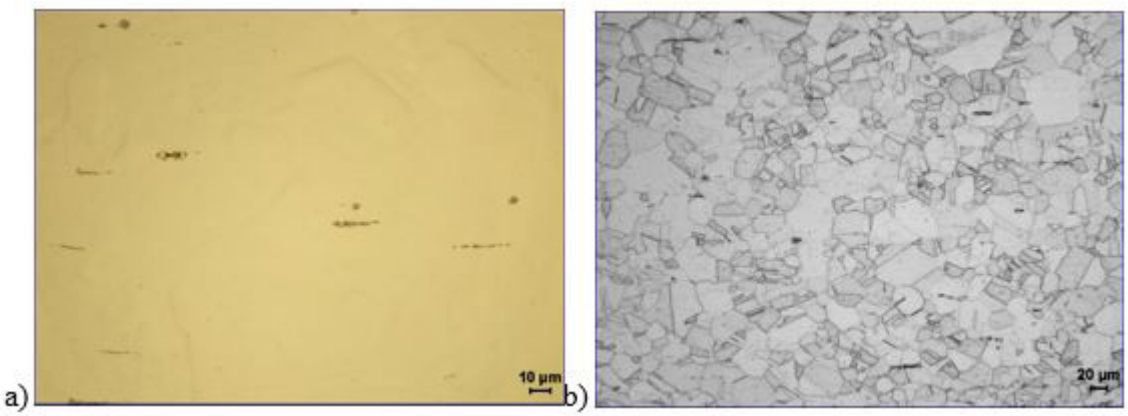


Figura 3. a) Carburos y carbonitruros dispuestos en cadena y alineados en la dirección longitudinal del tubo. b) Estructura austenítica.

3.3. Estudio microfractográfico

Fue examinada la superficie de fractura de la rotura A siguiendo en primer lugar la línea de observación indicada en la figura 2 entre las zonas 1 y 2. En la zona 1 se detectó el origen de la rotura observándose líneas de propagación y estriaciones de fatiga, figuras 4a-d, que también fueron localizadas en la zona 2, figura 4e. Asimismo se observaron microcúpulas aplastadas, que indican que se llegó a la rotura por sobrecarga, figura 4f. Posteriormente se siguió otra línea de observación entre las zonas 5 y 3, comprobándose la existencia de otra grieta cuyo origen se encuentra en la zona 5, aunque no se ha podido identificar debido a que en esta zona hay múltiples aplastamientos y está muy oxidada. Se observaron

estriaciones de fatiga en la zona 4 y microcúpulas que también estaban aplastadas en la zona 3, figura 5. Debido a los múltiples aplastamientos que presentaba la zona 6 no se pudo identificar en ella ningún carácter microfractográfico. En la superficie lateral externa en las proximidades de la zona 1, se observó una superficie con abundantes marcas y defectos, figura 6.

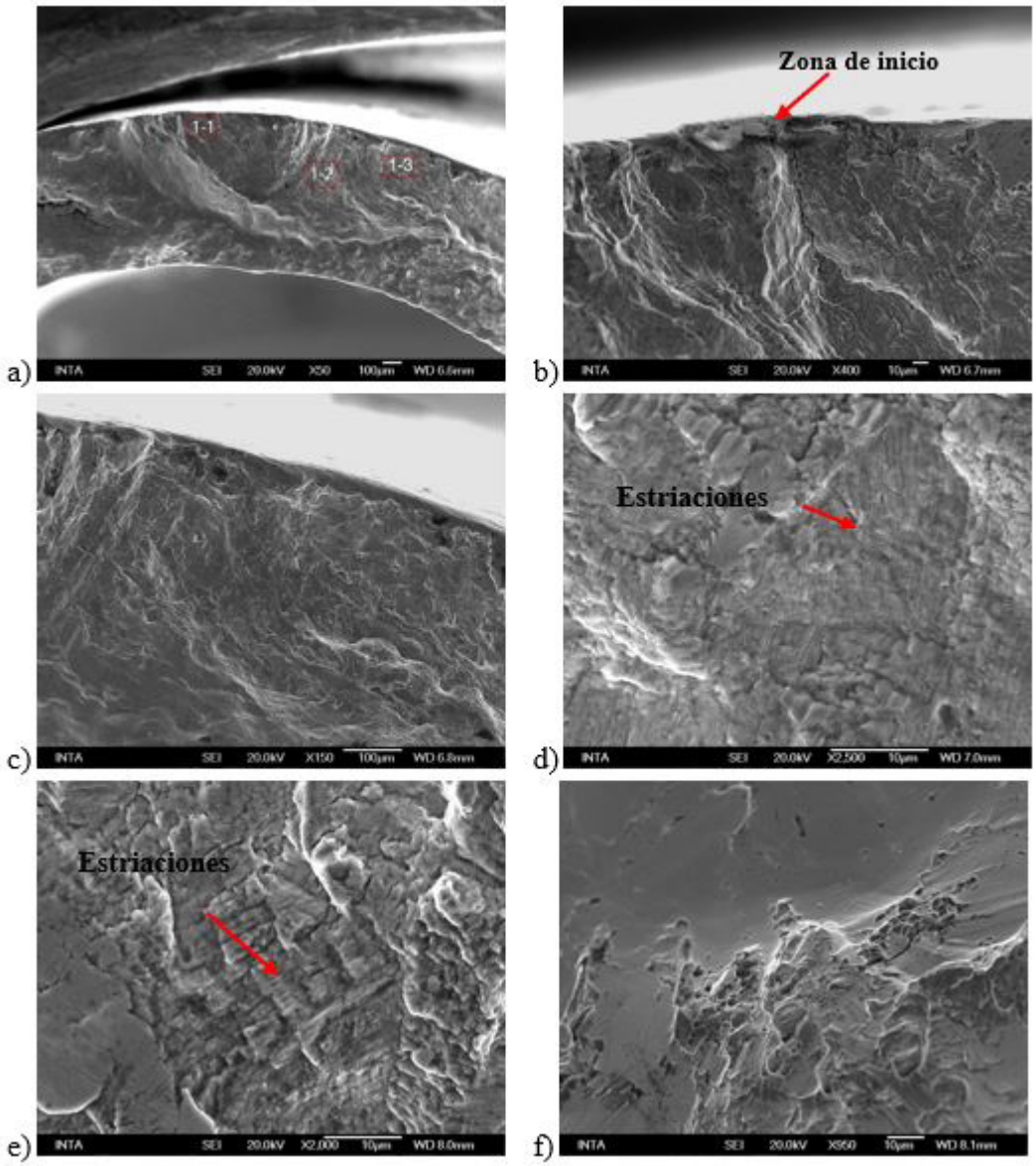


Figura 4. a) Zona 1. Vista general de la zona de inicio de una de las grietas de la fractura de la rotura A. b) Origen de la fractura. c) Propagación de la fractura. d) Estriaciones de fatiga. e) Zona 2. Estriaciones de fatiga. f) Microcúpulas aplastadas.

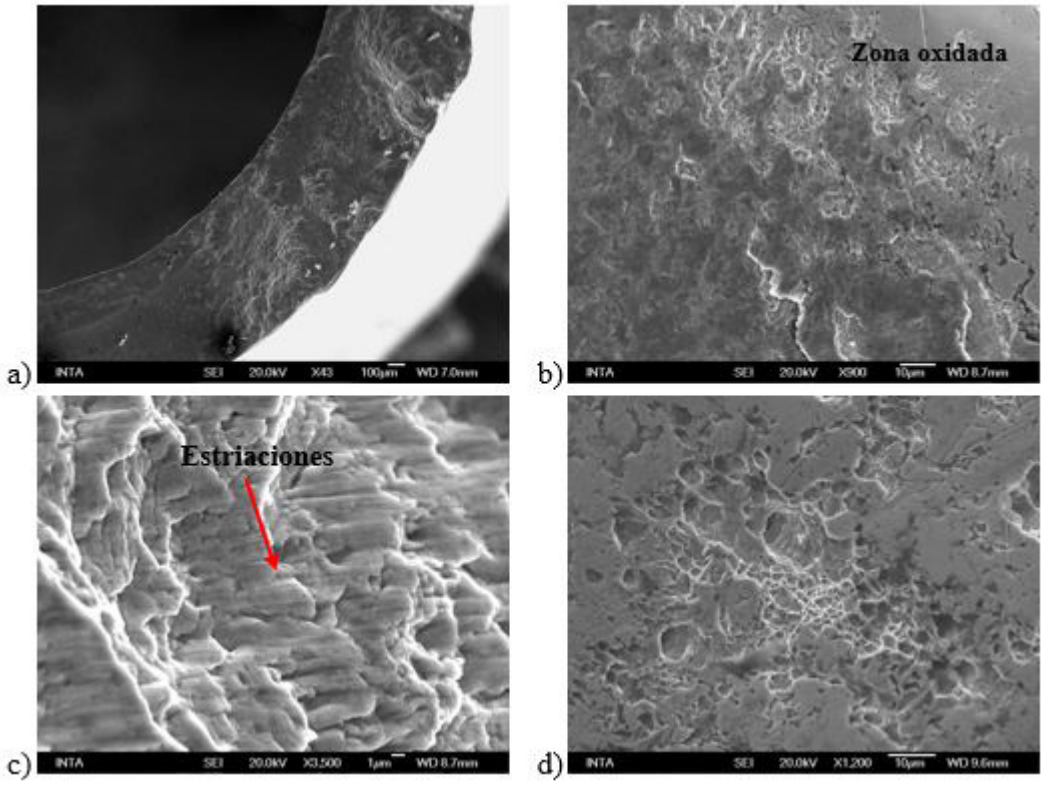


Figura 5. a) Zona 5. Vista general de la zona de inicio de la otra grieta de la fractura de la rotura A. b) Parte oxidada. c) Zona 4. Estriaciones de fatiga. d) Zona 3. Microcúpulas aplastadas.

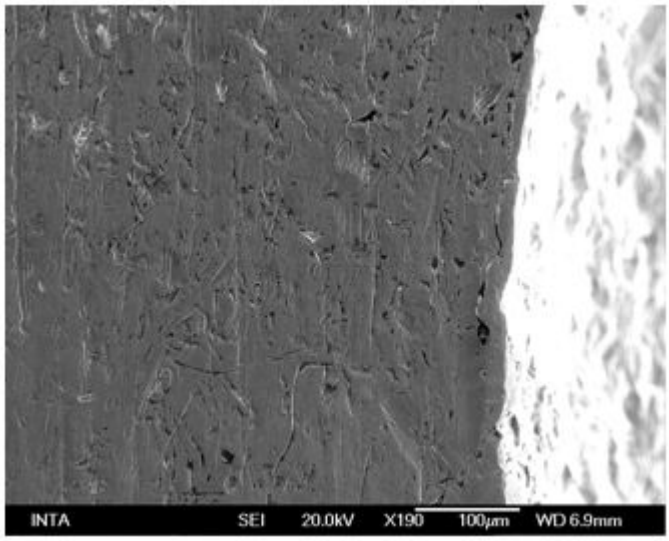


Figura 6. Zona 1. Aspecto superficial. Múltiples defectos.

En el estudio realizado hay al menos dos inicios de rotura. En ambos casos se observan estriaciones de fatiga, caracteres típicos de una rotura progresiva, habiéndose producido la rotura final por sobrecarga estática.

El mecanismo de fractura ha sido la fatiga, que puede haberse incubado en los múltiples defectos que se han encontrado en la superficie lateral externa y que se ha podido propagar por las vibraciones a las que ha estado sometido el tubo.

3.4. Perfil de rotura

Para comprobar el carácter transcristalino de los granos de la superficie de rotura en la zona 1, se procedió al corte longitudinal de la superficie de fractura de la contrarrotura, extrayendo una probeta que fue embutida y atacada adecuadamente. La figura 7 muestra su carácter transcristalino.

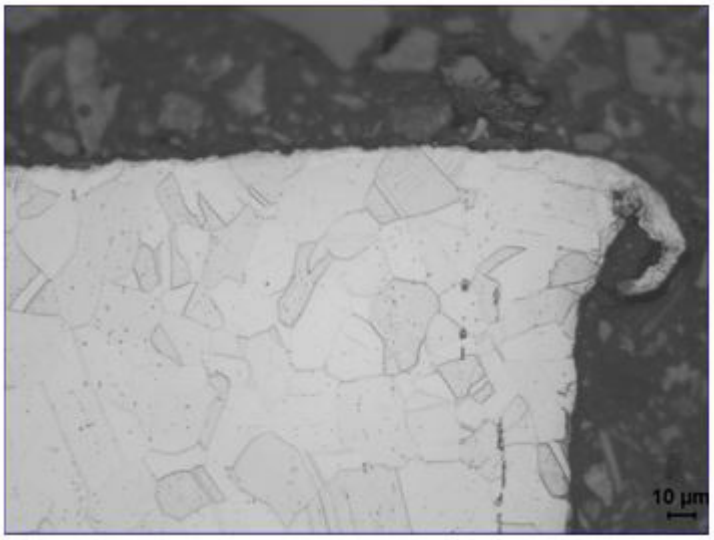


Figura 7. Contrarrotura. Zona 1. Perfil transcristalino.

4. Conclusiones

El tubo, fabricado con un acero inoxidable del tipo X6CrNiTi18-10 (UNE EN 10886-1), presenta una estructura austenítica, con un valor de dureza de 212 HV_{300g}, que corresponde a un estado de tratamiento térmico de recocido.

Tanto los caracteres macrofractográficos como microfractográficos revelan que la rotura del tubo se ha producido por un mecanismo de fatiga, probablemente como consecuencia de las vibraciones a las que ha estado sometido. Se han distinguido al menos dos inicios de rotura, uno de ellos localizado en la pared exterior del tubo, zona en la que presenta un incorrecto acabado superficial, consumándose la rotura final por carga estática. También pueden haber contribuido a la rotura las tensiones introducidas durante el montaje del tubo, cuya manipulación es muy crítica.

Aunque el tipo de acero y su estado de tratamiento son apropiados para el tipo de aplicación en el que se ha utilizado, un par de apriete incorrecto o la no instalación de bridas de sujeción para amortiguar las vibraciones que se producen en el motor, pueden propiciar la incubación de grietas en los defectos superficiales, y propagarse por un mecanismo de fatiga hasta llegar a la rotura.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de todo el personal del Área de Materiales Metálicos del INTA y en especial al Laboratorio de Caracterización Microestructural y Microanalítica.

Referencias

1. *Schwind M., Källqvist J., Nilsson J., Agren J., Andrén H-O., σ-Phase precipitation in stabilized austenitic stainless steeelsActa Mater. 48, 2000, 2473*
2. *Adib A.M.L., Baptista C.A.R.P., Barboza M.J.R., Haga C., Marques C.C.F., Aircraft engine bleed system tubes: material and failure mode analysis, Eng. Fail. Anal. 14, 2007, 1605–1617.*
3. *Clark G., Failures in military aircraft, Eng. Fail. Anal. 12, 2005, 755–771.*
4. *Bokwon L., Karkkainen R. L., Failure investigation of fuel tubes of a jet engine augmenter assembly Eng. Fail. Anal. 62, 2016, 39–48*

Estudio de la rotura de un cabezal del actuador de compuerta de una aeronave

García-Martínez, María[1,*], García de Blas Villanueva, F. Javier[1], Valles González, Mª Pilar[1], Pastor Muro, Ana[1]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Crta. de Ajalvir km.4, 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid). www.inta.es

* Email: garciamam@inta.es

Resumen

El objetivo de este estudio es la determinación de la causa de rotura del cabezal *rod end body* de un actuador de compuerta del tren de aterrizaje principal izquierdo de una aeronave. El análisis de fallos en servicio es importante para todas las disciplinas de ingeniería y en especial la industria de aviación, y tiene como fin contribuir a la prevención de futuros accidentes e incidentes. Roturas de componentes por fragilización inducida por metal líquido (LMIE) y fragilización inducida por metal sólido (SMIE) son menos comunes que las fracturas ocasionadas por otros fenómenos, aun así la SMIE también se produce, tal y como se presenta en este estudio. El cuerpo del cabezal estaba fabricado en acero AISI 4130 y sometido a un tratamiento superficial con cadmio. Se realizó un análisis químico del material del cabezal del actuador mediante la técnica de fluorescencia de rayos X. Para el estudio de la microestructura del acero se prepararon probetas metalográficas que se observaron en un microscopio óptico. El estudio fractográfico se llevó a cabo utilizando una lupa binocular y un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo MEB-EC equipado con un sistema de microanálisis EDE. El aspecto macroscópico de las superficies de fractura indicó que la rotura se había iniciado por múltiples orígenes en la región del orificio de lubricación. Debido a que en la microscopía electrónica de barrido se detectó cadmio en el material base y en las superficies de fractura cercanas a la región de origen de las grietas y que el estudio de la microfractografía de las superficies de fractura reveló el carácter frágil transcristalino de la fractura por pseudodescohesión, la fragilización inducida por metal sólido/líquido parece ser la hipótesis más probable como micromecanismo de inicio de rotura. El estudio concluyó que el fallo del actuador del cabezal fue el resultado de una fragilización inducida por metal sólido (SMIE) seguida de desgarro semifrágil y pseudodescohesión transcristalina produciéndose la rotura final por sobrecarga estática.

Palabras clave

Actuador compuerta, rotura, fractografía, cadmiado, fragilización, SMIE.

1. Introducción

Los aceros de alta resistencia mecánica templados y revenidos son susceptibles a diferentes tipos de fragilización [1]. La fragilización por hidrógeno de los metales es un fenómeno frecuente y conocido. Pero existe también el fenómeno de fragilización por metal líquido, *Liquid Metal Inducid Embrittlement* (LMIE), en el que un metal sólido normalmente dúctil y resistente, se vuelve de repente frágil, con consecuencias dramáticas para las estructuras en las que ha sido empleado [2, 3]. Este tipo de fragilización ocurre cuando el elemento fragilizador se encuentra en estado líquido, como por ejemplo aluminio humedecido con una amalgama de mercurio y zinc o de galio líquido y cobre a elevada temperatura humedecido con plomo y bismuto, debilitando los límites de grano [3] . Sin embargo la fragilización también puede tener lugar a temperatura muy por debajo del punto de fusión del elemento fragilizador conociéndose este fenómeno como fragilización por metal sólido, *Solid Metal Inducid Embrittlement* (SMIE) [2]. Se han registrado numerosos casos de pérdida de ductilidad, resistencia y fractura frágil de los metales y aleaciones sometidos a procesos de galvanoplastia o recubrimientos como el cadmio, o presencia de inclusiones cuya temperatura de fusión es inferior a la de los metales.

Existe bibliografía de fracturas por SMIE de piezas de distintas aleaciones como aceros inoxidables austeníticos, superaleaciones base níquel y aleaciones de aluminio como por ejemplo en casos estudiados de botellas de buceo o una válvula del sistema de refrigeración del motor de una aeronave [4, 5] y de aceros de alta resistencia cadmiados [6, 7 ,8 ,9 ,10 ,11 ,12], como es el caso de estudio en cuestión.

Se ha encontrado también bibliografía de un caso de estudio muy similar al del presente informe en el que una pieza de acero AISI 4330, que forma parte del sistema de ensamblado del tren de aterrizaje, sufrió la rotura por LMIE (*Liquid Metal Induced Embrittlement*) de una orejeta del sistema de anclaje [13]. La orejeta tiene un orificio pasador lubricado, al igual que el cuerpo *rod end body* del cabezal del actuador del presente informe, pero que en el caso de la bibliografía fue cadmiado involuntariamente.

2. Desarrollo experimental

El análisis químico del material del cabezal del actuador de compuerta fue realizado mediante un equipo de fluorescencia de rayos X (FRX), Panalytical modelo PW2404 y por técnicas de fusión y combustión con equipos LECO.

Se llevó a cabo un estudio microestructural para lo cual se embutieron tres probetas metalográficas en resina conductora, una de la sección longitudinal y dos de las secciones transversales cercanas y alejadas a la superficie de rotura y, después de un pulido adecuado y un ataque químico con el reactivo Vilella (1 g de ácido pícrico, 5 ml de HCl en 100 ml de etanol), se obtuvo la microestructura en un microscopio óptico Leica MEF4M. En este mismo microscopio se determinó la presencia y el espesor del recubrimiento. Dicho recubrimiento se analizó mediante un microscopio electrónico de emisión de campo (MEB-EC) Jeol 6500F, obteniendo su composición química semicuantitativa mediante espectrometría de dispersión de energías de rayos X (EDE) Inca.

Con el fin de determinar si el orificio de lubricación se encontraba obstruido se procedió al corte longitudinal de la pieza y se examinó mediante una lupa Leica Wild M10 y un microscopio electrónico de barrido (MEB) Jeol JSM-840.

Para la observación de la superficie de fractura se utilizaron una lupa binocular Leica Wild M10 y un microscopio electrónico de barrido (MEB) Jeol JSM-840, equipado con un sistema de microanálisis por dispersión de energías de rayos X (EDE) Bruker.

2.1. Observación visual y estudio macrofractográfico

Tras desmontar el cabezal del actuador para su inspección y estudio (figura 1a) se observó a ojo desnudo que la pieza estaba fracturada por dos zonas: una cercana al orificio de lubricación (fracturas 1 y 2) y otra alejada del orificio de lubricación (fractura 3) (figura 1b). A partir de la observación visual se apreció una macrodeformación plástica generalizada del cuerpo del cabezal, asociada al proceso de deformación y rotura, con la consecuente pérdida de redondez (figura 1c). Dicha deformación es consistente con la presencia de grietas transversales observadas a lo largo de todo el interior de anillo del cuerpo del cabezal (figura 1d).

Se inspeccionó el orificio de lubricación para lo cual se cortó la pieza longitudinalmente. Además de la grasa de lubricación se observaron partículas adheridas, cuyo análisis EDE indica que son virutas de acero AISI 4130 (figura 1e). Estas partículas metálicas, aunque no obstruyen completamente el orificio pueden dificultar la lubricación del mismo impidiendo el paso adecuado de la grasa de lubricación a través del orificio.

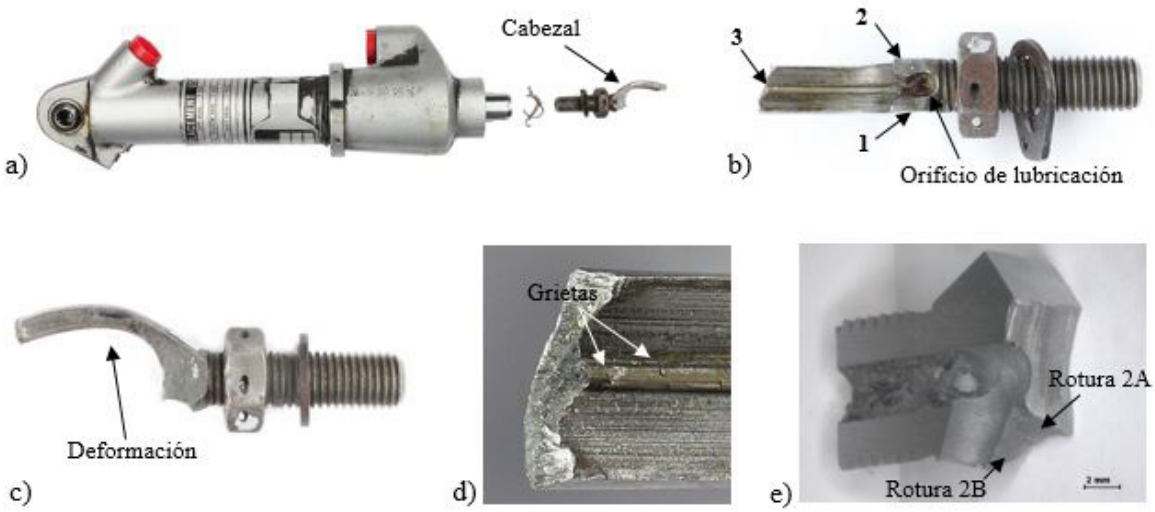


Figura 1. a) Separación del cabezal del actuador de compuerta del avión en estado de entrega. b) Vista frontal del cabezal: detalle de las roturas 1, 2 y 3 y orificio de lubricación. c) Vista lateral del cabezal: se observa deformación. d) Vista frontal y grietas en el anillo interior. e) Vista del corte longitudinal del orificio de lubricación.

Se observó que las fracturas 1 y 2 se desarrollan en dos planos (denominados A y B) que forman un ángulo de aproximadamente 135º entre sí (figura 2a), mientras que la fractura 3 presenta fundamentalmente un único plano (figura 1d).

Las superficies de fractura 1A y 2A son similares, la textura en ambas es fibrosa. Se observan estrías periféricas en el borde interior de la superficie que corresponde con el orificio de lubricación (figura 2b) que indican que la fractura se originó en esa zona. Se aprecian también marcas circunferenciales que indican los sucesivos frentes de propagación de la rotura (figura 2b). Las superficies de fractura 1B y

2B también son similares entre sí. Su textura es «leñosa» o de «madera podrida» (figura 2a). Al final de la superficie de rotura se observa un labio de salida tanto en 1B como en 2B (figura 2a). Por último, la superficie de fractura 3 también presenta una textura «leñosa» y un labio de salida al final de la superficie de rotura (figura 2c).

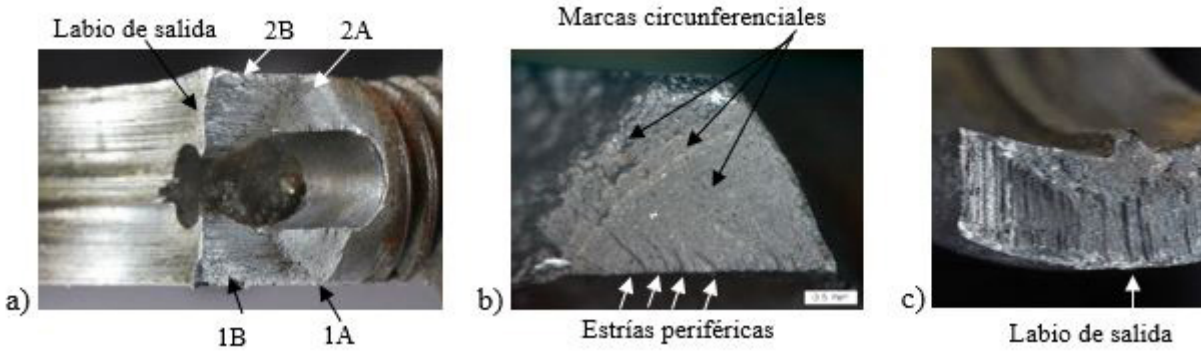


Figura 2. a) Superficies de fractura 1 y 2 cercanas al orificio de lubricación: planos de rotura A y B. b) Superficie de fractura 2A. c) Superficie de fractura 3 alejada del orificio de lubricación.

2.2. Análisis químico y caracterización microestructural

La composición química del material del cabezal, obtenida mediante FRX y por técnicas de fusión y combustión LECO expresada porcentualmente en peso, se muestra en la tabla 1.

Fe	C	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Base	0,27	0,52	0,006	0,024	0,14	0,90	0,18	<0,10

Tabla 3. Composición química (% peso).

De acuerdo con la composición obtenida, el cuerpo del cabezal *rod-end body* se ha fabricado con un acero AISI 4130.

La microestructura del material del cabezal es martensita revenida (figura 3a) con un grano muy fino cuyo tamaño es de 8-8,5 según el método de comparación de acuerdo con la norma ASTM E112 (figura 3b).

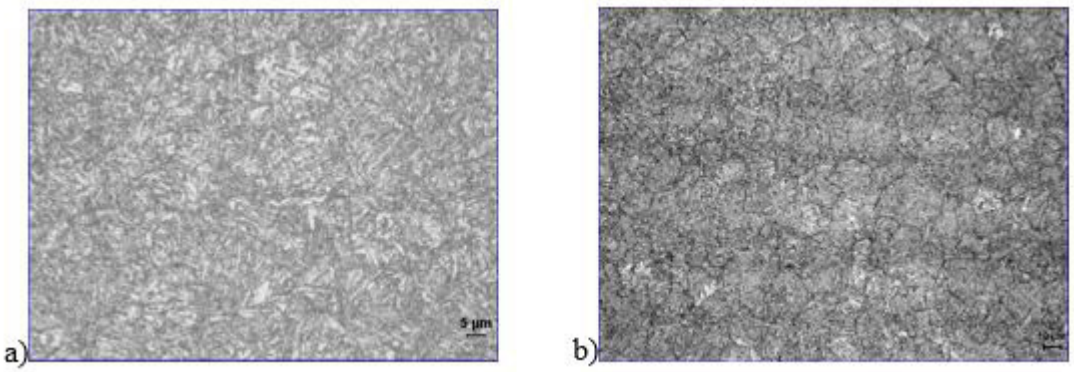


Figura 3. a) Martensita revenida. b) Martensita en grano austenítico.

Tanto en la sección longitudinal como transversal se observó que el cabezal estaba recubierto. El estudio de la probeta longitudinal muestra una capa, que una vez analizada por el sistema EDE del MEB-EC, se comprueba que es de cadmio y que en su zona interna tiene un espesor aproximado de 9 mm (figura 4a). Se han hallado grietas a lo largo de toda la zona interna que atraviesan el recubrimiento y llegan al material base debido, probablemente, a la macrodeformación plástica generalizada de la pieza asociada al proceso de rotura.

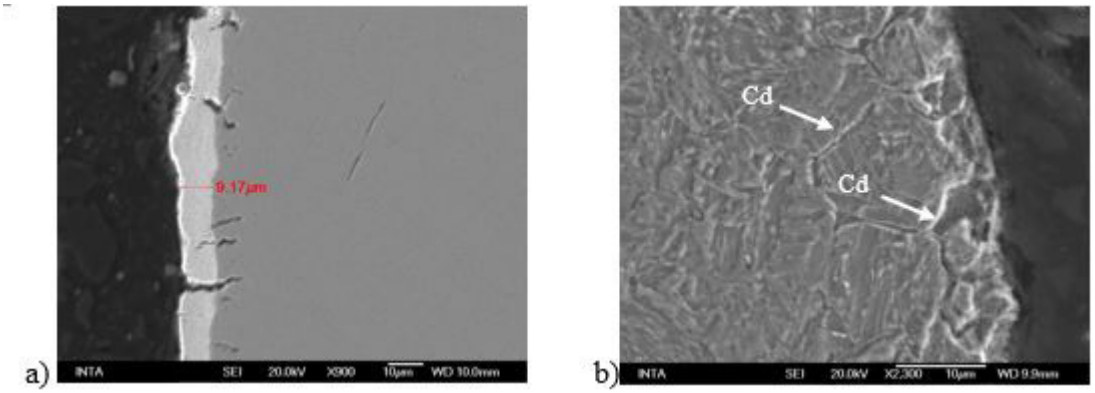


Figura 4. a) Capa de cadmio de 9 mm de espesor con grietas. b) Cd en los bordes de grano del material base.

Se ha detectado un constituyente blanco en el límite de grano en la zona próxima a la superficie de la pieza (figura 4b) y en las propias superficies de rotura 1A y 2A cerca del borde del orificio de lubricación (figura 5a), que una vez analizado mediante EDE, corresponde a Cd.

2.3. Estudio microfractográfico

Fueron examinadas las superficies de fractura 1A y 2A siguiendo la línea de observación indicada en la figura 5a y que corresponde con la dirección de la propagación de la fractura. De acuerdo con las estrías periféricas observadas en el borde interior correspondiente al orificio de lubricación de los planos de rotura 2A, la rotura comenzó en esta zona mediante múltiples inicios (figuras 5a y 5b).

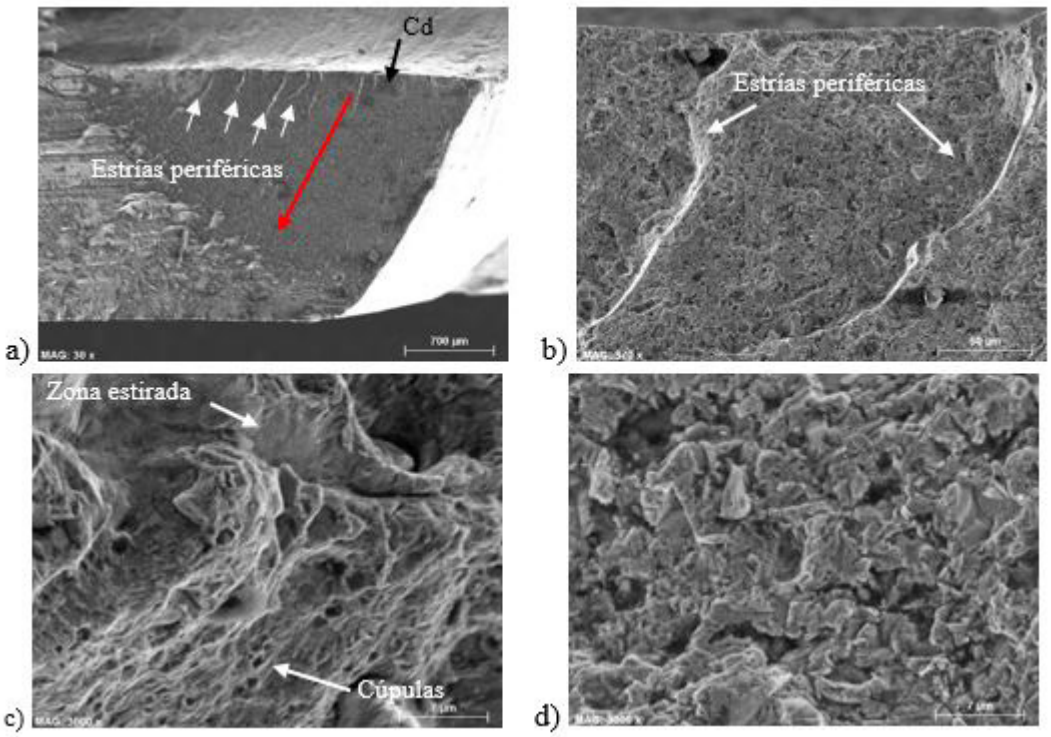


Figura 5. Fractura 1A: a y b) Zona de origen de la fractura, estrías periféricas y Cd en la superficie de fractura. Se indica la línea de propagación de la rotura. c) Cúpulas de poco desarrollo y zonas estiradas. d) Pseudofacetas de descohesión.

A continuación la fractura se propagó por toda la superficie de fractura 2A hasta el borde de la misma, de acuerdo con las marcas circunferenciales concéntricas observadas que indican los

sucesivos frentes de propagación de la grieta (figura 5a). Las cúpulas de poco desarrollo y zonas estiradas observadas en esta zona indican que tuvo lugar un desgarro semifrágil, con un relieve típico de mezcla de cúpulas y pseudodescohesiones, en este caso transcristalinas (figuras 5c y 5d). En los aceros templados y revenidos, como es el caso, el mecanismo de descohesión transcristalina no dispone de planos cristalográficos bien definidos para operar y como consecuencia tiene lugar la separación del material en el sentido de los esfuerzos a tracción creando unas superficies que se asemejan a las de descohesión transcristalina, menos planas y sin apreciar una relación clara y definida entre las facetas y la estructura cristalográfica. El desgarro semifrágil, típico también de aceros templados y revenidos, es un proceso de propagación a alta velocidad de la grieta, actúa de forma discontinua, siendo brevísimos los tiempos de parada, lo cual coincide con las marcas circunferenciales observadas. El proceso produce una micromorfología típica en que las facetas de pseudodescohesión transcristalina aparecen embebidas y rodeadas por una malla continua de cúpulas [14].

La rotura continuó por las superficies de fractura 1B y 2B, figura 6a, mediante los mismos micromecanismos de rotura que en 1A y 2A, desgarro semifrágil y pseudescohesión transcristalina, coherente con los caracteres micromorfológicos observados, pseudofacetas de descohesión y además grietas secundarias (figuras 6b y 6c). La rotura termina en estas superficies de fractura por el interior de la pieza con una deformación plástica localizada que viene caracterizada por los labios de salida (figura 6d).

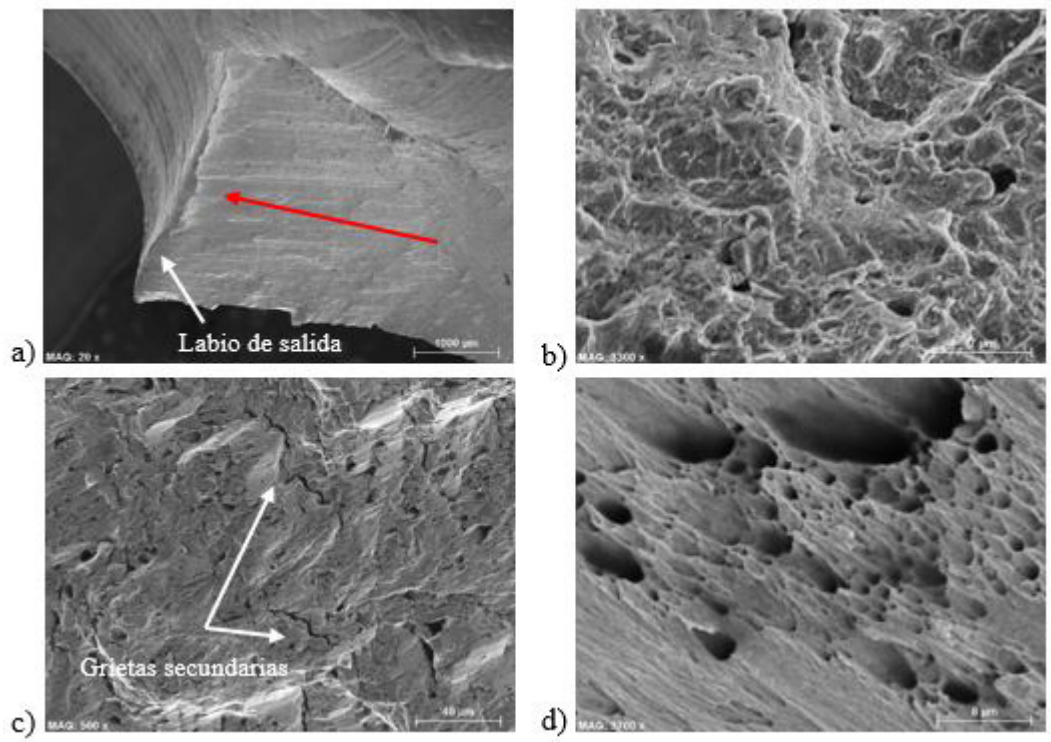


Figura 6. Fractura 1B: a) Se indica la línea de propagación de la rotura. b) Pseudofacetas de descohesión. c) Grietas secundarias. d) Cúpulas inclinadas en el labio de salida.

La rotura total de cabezal termina en la superficie de fractura 3 de forma transcristalina y ocasionada por sobrecarga estática, de acuerdo con el relieve de cúpulas observadas en toda la superficie de fractura (figura 7). Se aprecia un mayor desarrollo de las cúpulas, característico de una rotura dúctil a nivel microscópico.

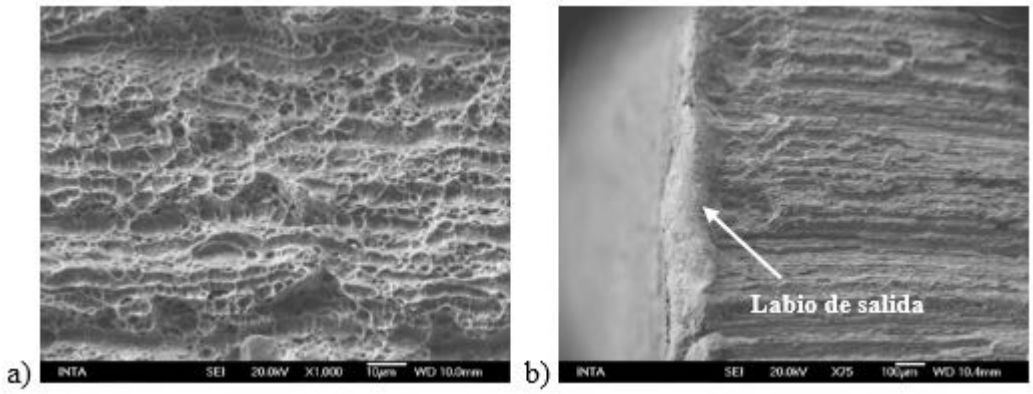


Figura 7. Fractura 3: a) Cúpulas. b) Labio de salida.

Este estudio microfractográfico revela el carácter frágil transcristalino de la fractura por pseudodescohesión, apuntando a los mecanismos que producen este tipo de fracturas como los responsables del fallo. Existen diversos mecanismos que pueden provocar la aparición de roturas transcristalinas por descohesión pero, considerando que se ha detectado cadmio en el material base, la fragilización inducida por metal sólido/líquido parece la hipótesis más probable.

En la rotura del cuerpo del cabezal del actuador *rod end body* se observaron los mismos caracteres microfractográficos, típicos de SMIE, que en los casos publicados en la bibliografía [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. En la zona donde se inicia la fractura se observa que la rotura es frágil intercristalina, y en ocasiones transcristalina, como es el caso del cabezal, o una mezcla de ambas, junto con grandes zonas de descohesión o pseudodescohesión y en ocasiones algunas pequeñas zonas de cúpulas de poco desarrollo. Además, mientras que en LMIE una única grieta es la que da lugar al fallo, habitualmente en SMIE se generan múltiples grietas, lo cual concuerda con los múltiples inicios de fractura que evidencian las estrías periféricas y las grietas secundarias observadas.

3. Conclusiones

El análisis químico y estudio microestructural indican que el material con el que se ha fabricado el cuerpo del cabezal *rod end body* de un actuador de compuerta corresponde a un acero templado y revenido AISI 4130. La pieza se encuentra recubierta con cadmio.

Se ha observado una macrodeformación plástica de la pieza, asociada al proceso de rotura, consistente en la deformación del cuerpo del cabezal con la consecuente pérdida de redondez. La fractura se inicia cerca del orificio de lubricación y se desarrolla fundamentalmente por un mecanismo de desgarro semifrágil y de descohesión transcristalina, típico de los aceros templados y revenidos como es el material base de la pieza, produciéndose la rotura final por sobrecarga estática.

Teniendo en cuenta que se ha detectado cadmio en los límites de grano del material base y que el estudio microfractográfico de las superficies de rotura revela el carácter frágil transcristalino de la fractura por pseudodescohesión, la fragilización inducida por metal sólido parece ser la hipótesis más probable como micromecanismo de inicio de rotura.

Se ha comprobado que el orificio de lubricación estaba parcialmente obstruido por partículas metálicas procedentes del mecanizado del mismo orificio, afectando muy probablemente a la lubricación de la pieza, generando un posible calentamiento que haya favorecido el SMIE como factor determinante en el fallo.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de todo el personal del Área de Materiales Metálicos del INTA y en especial al Laboratorio de Caracterización Microestructural y Microanalítica.

Referencias

1. *E. Gustavo Maffia, P. B. (s.f.). Estructura y propiedades de las aleaciones. Capítulo 10: Fenómenos de fragilización en aceros. Facultad de Ingeniería: Universidad Nacional de La Plata (UNPL).*
2. *Kolman, D. G. Liquid Metal Induced Embrittlement. ASM Handbook. 2003:13A Corrosion: 975-1009.*
3. *Research, U. A. Embrittlement by liquid metals. Technical report n.º 1. 1972.*
4. *Lynch, S. P. Failures of Structures and Components by Metal-Induced Embrittlement. J. Fail. Anal. And Preven. 2008;8: 259-274.*
5. *Lynch, S. P. Failures of Engineering Components due to Environmentally Assisted Cracking. Practical Failure Analysis. 2003;3(5): 33-42.*
6. *Serope Kalpakjian, S. R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. México: Pearson Educación. Ed. 4.ª, 2002.*
7. *O. H. Cook, R. E. Investigation of solid cadmium embrittlement in A-7 aircraft failed shafts and horn fracture surfaces. Final rept. 1 Apr 1972-15 May 1973. Air Force Materials Lanoratory. 1973.*
8. *Y. Asayama, M. H. Embrittlement by liquid and solid metals. Ed. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineer. 1984.*
9. *Meyn, D. A. Corrosion. 1973;29: 192-196.*
10. *Stoloff, N. S. Metal-Induced Fracture. EICM Proceedings. NACE. 1990.*
11. *Lynch, S. P. Mechanisms and Kinetics of environmentally assisted cracking: current status, issues and suggestions for further work. Metallurgical and Materials Transactions A. 2013;11A: 1209-1229.*
12. *Mackeinze, S. Overview of the Mechanisms of Failure in Heat treated Steel Components. Failure Analysis of Heat Treated Steel Component. ASM International. [Internet]. 2008.*
13. *https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05113g_chapter2.pdf*
14. *Warke, W. R. Liquid Metal and Solid Metal Induced Embrittlement. ASM Handbook. 2002:11 Failure Analysis and Prevention: 1821-1837.*
15. *Pintado, J. Fallo en Servicio de los Materiales Metálicos. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. 1992.*

Influencia de la emisividad superficial en la determinación de la Tg mediante DMA

Vaz Fernández, Isabel[1], López Sánchez, Raúl[1,*] y Rams Ramos, Joaquín[2]

[1] Área de Materiales Energéticos, Departamento de defensa NBQyM, Subdirección de Sistemas Terrestres, INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Ctra. M301 km.10.5 Edif.7, La Marañosa, 28330 San Martín de la Vega, Madrid, Spain.

[2] Departamento de Matemática Aplicada, Ciencia e Ingeniería de Materiales y Tecnología Electrónica, Universidad Rey Juan Carlos: Calle Tulipán, s/n, 28933 Móstoles, Madrid.

* Contacto: lopezsr@inta.es (R. López).

Resumen

Los materiales compuestos de matriz polimérica están sustituyendo progresivamente a los materiales metálicos en algunas aplicaciones estructurales, principalmente en el campo aeronáutico y de defensa. Ello se debe a que estos materiales permiten aligerar las estructuras gracias a sus mejores propiedades específicas. Como inconveniente, los polímeros presentan rangos térmicos de aplicación más limitados, acotados superiormente por la temperatura de transición vítrea, *Tg*, en aquellos con fase amorfa. Superada esta temperatura, el material cambia de sólido rígido a gomoso perdiendo gran parte de su funcionalidad estructural. El estudio del comportamiento de estos materiales facilita la predicción del comportamiento de las nuevas estructuras durante su vida en servicio, como sucedió en la renovación del fusil CETME por el HK G-36 actual.

El análisis dinamomecánico, DMA, es una técnica ampliamente utilizada para cuantificar la *Tg* en los polímeros amorfos. El procedimiento experimental aparece recogido en diversas normas internacionales como la ISO6721-11, ASTMD7028-07 y STANAG 4540. Cambios en el procedimiento experimental pueden tener influencia en el resultado de una manera difícilmente predecible en base a la bibliografía actual. El presente trabajo utiliza polimetilmetacrilato (PMMA) para analizar la influencia de ciertas variables en la medida de la *Tg* mediante ensayos de DMA. Se han considerado diferentes variables del ensayo y del propio material, como son la velocidad de calentamiento, la emisividad superficial y el historial térmico.

Palabras clave

Emisividad superficial, transición vítrea, *Tg*, DMA.

1. Introducción

Los polímeros son macromoléculas compuestas por la repetición de unidades simples denominadas monómeros, configurados en forma de largas cadenas que se enlazan y empaquetan. En base al empaquetamiento pueden distinguirse dos fases que coexisten en el polímero: la fase amorfa y la cristalina. La fase amorfa es la responsable de la transición vítrea, *Tg*, una propiedad intensiva del material. A partir de la temperatura a la que se produce dicha transición el polímero presenta un estado gomoso, habiendo perdido la mayor parte de las propiedades mecánicas que ofrecía a temperaturas más bajas. Las temperaturas de transición vítrea tabuladas son difícilmente reproducibles de forma experimental. A efectos prácticos, suelen considerarse valores orientativos (±10 ºC aprox.), no valores exactos, que definen un entorno térmico en el que se produce la transición.

La variabilidad que se observa en esta propiedad del material se debe a varias causas, una de las principales corresponde con las variaciones en la composición. Incluso cuando dos materiales reciben el mismo nombre por disponer de la misma cadena principal, es habitual que existan cambios en la concentración de aditivos como plastificantes y colorantes en función de la aplicación buscada. Otras causas de la variabilidad en la *Tg* corresponden con problemas experimentales. A pesar de la importancia de esta propiedad, sigue existiendo una dependencia de la medida de la Tg con la técnica utilizada para obtener el valor experimental, dificultando la intercomparabilidad de las medidas. Este último aspecto se encuentra íntimamente relacionado con la dificultad de disponer de patrones en las calibraciones, controles de calidad e intercomparaciones.

El análisis dinamomecánico, DMA, es una de las técnicas de análisis térmico más utilizadas para la caracterización de las propiedades mecánicas de materiales poliméricos. Esta técnica permite una determinación precisa de la temperatura de transición vítrea. En su modo de trabajo más habitual se aplican esfuerzos de carácter cíclico y se registra la deformación del material mientras se impone una rampa de calentamiento dentro del horno del DMA, responsable de la transmisión de calor. En el estado del arte actual, es habitual que el aporte de calorías se realice por efecto Joule mediante las resistencias del horno, el cual también está dotado de capacidad para retirar calor mediante una corriente de gas por convección forzada. A pesar de los esfuerzos realizados por los fabricantes para conseguir una transmisión de calor basada puramente en convección, tal y como se presentará, en algunas ocasiones se debe seguir considerando, al menos, un mecanismo adicional de transmisión de calor: la radiación.

En este documento se presentará el estudio crítico de algunas de las actuales fuentes de variabilidad en la medida de la *Tg*, además de ofrecer alternativas para minimizar tanto errores sistemáticos (*bias*) como errores aleatorios (incertidumbre) en las medidas.

2. Temperatura de transición vítrea por DMA

La calibración en temperatura es una parte esencial para la determinación trazable de las transiciones térmicas. Sin embargo, debido a la falta de patrones apropiados, este proceso de calibración continúa siendo complejo. El registro de la temperatura en el horno suele realizarse mediante un termopar [1]

cuya calibración, fácilmente, puede hacerse trazable a estándares internacionales, aunque la temperatura que realmente debería registrarse sería la del material. Debido a que el modo de trabajo habitual es el de la rampa térmica, siempre se producirá un gradiente térmico entre termopar y probeta, diferencia que habitualmente se considera despreciable. En el caso de que no lo sea, interrelacionar las temperaturas del termopar y de la probeta se convierte en la principal dificultad para obtener calibraciones realistas y, por lo tanto, medidas trazables y comparables.

Del estudio de las normativas vigentes para la determinación de la temperatura de transición vítrea mediante DMA, para el presente estudio se destacan la AITM1-0003 [2] y la ASTM D7028-07 [3] por su mayor implantación en el ambiente aeronáutico y de defensa en Europa. La primera de ellas, una normativa interna de AIRBUS, no solo define las condiciones de ensayo para la determinación de la *Tg*, llega incluso a señalar los equipos apropiados para la realización de los ensayos. Ambas normativas coinciden en definir los valores necesarios para las variables de ensayo principales tales como la frecuencia del ensayo, el modo de trabajo y la rampa de calentamiento. Sin embargo, del análisis comparativo de ambas normas, también pueden observarse diferencias significativas como son el número de repeticiones necesarias, superior en la AITM, o la posibilidad de que el material analizado contenga un elevado porcentaje de humedad, aspecto que solo está permitido en la ASTM.

La calibración, esencial en cualquier determinación cuantitativa, curiosamente, no es un aspecto especialmente cuidado en las citadas normas, principalmente debido a las dificultades que se expondrán posteriormente. Mientras que la norma ASTM delega la calibración térmica en los procedimientos diseñados por el fabricante del equipo, la norma AITM1-0003 recomienda una calibración basada en polímeros certificados, siendo esto un problema debido a que no siempre los polímeros, o sus certificados, se encuentran disponibles.

Incluso por delante del muestreo, la calibración se considera la principal fuente de desviación en la determinación cuantitativa del valor verdadero de la *Tg* en propulsantes de tipo sólido, sin embargo existen otras fuentes de *bias* que habitualmente no son consideradas y que consideramos de relevancia, tales son la efusividad térmica y la emisividad superficial.

2.1. Efusividad térmica

La efusividad térmica de un material es una propiedad relacionada con su capacidad para intercambiar energía térmica con su entorno. La cuantificación de esta propiedad permite conocer la magnitud y sentido del intercambio de calor.

Durante los ensayos de DMA la probeta se encuentra en el horno cuya temperatura, habitualmente, será superior a la de la probeta. De este modo se induce un calentamiento del material, es decir, un flujo térmico desde el ambiente del horno hacia el material. Menores efusividades térmicas implican mayores gradientes, mayores diferencias entre la temperatura real y la registrada por el termopar. Sin necesidad de recurrir a complejos métodos de análisis [4] es posible determinar la influencia de esta propiedad en la determinación de la *Tg* mediante la repetición de ensayos sobre el mismo material con diferentes rampas de calentamiento.

2.2. Emisividad superficial

La emisividad es una propiedad del estado superficial de un material, su determinación permite conocer la tasa de energía térmica emitida, o absorbida, en relación con la del cuerpo negro para la misma temperatura. Cuando la emisividad es igual a la absorbancia se cumple la ley de Kirchhoff [5], una situación similar a la del horno del DMA, al ser un recinto isotermo y en equilibrio térmico. Mayores emisividades superficiales se corresponden con superiores flujos térmicos de absorción de energía, debido a la transmisión de energía por radiación. Este aporte adicional de calor influye en la temperatura de la probeta, introduciendo una nueva desviación en el registro de la temperatura por el termopar del horno.

Aplicando estos principios a nuestro caso particular, la emisividad superficial de la probeta ensayada puede relacionarse con la cantidad de calor absorbida por radiación durante un ensayo realizado con

rampa de calentamiento. La ley del enfriamiento de Newton, ecuación 1, permite relacionar el caudal de calor intercambiado y la diferencia de temperaturas entre dos cuerpos [6]:

$$\frac{dT}{dt} = -k \cdot (T - T_a) \quad (1)$$

donde T-T_a es la diferencia de temperatura entre dos cuerpos, t el tiempo y k una constante.

3. Parte experimental

3.1. Materiales y equipos

Para el presente estudio se ha utilizado el DMA Q800 de *TA Instruments*, figura 1. Las mordazas utilizadas irán en función del modo de trabajo, que en este estudio será de doble empotramiento.

Figura 1. DMA Q800 del fabricante TA Instruments.

Las probetas utilizadas durante el presente estudio son paralelepípedos de 60 mm de longitud, 4 mm de espesor y 10 mm de anchura, homogeneizadas por recocido, pero de dos naturalezas muy diferentes en función del estudio realizado.

En la primera parte del trabajo se estudia la variabilidad de la *Tg* en función del historial térmico del material, habiéndose elegido un polímero termoplástico, el polimetilmetacrilato, PMMA. Este material ofrece una buena solución de compromiso al presentar una *Tg* en el rango medio de los polímeros, una amplia variedad de composiciones comercialmente disponibles y una elevada resistencia al envejecimiento. Para este estudio, todas las probetas se sometieron a un proceso calentamiento a 155 ºC durante 2,5 días antes de ser utilizadas, proceso al que se denominará posteriormente como *recocido*. El objetivo de este tratamiento térmico, realizado en atmósfera de aire, es reducir la dispersión en la medida de la *Tg* para las probetas mecanizadas de PMMA. El material obtenido comercialmente, sin recocido, presenta una dispersión en las medidas de la *Tg* que supera los 10 ºC. Tras el recocido se obtienen resultados reproducibles en la medida de Tg, sin degradación del polímero al observarse que el efecto introducido es reversible de forma natural. Es decir, tras 1 semana las probetas vuelven a presentar una dispersión en su *Tg* similar a la del material original.

En la segunda parte del trabajo se aborda la influencia de dos propiedades del material en la medida de la *Tg*: la emisividad superficial y la efusividad térmica. Para este estudio se precisan probetas con una *Tg* lo más reproducible posible, aspecto que reduce la experimentación necesaria para observar desviaciones sobre el valor medido. Comercialmente no es posible obtener este tipo de muestras, lo que condujo a la

invención de las denominadas *probetas de calibración*, n.º de patente ES 2 561 952 B2 (2016) [7], que garantizan estabilidad y reproducibilidad en la temperatura de transición de la probeta. Disponiendo de un grupo homogéneo de probetas, se realizaron modificaciones en su emisividad mediante dos recubrimientos superficiales: aluminio y níquel, ambos con espesores inferiores a 100 µm. El níquel presenta un valor de emisividad comprendido entre 0,04 y 0,07, mientras que el aluminio presenta valores entre 0,2 y 0,4. Esta diferencia de emisividades asociada a dos tipos de acabados superficiales permite analizar su efecto en los ensayos de DMA frente a diferentes rampas de calentamiento. El efecto del recubrimiento se demostró reversible utilizando la posibilidad de reutilizar las probetas de calibración.

3.2. Procedimiento de ensayo

Durante el ensayo por DMA se utilizará una atmósfera de nitrógeno, amarre por doble empotramiento y las siguientes condiciones de ensayo:

1. Par de apriete de la mordaza de 8 lb/in.
2. Temperatura de inicio 80 ºC, isoterma durante 1 minuto.
3. Rampa de calentamiento de 5 ºC/min.
4. Temperatura final de 140 ºC.
5. Amplitud de oscilación de 15 µm.
6. Frecuencia de oscilación de 1 Hz.

4. Discusión de resultados

4.1. Modificación de la Tg en función del historial térmico

El presente estudio ha consistido en someter grupos equivalentes de probetas poliméricas a ciclos de recocido de distinta duración, cuyos resultados se presentan en la figura 2. La agrupación de puntos para 2,5 días en el horno corresponde al proceso de recocido, y la dispersión observada puede relacionarse con la bondad del proceso de homogeneización de la *Tg* sobre material original. La dispersión original, >10 ºC, se reduce a, aproximadamente, 2 ºC (2S).

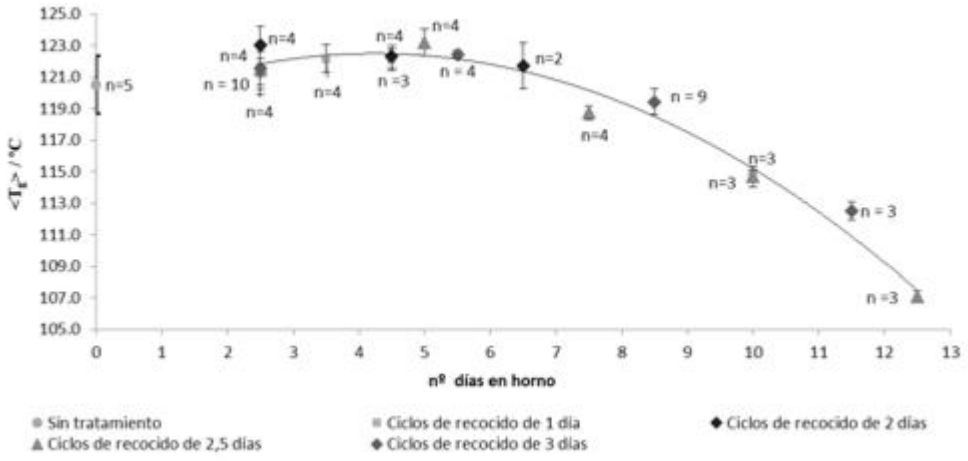


Figura 2. Variación de la Tg en función del tiempo de tratamiento térmico.

Tras el recocido de 2,5 días, los grupos de probetas se muestran equivalentes, no muestran diferencias estadísticamente significativas en la medida de la *Tg* con incertidumbre calculada como 2S. Posteriormente, estas probetas se someten a un tratamiento térmico a 155 ºC durante intervalos temporales

diferentes, presentando la *Tg* de las probetas una correlación con el tiempo del tratamiento térmico que puede ajustarse a la ecuación 2.

$$T_g = -0.22 \cdot t^2_{horno} + 1.86 \cdot t_{horno} + 118 \quad (3)$$

Con las condiciones de tratamiento térmico presentadas no se consigue que el PMMA muestre *plateau*, es decir, no se alcanza una *Tg* estable en el material, superado un tiempo dado de tratamiento térmico. Sin embargo sí se ha observado la influencia del historial térmico sobre la *Tg* presentada.

4.2. Influencia de la emisividad superficial y de la efusividad térmica

Los resultados del estudio basado en la medida de la *Tg* en función de dos diferentes rampas de calentamiento sobre probetas equivalentes, pero con un estado superficial diferente, puede observarse en la figura 3. Las probetas de calibración [7] ofrecen una dispersión máxima de 0,5 ºC (2S). Del análisis de los resultados puede concluirse que superiores velocidades de calentamiento implican el registro de temperaturas de transición superiores, aun cuando la transición térmica se mantenga inalterada, mos-

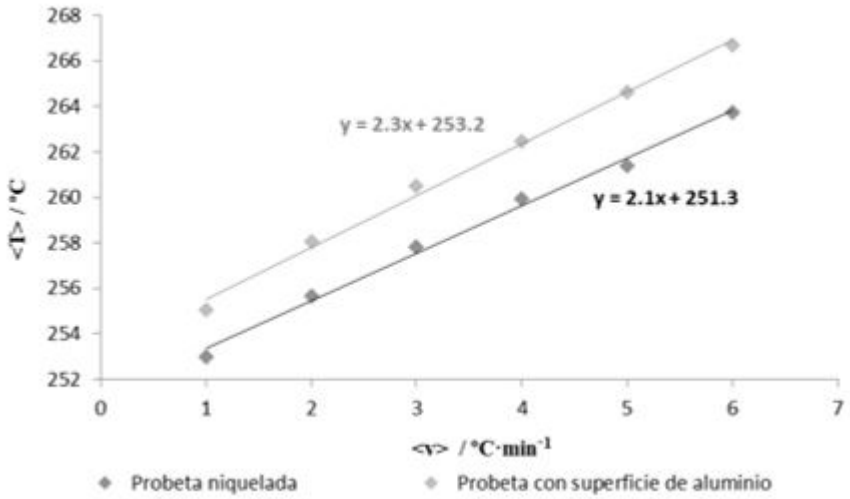


Figura 3. Temperatura de transición en función de la rampa de calentamiento y del recubrimiento superficial.

trándose el error sistemático introducido en la medida por la rampa de calentamiento.

La influencia de la efusividad del material puede observarse en la pendiente de cada una de los ajustes en la figura 3. Una mayor velocidad de calentamiento implica una desviación superior de la medida registrada con velocidades de calentamiento superiores. Atendiendo a este efecto, ambos recubrimientos se pueden considerar equivalentes al presentar pendientes muy parecidas: .

El efecto del recubrimiento, toda vez que las pendientes de ambos ajustes experimentales se pueden considerar comparables, puede observarse mediante el análisis de la ordenada en el origen. Teniendo en cuenta que durante el estudio el valor real de la transición térmica no ha sufrido modificaciones, el recubrimiento de níquel presenta una reducción clara del valor medido de la *Tg* () en comparación con el recubrimiento de aluminio. La desviación hacia valores inferiores de *Tg* del recubrimiento de níquel puede relacionarse con una menor emisividad de este recubrimiento y, por consiguiente, con una menor tasa de calor absorbido por radiación. Para minimizar este efecto las normas de ensayo recomiendan bajas velocidades de calentamiento para reducir la efusividad térmica, sin embargo no tienen en consideración el efecto del estado superficial (emisividad superficial). Ambos efectos dependen del material estudiado y, aunque las tendencias se puedan extrapolar a otros polímeros, la magnitud del bias introducido debe ser medida en cada caso.

Es posible minimizar el efecto de la efusividad obteniendo una buena estimación de la *Tg* mediante extrapolación de los ajustes a velocidad nula, es decir, la ordenada en el origen del ajuste es una buena estimación de la *Tg* real. Del análisis de los datos puede observarse que las rampas de calentamiento habituales, 5 ºC/min, introducen errores sistemáticos cercanos a los 10 ºC. Las pendientes similares de ambos ajustes muestran la baja influencia del recubrimiento en la efusividad, debido a que, tal y como se ha indicado, la efusividad depende del material de la probeta, no de su estado superficial.

Por su parte, la emisividad superficial introduce un error sistemático de menor magnitud, apenas 2 ºC en el estudio presentado. Sin embargo su importancia radica en dos aspectos principales: que nos encontramos ante un efecto difícilmente observable en la bibliografía y que los 2 ºC de *bias* se corresponden con variaciones de la emisividad de, aproximadamente, 0,2 unidades (aluminio = 0,2, níquel = 0,04) mientras que en los propulsantes, por ejemplo, pueden observarse emisividades superficiales cercanas a 1, véase figura 4.

Figura 4. Propulsante de doble base con vaciado interior en forma de estrella.

En todo caso, y dada la naturaleza metálica de las probetas utilizadas en el presente estudio, puede considerarse que los errores sistemáticos son cotas inferiores de los que ofrecerían los polímeros. Ello se debe, principalmente, a la elevada conductividad térmica de los metales y a los bajos valores de emisividad de los recubrimientos utilizados en comparación con las magnitudes habituales de los polímeros.

5. Resumen y trabajos futuros

En el presente trabajo se ha presentado un análisis crítico de algunas variables implicadas en la determinación de la *Tg* mediante DMA. Estas variables introducen sesgos en la determinación de la temperatura de las transiciones térmicas en los polímeros. Los efectos presentados muestran desviaciones cuantificables y que, en algún caso, no pueden ser consideradas despreciables. Estas desviaciones, junto con los problemas de calibración debidos a la falta de patrones, constituyen una causa importante en los elevados márgenes de seguridad aplicados en el diseño térmico de estructuras que utilicen polímeros, aspecto cada vez más habitual en los campos aeronáuticos y de defensa.

Se han presentado evidencias de la influencia del historial térmico de un polímero en la temperatura de transición vítrea, ofreciendo una curva de ajuste para unas condiciones determinadas. Este ajuste permite, en las condiciones presentadas, predecir la evolución de la *Tg* del material polimérico sometido a un calentamiento durante largos periodos de tiempo. Estos cambios de la *Tg* que no están asociados a una degradación del material o cambio químico permanente en las cadenas poliméricas.

En el análisis crítico de las principales normas que rigen la determinación de la *Tg* en polímeros, se ha presentado la influencia de algunas variables propias del ensayo, tales como la rampa de calentamiento. Adicionalmente se consideraron otras variables no recogidas en las normas: efusividad térmica y emisividad superficial. En conjunto, estas variables habitualmente incontroladas, introducen sesgos en la medida experimental de la *Tg* que, en algún caso, puede ser fácilmente eliminado. Se considera de especial relevancia el efecto de la emisividad superficial en la medida de la *Tg* por implicar una propiedad física del material poco estudiada y que lleva a sobreestimaciones de la Tg. Aunque las tendencias presentadas puedan ser observadas en todos los materiales, la magnitud de cada una de las variables dependerá del material estudiado y requiere de un estudio particular.

De aplicarse las medidas presentadas, las medidas de la *Tg* sobre polímeros y materiales compuestos de matriz polimérica, serían más cercanas a los valores reales del polímero.

Agradecimientos

Se agradece al INTA, en particular al Departamento de NBQyM de la Subdirección de Sistemas Terrestres el uso de las instalaciones para el desarrollo de la presente investigación. De igual forma debe reconocerse la contribución del programa de prácticas en empresa de la URJC, Departamento de Matemática Aplicada, Ciencia e Ingeniería de Materiales y Tecnología Electrónica por proporcionar alumnos altamente preparados para pequeños proyectos de investigación que apoyan su formación.

Referencias

1. *Alves, Mano J.F., Gómez Ribelles J.L. Analysis of the thermal environment inside the furnace of a dynamic mechanical analyser. 2003, Polymer Testing 22, pp. 471-481.*
2. *AITM1-0003. Airbus Test Method. Determination of the glass transition temperatures. AIRBUS S.A.S Engineering Directorate 31707 Blagnac Cedex France*
3. *ASTM D7028-07. Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA) ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.*
4. *Lima G.M., de Lima e Silva S. M.M.. Thermal Effusivity Estimation of Polymers in Time Domain. J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. Vol. XXXIII, N 4, 2011. DOI: 10.1590/S1678-58782011000400002*
5. *Vidal S.E., Chamarro Aguilera M.E.. Fundamentos de transmisión de calor. Publicaciones y Ediciones de la Universidad de Barcelona, 2005.*
6. *Besson U. Cooling and warming laws: an exact analytical solution. Eur. J. Phys. 31, 2010, pp. 1107-1121*
7. *López R., Rico Á., del Olmo F. J., Rodríguez J., Probeta de calibración en temperatura de equipos analizadores dinamomecánicos. Patente: P-2561952, 2016.*

Caracterización mecánica de hidrogeles: ensayos e instrumentación

Chimeno Saavedra, David[1], López Sánchez, Raúl[1,*], Lapeira Herrero, Raúl[2] y Rodríguez Pérez, Jesús[3]

[1] Área de Materiales Energéticos, Dep. de defensa NBQyM, Subd. de Sistemas Terrestres, INTA. Ctra. M301 km.10.5 Edif.7, La Marañosa, 28330 S. Martín de la Vega, Madrid, Spain.

[2] Artifact Consulting S.L. C/Navas del Rey 59. 28011 Madrid.

[3] Grupo de investigación Durabilidad e Integridad Mecánica de Materiales Estructurales (DIMME), Universidad Rey Juan Carlos (URJC), Calle Tulipán, s/n, 28933 Móstoles, Madrid, Spain.

* Contacto: lopezsr@inta.es (R. López).

Resumen

Los hidrogeles tienen una presencia creciente en el sector de la defensa con aplicaciones tan importantes como la liberación controlada de medicamentos o la robótica blanda para obtener exoesqueletos más ligeros o tejidos inteligentes. Aunque aún queda por demostrar su viabilidad práctica, actualmente se están desarrollando materiales base para el prototipado de robótica blanda, mostrando una clara oportunidad de mercado.

Las propiedades mecánicas de los hidrogeles pueden ser configuradas a voluntad durante el proceso de fabricación. La caracterización precisa de propiedades como la resistencia a fractura o la rigidez facilita el diseño, aunque disponer de valores cuantitativos fiables suponga un reto tecnológico.

En el presente documento, se aborda este reto con equipamientos específicos para cada propiedad, teniendo en consideración algunos aspectos de estos materiales tales como su baja rigidez o la dependencia de sus propiedades con la temperatura y el grado de hidratación. También se muestran prototipos de máquinas de ensayo que permiten la caracterización de propiedades mecánicas en hidrogeles. En particular, el estudio se centra en la determinación de la resistencia a rotura, discutiendo detalles de diseño y presentando resultados cuantitativos obtenidos con estos dispositivos.

Palabras clave

Hidrogeles, biomímesis, robótica blanda.

1. Introducción

Los nuevos materiales siempre han estado relacionados con el desarrollo tecnológico de la sociedad, con impacto en la economía global. Los hidrogeles por su capacidad de mantener la integridad estructural y por el hecho de ser capaces de incorporar elevadas cantidades de agua en su estructura, representan un campo de investigación con un creciente interés. Así lo demuestra el progresivo aumento en el número de publicaciones relacionadas con hidrogeles, que desde su nacimiento en 1950 ha superado las 3.000 publicaciones anuales en la actualidad [1].

Los hidrogeles, a pesar de que aún no tienen una definición consensuada, son materiales poliméricos entrecruzados tridimensionalmente que presentan un carácter hidrófilo muy marcado pero que, a la vez, son insolubles en agua. Su elevada capacidad de hidratación, de hasta 2.000 veces su peso, les permite formar materiales blandos con una elevada deformabilidad. Tras la hidratación, sus propiedades físico-químicas e interacciones con el medio cambian radicalmente [1]. La limitada movilidad de las moléculas dentro de la red polimérica tridimensional convierte, a estos materiales, en aptos para formar geles mediante la inclusión del disolvente en su estructura.

Estos materiales se pueden clasificar en base al tipo de uniones que se establecen entre las macromoléculas que forman la red del hidrogel. Así pues, se denominan geles físicos a aquellos que poseen una red tridimensional entrecruzada mediante enlaces lábiles de tipo puente de hidrógeno o Van der Waals, mientras que los geles químicos son aquellos con una red entrecruzada mediante enlaces covalentes cuya ruptura degrada el material.

En 1950, la primera generación de hidrogeles agrupaba a una serie de materiales que compartían elevados hinchamientos y una aceptable resistencia mecánica, conformando una nueva familia de materiales poliméricos. Actualmente, existe una nueva generación de hidrogeles, denominados inteligentes o *smart hydrogels,* que agrupa a los materiales que, manteniendo un elevado hinchamiento, además responden a estímulos externos no mecánicos, tales como temperatura o pH [2], con deformaciones. Además, esta nueva generación de hidrogeles dispone de mayores capacidades de deformación y de resistencias mecánicas superiores.

Uno de los miembros más importantes de esta nueva generación es el gel híbrido de alginato y poliacrilamida, el cual presenta propiedades intermedias a cada uno de los hidrogeles que lo componen. Se debe tener en cuenta que un hidrogel de alginato no supera deformaciones del 20 % antes de rotura, mientras que los hidrogeles de poliacrilamida, en las mismas condiciones, son capaces de superar deformaciones de 20 veces su longitud inicial pero con una fuerte dependencia del estado superficial. La hibridación de hidrogeles de alginato y poliacrilamida permite obtener elongaciones hasta rotura muy superiores al 20 % del alginato con una menor dependencia del estado superficial que la del gel de poliacrilamida, ver figura 1.

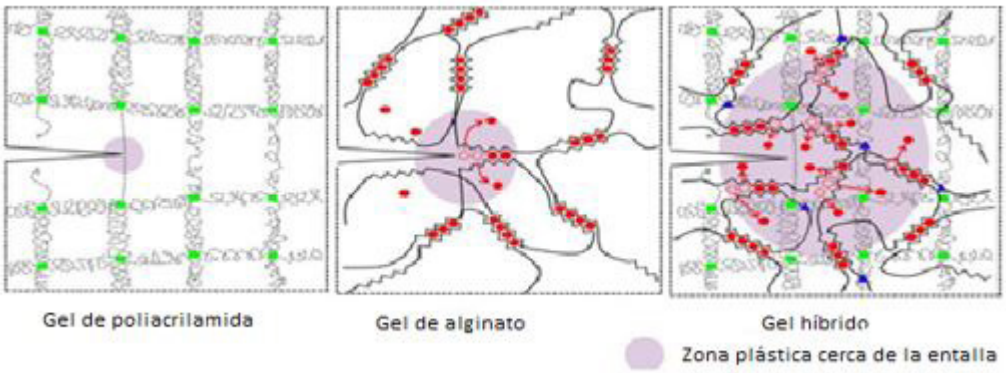


Figura 1. Detalles estructurales de la hibridación de geles de alginato y poliacrilamida.

El estudio mecánico de estos materiales acompaña a los avances en la síntesis de hidrogeles, puesto que uno de los aspectos más relevantes es la mejora de las propiedades mecánicas en estos materiales. Sin embargo, a pesar de la introducción de nuevas generaciones en hidrogeles, la resistencia a fatiga de estos materiales sigue siendo uno de los retos actuales, tanto porque los nuevos materiales no presentan mejores resistencias a esfuerzos cíclicos como por la inherente dificultad en el estudio de este fenómeno [4]. En la figura 2 puede observarse un equipamiento personalizado para la investigación del comportamiento a fatiga de cauchos y propulsantes sólidos, este equipamiento puede ser adaptado también al estudio de los hidrogeles.

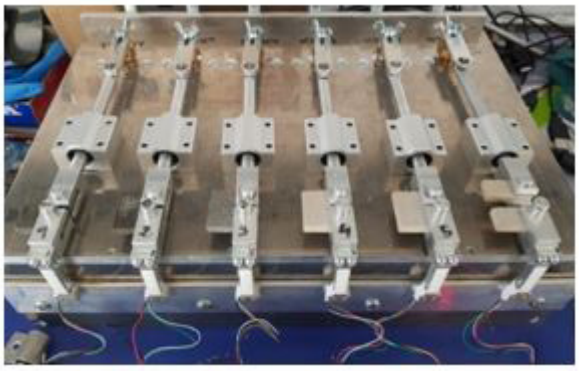


Figura 2. Equipamiento desarrollado por los autores para la caracterización de materiales poliméricos con propiedades similares a los hidrogeles.

Los estudios de integridad estructural frente a ciclos de carga y descarga cobran especial relevancia en los hidrogeles por sus aplicaciones.

1.1. Aplicaciones de los hidrogeles

El carácter hidrófilo del hidrogel le convierte en un material idóneo para aplicaciones donde se precise absorber, retener o ceder un líquido acuoso de forma controlada, presentando una fuerte dependencia con el entrecruzamiento de la estructura polimérica. Se destacan algunas aplicaciones:

- **Sistemas de riego e hidratación:** se utilizan hidrogeles de origen sintético como reservorio de agua para el mantenimiento de un nivel mínimo de hidratación de suelos fértiles en jardinería y horticultura. Además, existen demostradores destinados a la alimentación humana que emplean hidrogeles de origen natural para reducir la actual dependencia del plástico para la toma de líquidos [5].

Figura 3. a) Hidrogeles comestibles, b) dependencia del plástico como envase.

- **Lentes de contacto:** los nuevos materiales basados en hidrogeles de silicona ofrecen mejoras ergonómicas basadas en una mayor permeabilidad al oxígeno, permitiéndo de esta forma reducir la indeseable hipoxia sobre la córnea de las actuales lentes de contacto.
- **Potabilización del agua:** los nuevos materiales híbridos gel-polímero nanoestructurados combinan las propiedades hidrófilas propias del hidrogel con una capacidad mejorada para absorber la radiación solar a través de una red de microcanales, los cuales permiten la circulación del agua a la vez que reducen de manera significativa la entalpía de evaporación.

A pesar de que el número de patentes relacionadas con hidrogeles está en continuo incremento (1.700 en 2016), la falta de madurez tecnológica de la tecnología impide la comercialización de muchos de ellos. Junto con la necesaria mejora en la resistencia estructural de estos materiales, la fabricación en serie de estructuras complejas constituye uno de los principales retos tecnológicos. Una de las soluciones que actualmente se están utilizando es la fabricación aditiva de tipo 4D [6], donde la cuarta dimensión es la capacidad del hidrogel para cambiar su estructura en respuesta a un estímulo.

La caracterización mecánica de los hidrogeles requiere de una adaptación en el diseño del equipamiento disponible en los laboratorios de ensayo por el inusual valor de alguna de sus propiedades, tales como la elongación a rotura. La personalización de equipos e instrumentalización debe adaptarse a la magnitud de las propiedades del material que se desee caracterizar. Además, es necesario el desarrollo de nuevos procedimientos de ensayo que incluya un pormenorizado estudio de las principales variables implicadas. Empresas líderes en el mercado del desarrollo de equipamiento para la caracterización de propiedades mecánicas, tales como MTS e Instron, ofertan la reingeniería de sus equipos para adaptarlos a los nuevos requerimientos, sin embargo dado la escasa cuota de mercado que los hidrogeles han alcanzado, algunas adaptaciones no son económicamente viables y la principal alternativa es que los propios laboratorios desarrollen sus propios sistemas.

2. Hidrogeles aplicados a defensa

Los sistemas de defensa aprovechan las especiales propiedades de algunos materiales siendo, habitualmente, el primer sector que los utiliza por el elevado valor estratégico que se obtiene por una ventaja tecnológica. Actualmente, la investigación en hidrogeles ha despertado un elevado interés en el sector y en su aplicación a nuestro país. Se pueden observar al menos tres metas tecnológicas recogidas en la ETID [7] que pueden relacionarse, respectivamente, con la aplicación de los hidrogeles en exoesqueletos, robótica blanda y liberación controlada de medicamentos:

1) **MT 3.1.4:** Reducción del peso de plataformas.
2) **MT 4.1.1:** Protección pasiva y reducción de la detectabilidad.
3) **MT 4.1.3:** Confort y ayudas a la movilidad.

2.1. Exoesqueletos blandos

Un exoesqueleto facilita aquellas actividades que requieren esfuerzos físicos. Para ello es habitual la utilización de sistemas neumáticos, aunque actualmente siguen presentando consumos eléctricos elevados

y son muy pesados. Por su parte, los exoesqueletos blandos basados en hidrogeles, con un funcionamiento análogo a los tejidos musculares ofrecen una reducción de peso respecto a los sistemas convencionales al utilizar materiales más ligeros. Sin embargo, su autonomía sigue representando la principal limitación para el uso de los exoesqueletos, sea cual fuera su naturaleza.

La sobrecarga a la que se somete al infante debería reducirse hasta el objetivo OTAN 25/24 (25 kg para combatir 24 h). Elementos como las placas balísticas, los sistemas de comunicaciones y el peso del arma principal, previsiblemente no reducirán su peso de manera significativamente durante los próximos años, es por ello que una de las líneas de investigación por las que apuesta DARPA, es el uso de exoesqueletos blandos enfocados a la mejora de la movilidad del combatiente [8].

2.2. Robótica blanda

La robótica blanda surge para biomimetizar algunas de las funcionalidades de los seres vivos, y su objetivo principal es el de superar los problemas de rigidez de la robótica actual. Un ejemplo de las limitaciones actuales puede observarse en los problemas de movilidad de la robótica autónoma en terrenos irregulares, con aplicaciones tan importantes como el rescate de heridos en desastres naturales o la detección de explosivos improvisados, IED.

Frente a la robótica tradicional, que utiliza principalmente sistemas mecánicos y eléctricos, el empleo de hidrogeles suele preferir los sistemas neumáticos que, como ventaja adicional, responden a estímulos externos. La utilización de hidrogeles en la robótica supondrá una revolución. Aunque su aplicación actual continúe restringida a nivel de laboratorio (TRL < 4) ya se postula como la solución preferible para aplicaciones como el manejo de materiales frágiles, para misiones de rescate o en prótesis con mejor ergonomía [9]. Nuevamente la caracterización mecánica de estos materiales constituye uno de los principales retos, siendo de especial relevancia conocer el comportamiento de las estructuras a fatiga y desgarro.

2.3. Liberación controlada de medicamentos

La utilización de los hidrogeles en aplicaciones biomédicas supondrá un avance importante en el tratamiento de las heridas. Una aplicación de importancia para el sector de defensa sería la introducción de un nuevo tipo de apósito en el botiquín individual del combatiente, BIC, de la infantería española. La sustitución del apósito actual por otro, de tipo inteligente, basado en hidrogeles permitiría liberar a demanda medicamentos en respuesta a la información que, en tiempo real, es obtenida por sensores de biomonitorización. Estos nuevos apósitos facilitarían el tratamiento de las heridas del combatiente, reduciendo drásticamente el tiempo de cicatrización de la herida y la probabilidad de infección. La estructura, ya propuesta, estaría basada en capas conductoras eléctricas recubiertas por un hidrogel híbrido de alginato y polietilenglicol-diacrilato, PEGDA, con partículas que se activarían al variar la temperatura, ver figura 4 [10].

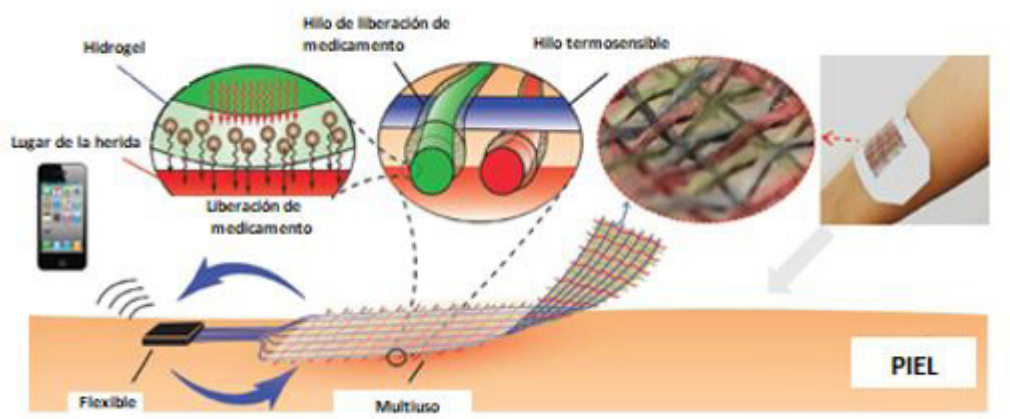


Figura 4. Esquema de un apósito inteligente basado en hilos para el suministro transdérmico de fármacos a partir de partículas termorreactivas.

3. Desarrollo del equipamiento personalizado para la caracterización mecánica de hidrogeles

Una parte importante de la caracterización mecánica de los materiales se realiza con máquinas universales de ensayos, habitualmente diseñadas para materiales con elevadas resistencias mecánicas y bajas elongaciones. Los hidrogeles, por el contrario, condicionan los equipos de ensayo debido a los grandes desplazamientos y bajas cargas que presentan cuando se busca alcanzar el punto de rotura. Para estos materiales, es necesaria una adaptación del equipamiento habitualmente disponible para una correcta caracterización mecánica, o por el contrario, la fabricación de equipos personalizados.

El diseño de una máquina universal de ensayos para hidrogeles requiere una especial atención a la medida de la deformación, siendo importante garantizar la unión entre probeta y mordazas durante todo el ensayo. En cuanto a los hidrogeles, son los de tipo químico los que presentan un mayor reto tecnológico a la hora de personalizar los equipos de ensayo, puesto que sus propiedades mecánicas varían en función de la composición y el estado superficial del hidrogel.

En nuestro laboratorio se ha optado por personalizar sistemas de ensayo para la caracterización mecánica de los hidrogeles, a continuación se describirán los principales puntos de investigación y los avances más importantes alcanzados en este campo.

3.1. Diseño mecánico de una máquina universal de ensayos

La baja resistencia a tracción de los hidrogeles facilita el uso de sistemas electromecánicos y dentro de esta familia se pueden considerar cinco sistemas fundamentales: grupo motor y sistemas de adquisición de datos, transmisión de carga, fijación, control y medición de deformaciones.

En la figura 5 se presenta el diseño conceptual y su posterior prototipo operativo, diseñado para la caracterización mecánica de hidrogeles de aplicación en defensa. Las principales consideraciones de diseño tenidas en cuenta han sido:

- Grupo transmisor: con un amplio recorrido, >60 cm, para la utilización de probetas con un tamaño macroscópico cuya fabricación pueda ser realizada mediante sistemas clásicos.
- Mordazas: de acción lateral y con una superficie rugosa de las mandíbulas, permite fijar el hidrogel al tren de carga sin que se produzcan deslizamientos durante el ensayo.
- Células de carga: tanto por resolución como por sus propiedades mecánicas, resulta imprescindible el uso de atípicas células de carga. En el caso presentado, se dota a la máquina de dos células de carga dispuestas en serie, 500 N y 10 N, permitiendo la sustitución de una de ellas de forma ágil. La medida de las deformaciones se realiza por videoextensometría.
- Condiciones ambientales: los ensayos se realizan dentro de una cámara climática donde se controla, al menos, temperatura y humedad, ver figura 5.

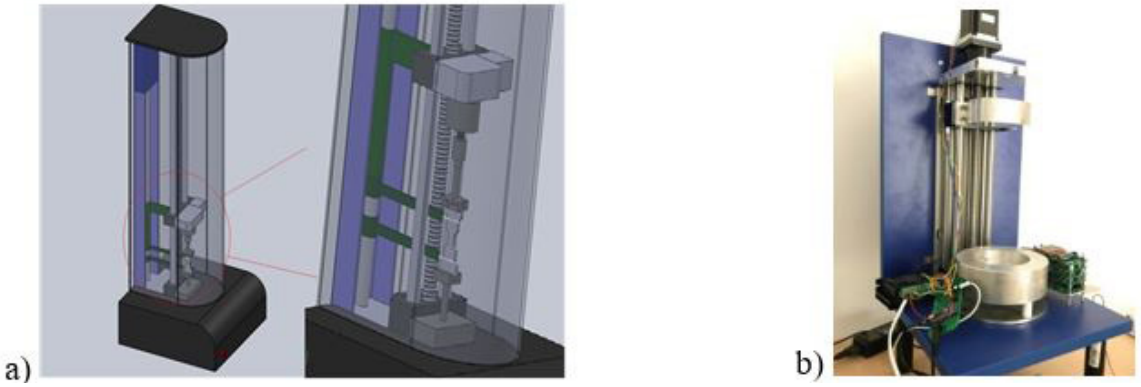


Figura 5. a) Diseño mecánico de la máquina de ensayos universal uniaxial electromecánica; b) prototipo operativo a falta de cámara climática.

3.2. Diseño electrónico

En el diseño electrónico de una máquina de ensayos para hidrogeles se debe considerar, al menos, tres aspectos fundamentales: *hardware*, *firmware* y *software*. En este primer prototipo se han abordado las dos primeras, proporcionando un prototipo funcional aunque no autónomo. Para su fabricación se ha utilizado un motor paso a paso bipolar que mueve un tornillo sin fin, y este, a su vez una plataforma cuyo desplazamiento está limitado por dos detectores de principio y fin de carrera. El motor, por su elevado consumo, hasta 4 amperios, ha requerido del diseño de una electrónica propia, incluyendo una controladora eléctrica y el circuito de potencia, ambos aislados del sistema de control basado en un microprocesador ATMega 328. Todos los elementos electrónicos, tanto de control como potencia, se encuentran implementados sobre una única PCB diseñada para esta aplicación, ver figura 6.

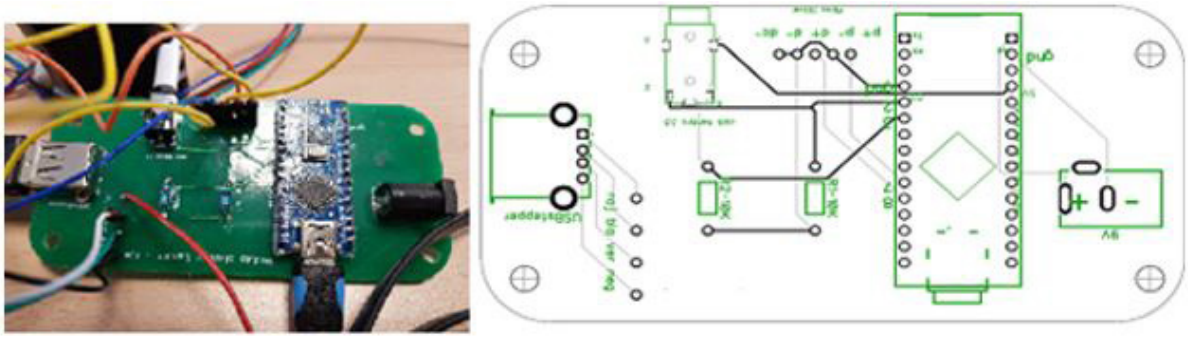


Figura 6. PCB de control de la máquina de ensayos.

4. Conclusión

En este documento se presentan los hidrogeles y algunas de sus aplicaciones principales, así como el reto que supone su caracterización mecánica, tanto en los hidrogeles originales como en los más modernos. La presencia comercial de los hidrogeles está incrementándose progresivamente, pero el salto cuantitativo se producirá, previsiblemente, cuando los estudios mecánicos de caracterización permitan a los hidrogeles comercializarse en las aplicaciones ya propuestas, tales como la liberación de fármacos a demanda o la robótica blanda. El sector de defensa será el primero en implementarlas mejorando, por ejemplo, los materiales empleados por la medicina de campaña

Adicionalmente, se ha abordado la problemática que supone el desarrollo de equipamientos personalizados para la caracterización de las propiedades mecánicas en ensayos de tracción y compresión uniaxial, así como para el estudio del comportamiento a fatiga en materiales con propiedades similares a los hidrogeles. El diseño del equipamiento suele acompañar a los avances en la fabricación de hidrogeles puesto que, actualmente, aún se continúa sin unas especificaciones para propiedades tan importantes como la elongación a rotura o el número de ciclos a fatiga. Abordar el diseño, construcción y ensayo de equipos personalizados es un proceso iterativo, proporcionándonos equipos progresivamente más apropiados para nuestros objetivos, logrando una caracterización mecánica con la precisión suficiente como para comercializar los nuevos materiales con garantías de durabilidad.

Agradecimientos

Se agradece al INTA, en particular al Departamento de NBQyM de la Subdirección de Sistemas Terrestres el uso de las instalaciones. De igual forma debe reconocerse la contribución del programa de prácticas en empresa de la URJC, Grupo de investigación Durabilidad e Integridad Mecánica de Materiales Estructurales (DIMME), por proporcionar alumnos altamente preparados para pequeños proyectos de investigación que apoyan su formación.

Referencias

1. *Chirani N., Yahia L., Gritsch L., Faré S. History and Applications of hydrogels. Journal of Biomedical Sciences. 2015:4(2:13):1-23.*
2. *Ferreira N.N. et al. Recent advances in smart hydrogels for biomedical applications: From self-assembly to funcional approaches. European Polymer Journal. 2018:99:117-133.*
3. *Sun J.-Y. et al. Highly stretchable and tough hydrogels. Nature. 2012:489(7414):133-136.*
4. *Bay R. et al. Fatigue fracture of hydrogels. Extreme Mechanics Letters. 2017:15:91-96.*
5. *David J.L.C., Lee M. Edible water-soluble film. US Patent 13/740,053. 11/1/2013.*
6. *Miao S., Zhang L. 4D printing of polymeric materials for tissue and organ regeneration. Materials today. 2017:0:1-15.*
7. *Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa. ETID. Sd PLATIN. 2015.*
8. *Requejo L.M. Exoesqueletos. Boletín de observación tecnológica en defense. 2013:40.*
9. *Calvert P. Hydrogels for soft machines. Advanced Materials. 2009:21:743-756.*
10. *Mostafalu P. et al. A textile dressing for temporal and dosage controlled drug delivery. Advance Functional Materials. 2017:1702399:1-10.*

Medida de pequeñas deformaciones mediante efecto piezoresistivo. Aplicación en cohetes

Merchán Rivero, Alejandro[1], López Sánchez, Raúl[1,*]

[1] Área de Materiales Energéticos, Departamento de Defensa NBQyM, Subdirección de Sistemas Terrestres, INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Ctra. M301 km.10.5 Edif.7, La Marañosa, San Martín de la Vega, 28330 Madrid, Spain.

* Contacto: lopezsr@inta.es (R. López).

Resumen

La piezoresistividad es una propiedad de algunos materiales por la que se cambian su impedancia eléctrica cuando son sometidos a deformaciones. Por medio de la deposición física de partículas de grafito en suspensión, se puede aplicar una fina capa de este material piezoresistivo sobre superficies eléctricamente aislantes. De este modo, se puede superar alguna de las limitaciones en el uso de las bandas extensométricas, como son los problemas de compatibilidad entre el adhesivo y el material a estudiar.

En el estudio de los materiales energéticos, la piezoresistividad puede ser aplicada sobre estructuras y plataformas para el estudio de micro y nanodeformaciones. Una posible aplicación es la medida en tiempo real de las deformaciones producidas en la cámara de combustión de los cohetes durante su funcionamiento, pudiéndose llegar a utilizar hasta sobre el propio propulsante sólido durante la combustión. En este campo, la obtención de datos de deformación fiables permite aumentar el conocimiento acerca de estos materiales, optimizar el diseño de las cámaras de combustión y aumentar la seguridad de la munición incorporando nuevos ensayos al Programa Nacional de Vigilancia sobre la munición.

En el presente trabajo se desarrolla un prototipo de la tecnología (TRL4) capaz de medir pequeñas deformaciones mediante la aplicación de capas finas de grafito sobre la superficie de plataformas de calibración y en la cámara de combustión de un cohete. Se presenta el diseño de la electrónica de control necesaria y se discuten los datos de deformación consecuencia del estado tensional del material recubierto.

Palabras clave

Piezoresistividad, grafito, propiedades mecánicas, deformación.

1. Introducción

El análisis de estructuras es una herramienta crítica para la ingeniería civil, mejorar su precisión y ampliar las herramientas disponibles son algunos de los retos más importantes en este campo. La monitorización en tiempo real es esencial para el campo aeronáutico y de defensa con una importante aplicación en el control de la deformación de los elementos estructurales de las plataformas aeroespaciales tales como los rotores de helicóptero [1].

En la actualidad, el análisis de pequeñas deformaciones en las estructuras utiliza, principalmente, galgas extensométricas o fibra óptica. Las galgas extensométricas son dispositivos clásicos para la monitorización de deformaciones, habitualmente están compuestas por un hilo conductor de cobre que, al alargarse o acortarse, permite un seguimiento de las deformaciones del material. Gracias al efecto piezoresistivo de las galgas, las deformaciones se registran como cambios de impedancia eléctrica habitualmente instrumentalizadas mediante un puente de Wheatstone, permitiendo determinar el tensor de deformaciones de la estructura [2]. Al igual que las galgas extensométricas, el grafito también presenta un marcado efecto piezoresistivo ofreciendo una alternativa para la monitorización de las deformaciones de estructuras mediante la aplicación de recubrimientos activos.

Figura 1. Galga extensométrica.

En el presente trabajo se presenta una aplicación basada en el efecto piezoresistivo del grafito con un prototipo para la monitorización de deformaciones aplicado a una plataforma de calibración. Se muestran detalles de la electrónica de control utilizada así como las alternativas que esta tecnología facilita frente a la solución clásica, galgas extensométricas, para la monitorización en tiempo real de estructuras que pueden trabajar en condiciones extremas como la cámara de combustión de un cohete.

2. Piezoelectricidad y piezoresistividad

El efecto piezoeléctico se presenta en unos pocos materiales y consiste en la acumulación de carga eléctrica como respuesta a la aplicación de un estado tensional sobre el material. Este efecto también funciona en el sentido inverso, es decir, que una aplicación de carga eléctrica permite crear un estado tensional en el material.

El efecto piezoresistivo, por el contrario, es un efecto común que puede observarse en muchos materiales, aunque dada su habitualmente pequeña magnitud, solo puede ser aprovechado en algunos semiconductores y metales. Este efecto consiste en que un material cambia su resistividad eléctrica cuando es sometido a deformaciones; al contrario que la piezoelectricidad, este es un efecto que solo funciona en la dirección mencionada [3]. En los últimos años la investigación relacionada con los materiales piezoresistivos se ha centrado en semiconductores como el silicio, el germanio y el antimoniuro de indio, con aplicaciones que van desde los micrófonos a acelerómetros resonadores de varias capas [4].

2.1. Piezoresistividad en el grafito

El grafito es una de las formas alotrópicas del carbono, la más estable a temperatura ambiente, y presenta una estructura hexagonal en forma de láminas conocidas como planos grafénicos. En la estructura, los átomos de carbono del mismo plano se enlazan covalentemente mientras que los distintos planos establecen enlaces débiles de tipo Van der Waals [5]. Dentro de los planos grafénicos circulan con facilidad los electrones, lo que hace del grafito un buen conductor de la electricidad. El marcado efecto piezoresistivo de este material le presenta como candidato idóneo para el presente estudio.

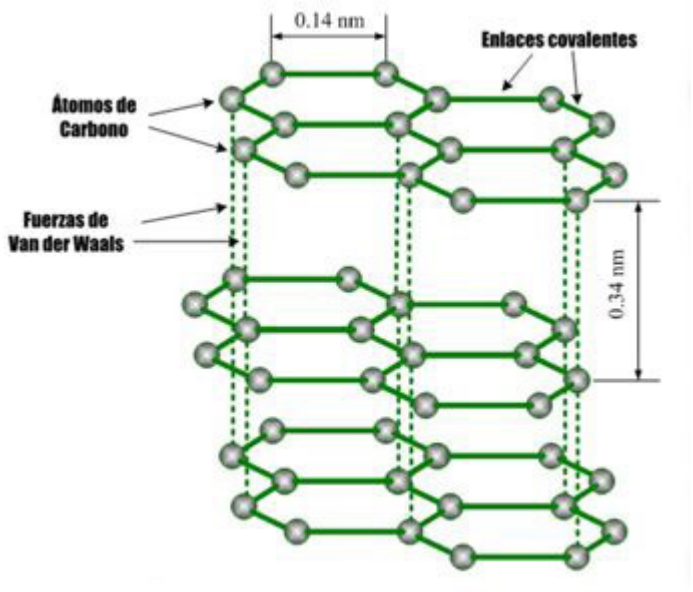


Figura 2. Estructura del grafito.

La piezoresistividad de un recubrimiento puede relacionarse con el estado de deformación impuesto sobre el material y, a su vez, el tensor de deformaciones permite obtener el tensor de tensiones mediante las ecuaciones de Lamé. El efecto piezoresistivo puede ser descrito por un conjunto de ecuaciones que relaciona las componentes del campo eléctrico, E, densidad de corriente, i, y del tensor de tensiones, T, en materiales con simetría:

$$\begin{aligned}\frac{E_1}{\rho} &= i_1[1+\pi_{11}T_{11}+\pi_{12}(T_{22}+T_{33})]+\pi_{44}(i_2T_{12}+i_3T_{13})\\ \frac{E_2}{\rho} &= i_2[1+\pi_{11}T_{22}+\pi_{12}(T_{11}+T_{33})]+\pi_{44}(i_1T_{12}+i_3T_{23})\\ \frac{E_3}{\rho} &= i_3[1+\pi_{11}T_{33}+\pi_{12}(T_{11}+T_{22})]+\pi_{44}(i_1T_{13}+i_2T_{23})\end{aligned} \quad (1)$$

donde los subíndices 1, 2 y 3 corresponden a los ejes cristalográficos, r es la resistividad en ausencia de aplicación de fuerzas externas, y π_{11}, π_{12}, π_{44} los coeficientes piezoresistivos del material [6].

3. Prototipo desarrollado

La aplicación de un recubrimiento activo sobre una superficie de una viga en voladizo constituye el principio del prototipo que denominaremos *estructura de calibración*. El recubrimiento se ha realizado mediante la aplicación de una suspensión de grafito en un disolvente orgánico describiendo una pista de material semiconductor. La aplicación del grafito mediante aerografía mejora la homogeneidad y uniformidad de los recubrimientos, minimizando las incertidumbres asociadas a la fabricación del recubrimiento.

De esta forma, la aplicación de partículas de grafito permite instrumentalizar una plataforma basada en una viga en voladizo que, al deformarse por efecto de una carga, transmite sus deformaciones de forma solidaria al recubrimiento piezoresistivo. Los cambios en la impedancia eléctrica del recubrimiento se registran como variaciones de potencial para determinar la matriz de deformaciones del material y, por tanto, el estado tensional de la plataforma. Esta tecnología combina sencillez instrumental y alta sensibilidad además de un bajo consumo eléctrico que, junto con las propiedades refractarias y de estabilidad química propia del grafito, proporcionan las condiciones ideales para el desarrollo de dispositivos portátiles capaces de monitorizar *in situ* cualquier estructura con una superficie aislante eléctricamente.

En la figura 3 puede observarse la *estructura de calibración* con una pista de grafito en su superficie. Tanto el inicio como el fin de la pista se encuentran unidos a unos conectores sobre los que se miden eléctricamente las deformaciones. Tal y como se ha indicado, la deformación de la viga induce un cambio en la resistividad del recubrimiento de grafito que, mediante un puente de Wheatstone y la posterior amplificación, permite registrar como un voltaje las deformaciones a las que se ve sometida la viga.

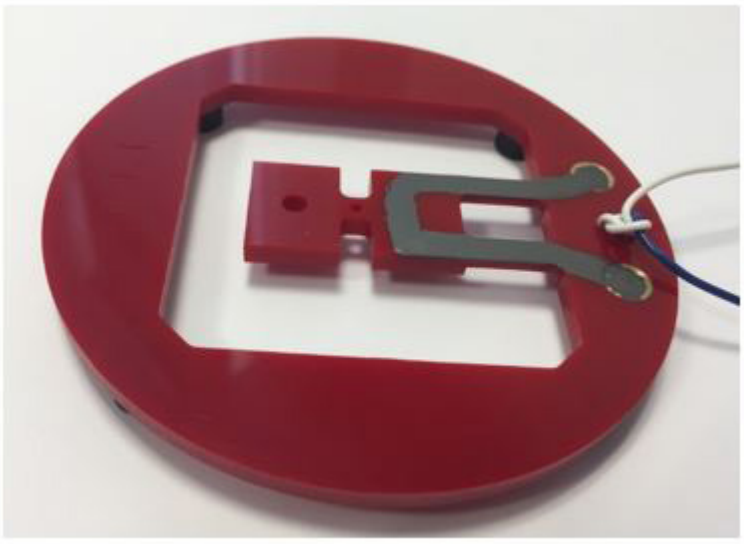


Figura 3. Estructura de calibración con viga en voladizo y pista de grafito.

Desde el punto de vista eléctrico, el puente de Wheatstone permite convertir los cambios de resistencia de la pista de grafito en cambios de voltaje. Sin embargo, esta diferencia de potencial es muy pequeña y muy susceptible a interferencias electromagnéticas, en todo caso, inadecuada para su registro e interpretación por microcontroladores. Para amplificar esta diferencia de potencial, se ha decidido utilizar un amplificador instrumental, el INA125P, que permite ganancias de hasta tres órdenes de magnitud con una instrumentación sencilla, pudiendo limitar la respuesta de salida a 5 voltios. En la figura 4 puede observarse el circuito de amplificación.

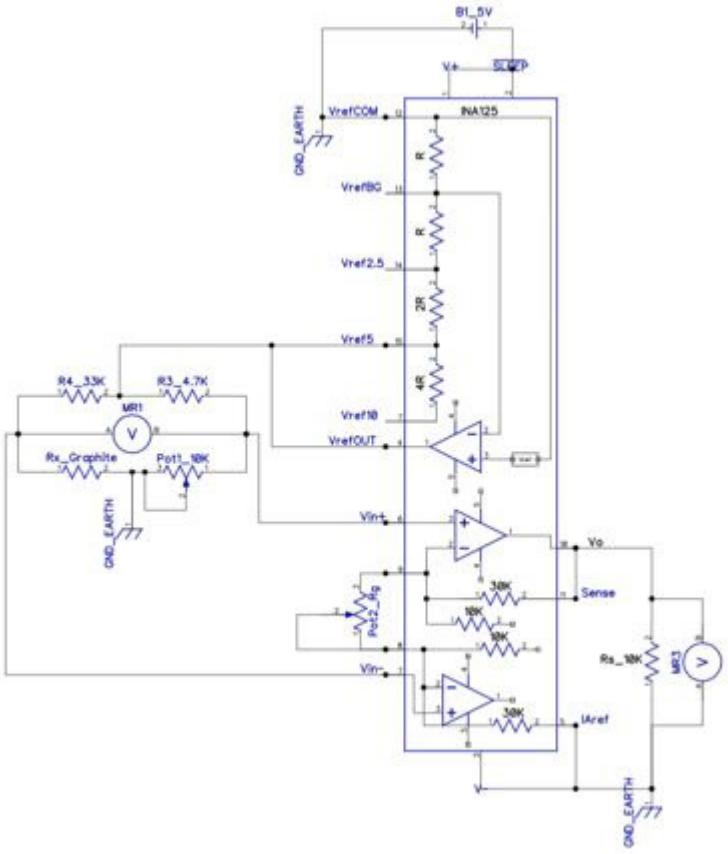


Figura 4. Esquema del circuito.

El recubrimiento de grafito, como sistema de seguimiento de deformaciones, ofrece una respuesta rápida a altas frecuencias de deformación, alta resistencia a agresivos químicos y una elevada reproducibilidad para el seguimiento de microdeformaciones. Sin embargo, su aplicación se encuentra limitada por la facilidad de desgaste del grafito y la labilidad del recubrimiento en presencia de disolventes como el agua.

El uso del recubrimiento de grafito en aplicaciones de alta temperatura presenta una dificultad adicional, la variación del coeficiente piezoresistivo con la temperatura mediante una ecuación conocida, pudiéndose corregir esta influencia [7]. Aunque este trabajo se focaliza en la aplicabilidad de este material en microdeformaciones, ha podido ser demostrada la viabilidad de esta técnica para elevadas deformaciones de hasta varios centímetros, figura 5 b), aunque en este caso la señal registrada no es lineal y el ensayo es destructivo.

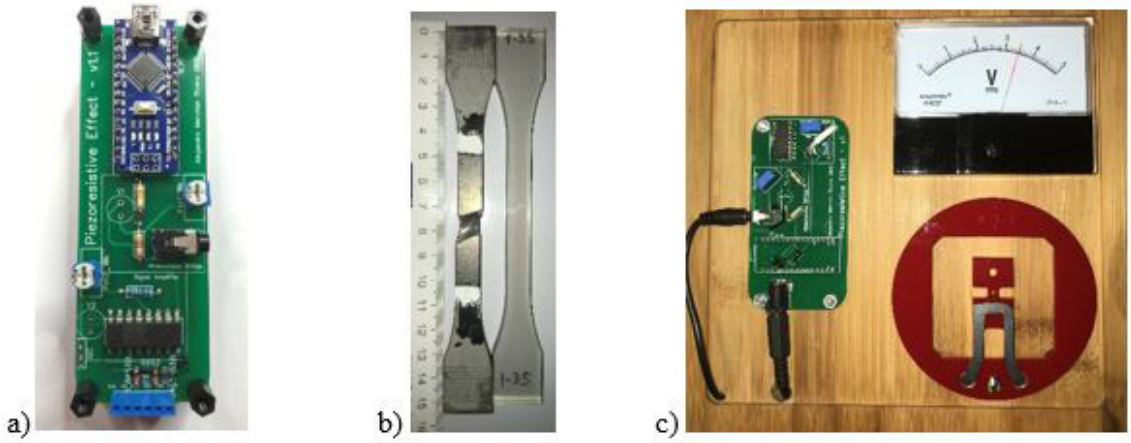


Figura 5. a) Electrónica de control v1.1; b) pruebas de laboratorio de deformaciones destructivas; c) demostrable educacional de la tecnología con electrónica de control v1.0.

4. Aplicación del sistema a una cámara de combustión y tobera de un cohete

Uno de los retos más importantes para la optimización del diseño de nuevos cohetes corresponde al conocimiento del estado tensional en las cámaras de combustión y sus toberas, tanto durante el lanzamiento como durante el vuelo. En la figura 6 puede observarse un detalle de la instrumentalización en la zona de unión de la tobera con la cámara de combustión.

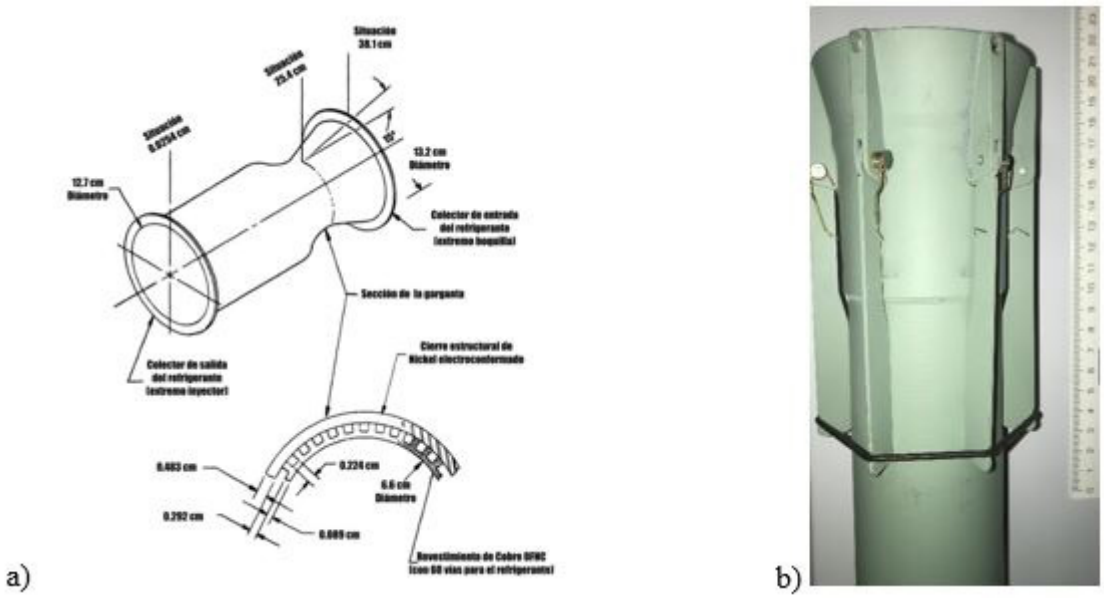


Figura 6. Cámaras de combustión. a) Detalle de diseño; b) cámara de combustión de un cohete.

El recubrimiento de grafito, como sistema de registro de deformaciones, es de especial utilidad para el citado caso de las cámaras de combustión al permitir superar algunas limitaciones de los sistemas actuales. Como principal ventaja del sistema de grafito se destaca su elevada precisión para la medida de microdeformaciones con un amplio rango de funcionamiento tanto en las deformaciones como en temperaturas, gracias a la elevada estabilidad térmica del grafito, aunque sería necesario introducir la corrección por temperatura en la medida. El recubrimiento externo de las cámaras de combustión suele ser una superficie idónea, desde el punto de vista eléctrico, para la aplicación de esta metodología.

5. Conclusiones

Con el sistema de instrumentalización de estructuras basado en un recubrimiento de grafito, se pueden medir las deformaciones en superficie de forma rápida y no invasiva; un pulido superficial suele ser suficiente para la aplicación del recubrimiento sobre superficies aislantes. Por otro lado, la estabilidad térmica del grafito, así como su resistencia a agentes químicos hacen de este dispositivo una herramienta de monitorización alternativa a las actuales en atmósferas agresivas o condiciones extremas.

Otras cualidades a considerar son la sencillez tanto de aplicación como de electrónica y el pequeño flujo de datos necesarios para la monitorización de las deformaciones en tiempo real posicionan al sistema presentado como idóneo en su aplicación para cohetería. Sin embargo, las elevadas aceleraciones que sufren estos sistemas de defensa, obligarán a focalizar esfuerzos en prototipos posteriores para el rugerizado del sistema y la miniaturización de la electrónica antes de que pueda ser aplicado de manera rutinaria.

Agradecimientos

Se agradece al INTA, en particular al Departamento de NBQyM de la Subdirección de Sistemas Terrestres el uso de las instalaciones. De igual forma debe reconocerse la contribución del programa de prác-

ticas en empresa de la URJC, Grupo de investigación Durabilidad e Integridad Mecánica de Materiales Estructurales (DIMME), por proporcionar alumnos altamente preparados para pequeños proyectos de investigación que apoyan su formación.

Referencias

1. *Zhou Z.W.K. Strain gauge placement optimization for structural performance assessment. Engineering Structures. 2017:141(C):184-197.*
2. *Badiola V. Diseño de Máquinas I. Capítulo 7. Extensometría. Universidad de Navarra. 2004.*
3. *Dirjish M. What's the difference between Piezoelectric and Piezoresistive Components. Electronic Design. 2012.*
4. *Lewis E.H et al. The Piezoresistive Effect and its Applications. The review of scientific instruments. 1960: 31(3):323.*
5. *González G.P. et al. Mechanical and thermal behavior dependence on graphite and oxidized graphite content in polyester composites. Polymer. 2018:153:9-16.*
6. *Mason W.P., Thurston R. N.. Use of the Piezoresistive Materials in the Measurements of Displacement, Force and Torque. The Journal of the Acoustical Society of America. 1957:29(10):1096-1101.*
7. *Ri R.H et al. Analytical estimation of temperature dependence of electrical resistivity with heat treatment temperature of graphitizing carbon materials. Physica B: Physics of Condensed Matter. 2018:545:413-419.*

Adhesivos estructurales en el sector defensa

Peña Fernández, Ángel Luis[1,*], García Cubero, Iván[2]

[1] * Centro de I+D (Ingeniería) General Dynamics Santa Bárbara Sistemas. Vía de los Poblados 3, 28033, Madrid, España.

Email: Luis.pena@gdels.com (LPF).

[2] SAS Group. Polígono de Trobajo, Calle Vaguada , 11, 24010, León, España.

Email: ig.cubero@saes-asd.com (IGC)

Resumen

El diseño con distintos materiales en la fabricación de automóviles muestra una clara tendencia hacia el logro de resultados óptimos en reducción de peso y una mayor libertad en el diseño, mientras se mantiene la seguridad frente a los impactos, requisito clave de este sector.

La unión adhesiva estructural, es una técnica de unión que facilita la implementación de distintas piezas desde composites de fibra de carbono reforzado a metales ligeros, en el diseño de los vehículos modernos, de forma que ya podemos encontrar en el mercado vehículos de alta gama cuya carrocería va cien por cien adhesivada.

Los adhesivos estructurales permiten una reducción significativa del peso y un mejor rendimiento acústico en uniones de vehículos ligeros compuestos por distintos materiales, mejorando su protección contra la corrosión. Se mantiene la flexibilidad del diseño mientras se consiguen los objetivos de rendimiento y sostenibilidad.

La pregunta que hay que responder es si es viable trasladar estas soluciones a vehículos militares con altas exigencias en cuanto a la resistencia estructural que han de presentar y los niveles de protección frente amenazas externas cada vez más altos.

En el presente trabajo se mostrará la aplicabilidad de este método de unión sobre un vehículo de combate de zapadores lográndose multitud de mejoras respecto a los métodos clásicos de unión por soldadura como son la reducción de peso, reducción de afectación térmica favoreciendo una protección balística mayor del blindaje, versatilidad en el montaje y menores tiempos de producción.

La viabilidad de esta solución se ha podido conseguir gracias a una caracterización detallada de diferentes adhesivos comerciales y a complejas simulaciones y cálculos sobre complejos modelos CAE del vehículo que han permitido conocer las restricciones existentes a la hora de emplear estas técnicas de unión.

Palabras clave

Reducción de peso, amenazas externas, adhesivos estructurales, seguridad frente a los impactos, versatilidad en el montaje, reducción de costes.

1. Introducción

La aplicación de las fijaciones adhesivas en el sector de los vehículos militares terrestres es limitada debido a las altas exigencias en cuanto a la resistencia estructural que han de presentar y los niveles de protección frente a amenazas externas cada vez más elevados.

General Dynamics Santa Bárbara Sistemas (GDELS SBS) tiene como objetivo optimizar el peso de sus plataformas utilizando uniones adhesivas para fijaciones interiores, reemplazando los tacos soldados actuales por elementos comerciales que puedan ser adhesivados. Además estas fijaciones adhesivas permiten una mejora no solo en el aspecto de reducción de peso, sino en otros requisitos como el coste y el tiempo de producción sin olvidar la ventaja en las labores de mantenimiento.

Existen soluciones comerciales que para poder ser aplicadas en el sector militar terrestre deben cumplir tanto con los requisitos estructurales como con los requisitos asociados a la capacidad de resistir las aceleraciones que aparecen en los vehículos militares asociadas con eventos de mina o IED (*improvised explosive device*).

2. Desarrollo

Actualmente la compañía GDELS SBS está desarrollando, entre otros, un vehículo militar de cadenas en su versión Zapador (VCZAP). Este vehículo forma parte de una flota de vehículos enmarcados en el contrato Pizarro, presentando una evolución importante en cuanto a los niveles de protección así como en nuevos sistemas orientados a la reducción de peso mediante la incorporación de materiales compuestos y fijaciones alternativas a las tradicionales, concretamente uniones adhesivas.

Uno de los principales problemas al que se enfrenta la ingeniería en la fase de desarrollo de este tipo de vehículos es el requisito del peso, siendo este el detonante para la incorporación de materiales ligeros, tanto en aleaciones de aluminio como materiales compuestos. Adicionalmente y en la misma línea de reducción de peso, otra de las acciones principales se enfoca en las técnicas tradicionales de unión, en este caso concreto el cien por cien de las fijaciones que integra un vehículo van soldadas, esto supone un peso considerable de ahí que GDELS SBS se haya focalizado en la selección e incorporación de fijaciones adhesivas comerciales.

El método seguido para evaluar las fijaciones adhesivas que se han incluido en el vehículo VCZAP se puede dividir en dos fases, una experimental con el objetivo de evaluar la ficha comercial de los productos actualmente en el mercado y otra fase de simulación orientada a evaluar la aplicabilidad de estas soluciones:

2.1. Fase I: determinación de la resistencia última de las fijaciones adhesivas en materiales de uso habitual en el vehículo VCZAP

Se han realizado ensayos de tracción y cortante mediante un equipo Instron MTS de 50 kN sobre diferentes soportes y diferentes tipos de adhesivos (epoxi y acrílico), con el objetivo de corroborar los valores de resistencia último de cada fijación adhesiva.

Se han utilizado varias probetas para estudiar de cada tipo de unión adhesivadas en materiales propios de utilización habitual en los vehículos blindados de la familia Pizarro, como son el aluminio, acero estructural convencional, así como sobre acero de blindaje, todas ellas con diferentes acabados superficiales, en configuración pintado y sin pintar, con el objetivo de evaluar cómo afecta la capa de pintura en la resistencia última de la fijación y en su modo de fallo.

La figura 1 muestra un ejemplo de la configuración diseñada para la sujeción de las mordazas en relación a la probeta de ensayo, tanto para ensayo a tracción como a cortante.

Figura 1. Sistemas de fijación a) Ensayo a tracción. b) Ensayo a cortante.

En la figura 2 se muestra como ejemplo la configuración utilizada para los ensayos de las fijaciones sobre chapa de blindaje. Se han realizado estos ensayos para comprobar el resultado de carga máxima con los adhesivos epoxi y acrílico y para verificar el correcto procedimiento de fijado.

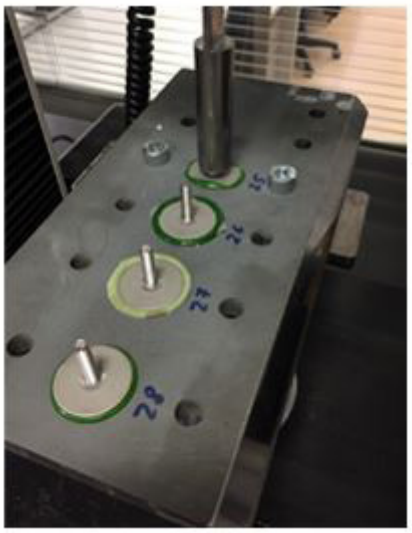


Figura 2. Ensayos sobre chapa de blindaje. Caracterización mecánica con adhesivo acrílico y epoxi.

Por otra parte, se han llevado a cabo ensayos de tracción con el objetivo de estudiar el comportamiento del adhesivo puramente entre dos útiles indeformables y con una capa de espesor de adhesivo perfectamente cuantificada (e = 0,1 mm y e = 1,5 mm) con el objetivo de estudiar la influencia del espesor de capa en las propiedades mecánicas finales de la unión.

La figura 3 representa el útil utilizado para los ensayos de caracterización de los dos adhesivos.

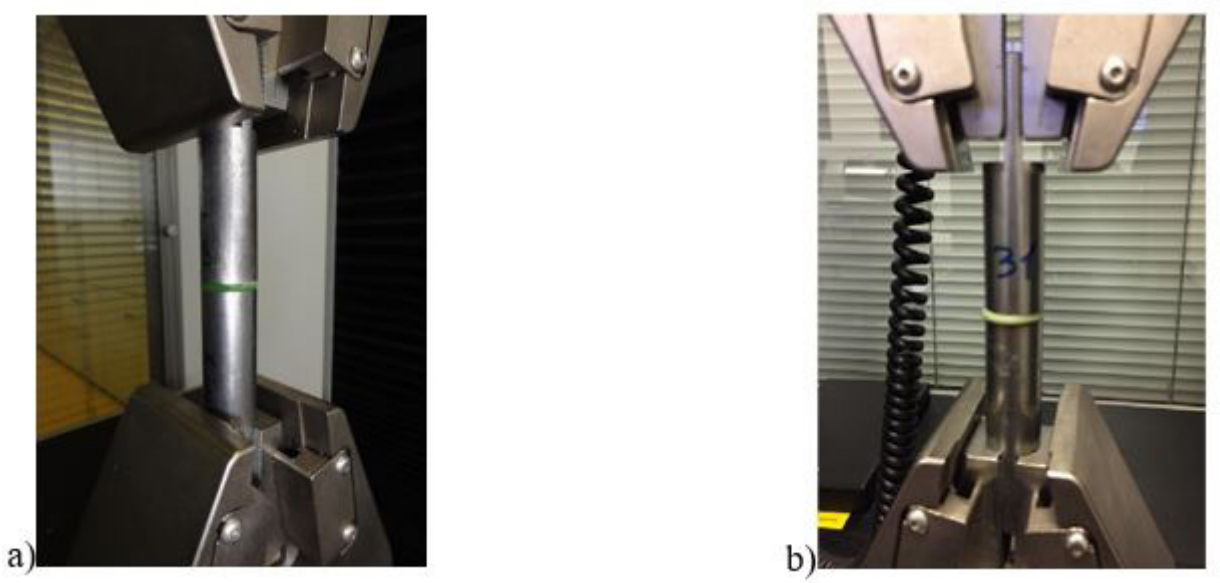


Figura 3. Imagen del útil para los ensayos de caracterización del adhesivo. a) Adhesivo epoxi; b) adhesivo acrílico.

Todos los ensayos se han realizado a temperatura ambiente, puesto que no es objeto de este estudio la variación de las propiedades mecánicas de los adhesivos en función de la temperatura.

2.2. Fase II: determinación del mapa de aceleraciones en las chapas principales de la barcaza

Se han realizado simulaciones de eventos de mina por el método de los elementos finitos con el objetivo de determinar el mapa de aceleraciones en las placas principales que componen el vehículo.

Dichas aceleraciones provenientes de eventos de mina se han utilizado como solicitaciones de diseño para la fijación de equipos a las chapas de la barcaza. Es importante conocer las cargas máximas con el objetivo de dimensionar y seleccionar el tipo y número mínimo de fijaciones de unión a los equipos o masas suspendidas a las chapas de la estructura del vehículo.

En la figura 4 se muestran dos imágenes de la configuración inicial del modelo de simulación que se ha llevado a cabo bajo la normativa internacional, donde se puede ver la estructura del vehículo junto con una de las posiciones de la mina simuladas.

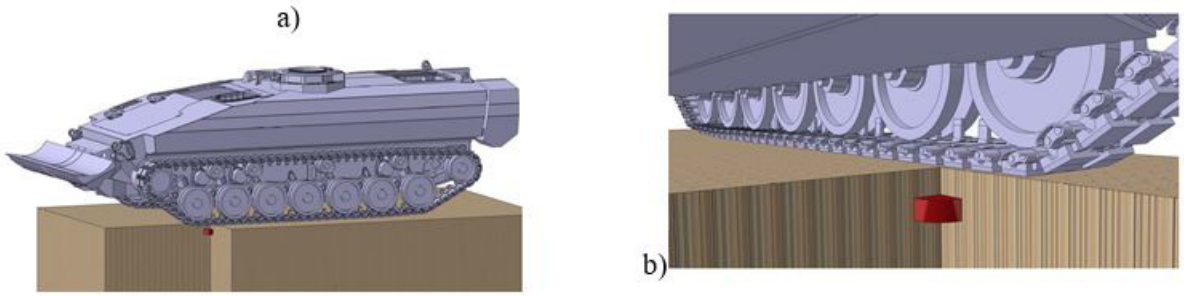


Figura 4. Simulaciones de mina. Configuración del modelo.

Por tanto, a partir de las aceleraciones obtenidas en estas simulaciones es posible conocer la magnitud dinámica de la masa suspendida que debe soportar la fijación adhesiva. De esta manera, y en base a dichas solicitaciones, es posible seleccionar el tipo y número mínimos de fijaciones en función de la masa suspendida según la zona de unión a la barcaza.

3. Resultados y discusión

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada una de las dos fases descritas anteriormente.

3.1. Fase I: determinación de la resistencia última de las fijaciones adhesivas en materiales de uso habitual en el vehículo VCZAP

Se han obtenido curvas de fuerza de tracción/desplazamiento y fuerzas a cortante/desplazamiento para las fijaciones adhesivas comerciales ensayadas sobre los diferentes substratos y en las condiciones de pintura y sin pintura.

En la figura 5 se muestran un ejemplo de los resultados del ensayo a tracción de una fijación adhesiva comercial adhesivada con adhesivo acrílico y sobre un substrato de aluminio sin pintura y sobre un substrato de acero convencional sin pintura.

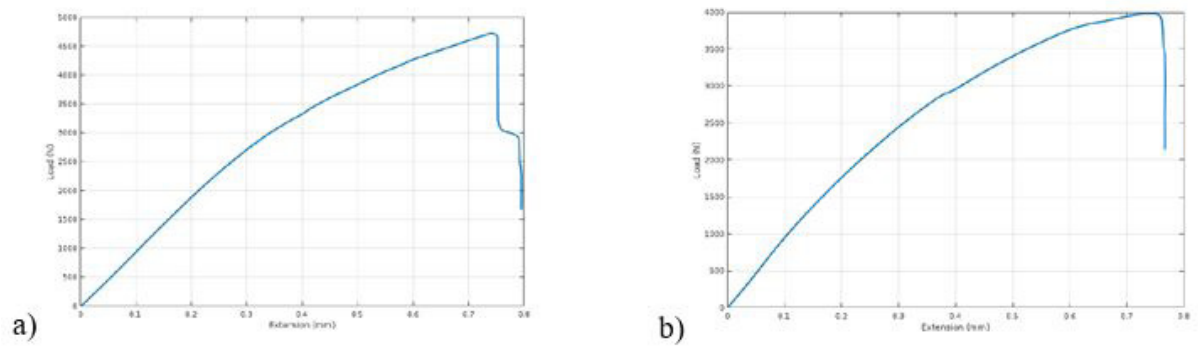


Figura 5. Ensayo de tracción de una fijación adhesiva comercial sobre dos substratos sin pintura. a) Aluminio; b) acero convencional.

En la figura 6 se observa el modo de fallo de la fijación comercial sobre substrato de aluminio sin pintura y sobre un substrato de acero convencional sin pintura.

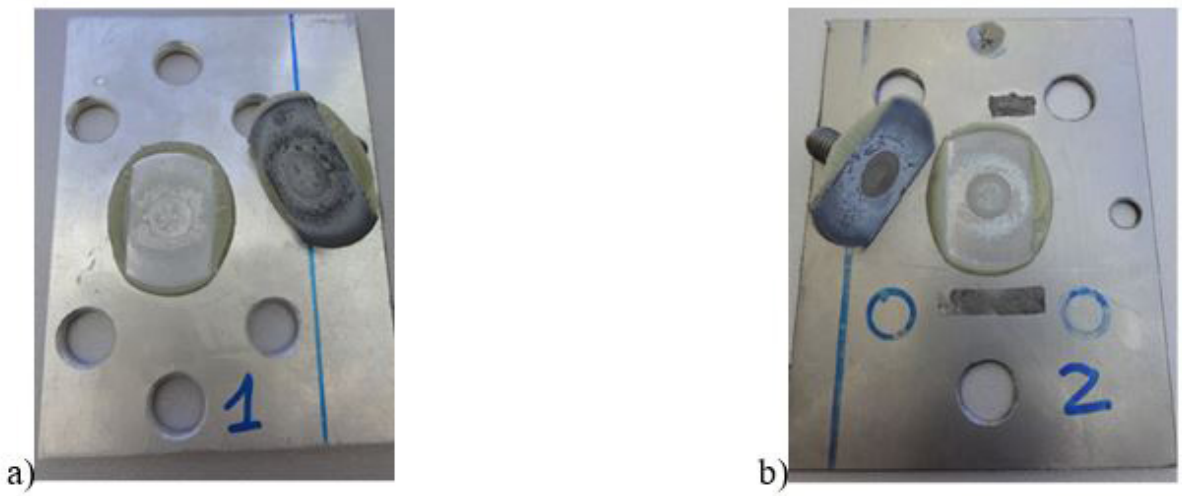


Figura 6. Modo de fallo de la fijación adhesiva comercial sobre substratos sin pintura. a) Aluminio; b) acero convencional.

En lo que se refiere a los resultados de caracterización de los adhesivos epoxi y acrílico, la figura 7 muestra el ensayo de tracción con adhesivo epoxi entre los dos útiles indeformables y con una capa de adhesivo de espesor e = 0,1 mm.

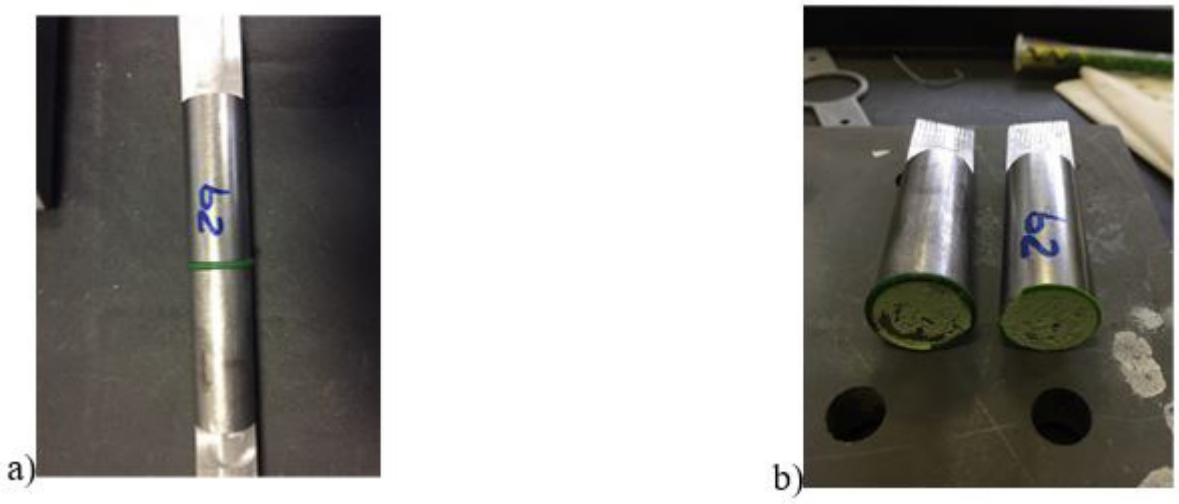


Figura 7. Ensayo de tracción. Caracterización del adhesivo epoxi entre dos útiles indeformables. Espesor de capa e = 0,1 mm.

La curva fuerza a tracción/desplazamiento del adhesivo epoxi se muestra en la figura 8, donde se observan una carga a rotura de 10292 N para un desplazamiento de 2,005 mm.

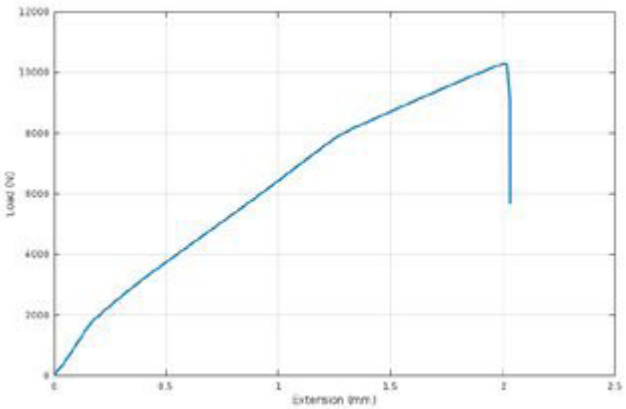


Figura 8. Caracterización del adhesivo epoxi. Espesor de capa e = 0,1 mm.

Las tensiones de rotura para el diseño de soportes o fijación de superficies son:

- Para espesores de capa e = 1,5 mm: Adhesivo acrílico: 28,94 MPa. Adhesivo epoxi: 28,5 MPa.
- Para espesores de capa e = 0,1 mm: Adhesivo acrílico: 33,42 MPa. Adhesivo epoxi: 31,83 MPa.

Los resultados muestran que para conseguir la máxima fuerza y rigidez de la capa de adhesivo en la unión es preferible utilizar capas de adhesivo de un espesor delgado.

3.2. Fase II: determinación del mapa de aceleraciones en las chapas principales de la barcaza

Se ha determinado el mapa de aceleraciones en las chapas principales del vehículo VCZAP para los eventos de mina simulados.

La figura 9 muestra una imagen del nivel tensional en el interior del vehículo a los 2,5 ms después de la detonación de la mina bajo panza.

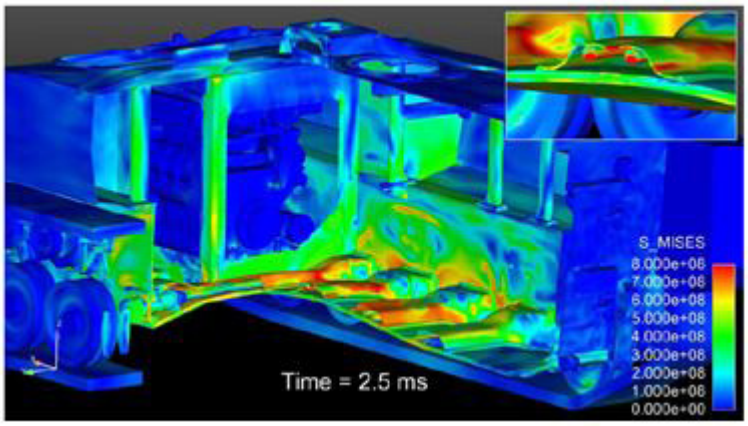


Figura 9. Campo de tensiones en el interior del VCZAP en el instante de tiempo t = 2,5 ms.

A partir de las curvas de desplazamiento-tiempo en las tres direcciones del espacio, X, Y y Z, se han derivado dos veces dichas curvas para obtener las aceleraciones. De esta manera, se ha determinado el mapa de aceleraciones en las placas principales del vehículo zapador.

La figura 10 muestra como ejemplo el mapa de aceleraciones en el techo del vehículo y en las tres componentes del espacio, a_X, a_Y y a_Z.

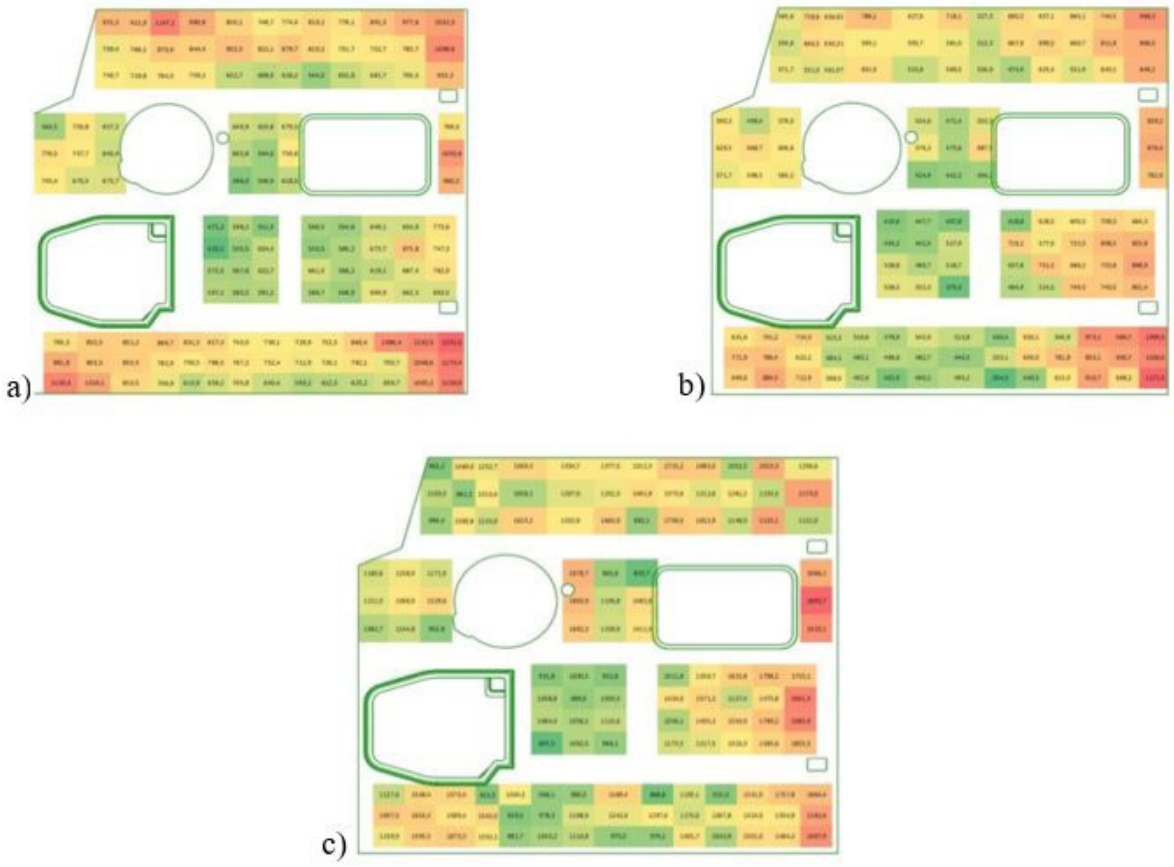


Figura 10. Mapa de aceleraciones en el techo del vehículo VCZAP. a) Aceleración aX, b) aceleración aY, c) aceleración aZ.

Del mismo modo que en el techo del vehículo, se han determinado los mapas de aceleraciones en las placas laterales del vehículo donde se tiene previsto fijar uniones adhesivas.

A partir de la resistencia máxima de cada fijación adhesiva y conociendo el mapa de aceleraciones en cada zona del vehículo donde se pretenda fijar una masa suspendida, se puede obtener el número de soportes necesario por cada kg de masa suspendida según zona del vehículo.

De esta manera, es fácil definir una regla para que los diseñadores conozcan la relación entre la aceleración / número de fijaciones por kg de equipo a instalar.

4. Conclusiones

Tras los ensayos realizados se ha comprobado que no en todos los materiales empleados en el diseño de este tipo de vehículos se cumplen los valores de carga a rotura que indica el catálogo comercial, y esto se ha tenido en cuenta en la fase tanto de diseño como de fabricación.

Se han determinado las cargas de rotura de las fijaciones comerciales adhesivadas para los materiales de utilización en el vehículo VCZAP. En los ensayos sobre pintura el fallo de la fijación pasa por el límite de cohesión de la pintura, siendo mucho más bajo que el obtenido por el adhesivo. Se ha comprobado que es fundamental una correcta limpieza y preparación superficial para alcanzar la carga de rotura indicada en las hojas técnicas. En el caso del acero de blindaje se alcanzó la carga de rotura especificada únicamente en el caso de utilizar un abrasivo más duro (carburo de silicio) que en el caso del utilizado para la preparación superficial del aluminio (óxido de aluminio).

Los ensayos realizados con los útiles para caracterización de los adhesivos, indican que ambos tienen valores muy similares, en torno a los 31 MPa, siendo indiferente la elección por criterios de carga de rotura. Los criterios de complejidad de manipulación y los tiempos de curado, aconsejan utilizar el acrílico.

A partir de la realización de los ensayos mecánicos y las simulaciones reales se puede concluir que existen zonas del vehículo donde no es posible fijar equipos de grandes masas puesto que las aceleraciones son también muy elevadas, por lo tanto, solo masas pequeñas pueden ser instaladas en las placas principales del vehículo.

Por tanto, para el diseño del vehículo VCZAP, se han utilizado fijaciones adhesivas en las instalaciones auxiliares (sistema de combustible, aire acondicionado, instalaciones hidráulicas…) y la integración de los arneses eléctricos, consiguiéndose así una reducción aproximada de 40 kg con una reducción en costes, por el proceso de producción de un 25 %.

Agradecimientos

Jefatura de Sistemas Terrestres/Subdirección de Gestión de Programas/Dirección General de Armamento y Material.

Referencias

1. *A Stochastic Approach to Integrated Reliability Prediction. US Army TARDEC. David Lamb, Dan Negrut. ; TR-2012-09 (2009-05).*
2. *Mehdi Sotudeh, Mariusz Ziejewski. «Numerical analysis of blast-induced wave propagation using FSI multi-material formulations. LLNL 2009.03.007.*
3. *Handbook of Adhesive Technology. A. Pizzi; K.L. Mittal. New York. Basel. Second Edition.*
4. *Adhesive and sealants: General knowledge, Application techniques, New curing techniques. Philippe Cognard. Elsevier.*

Nanocomposites reforzados con grafeno y nanocerámicas de carburo de silicio para blindajes personales

Gago, Israel*; del Río, Manuel; Carretero, Julián; Ibarra, Isidro; León, Gerardo; Miguel, Beatriz

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo de Alfonso XIII, n.º 52, 30203. Cartagena. España

*Email: israel.gago@upct.es

Resumen

El grafeno es sin lugar a dudas, el nanomaterial que más se está investigando debido a que sus propiedades singulares permiten la preparación de *nanocomposites* (materiales compuestos basados en nanotecnología) para todo tipo de campos: optoelectrónica, bioingeniería, supercomputación, materiales compuestos multifuncionales, energía, sensorización, etc. Además, es posible combinar el grafeno con otros nanomateriales para conseguir que el *nanocomposite* resultante posea propiedades muy específicas. En este trabajo se ha llevado a cabo la caracterización balística de una serie de laminados de resina de poliéster cargada con nanopartículas cerámicas de carburo de silicio (SiC) y reforzados con tejido de fibra de vidrio, utilizando grados de carga comprendidos entre el 25 % y el 75 % en peso. Se determinó el límite balístico (V_0) de dichas placas con la munición 7,62x51 FMJ, según la norma NATO STANAG 2920. Tras el análisis de todos los resultados obtenidos y otros anteriores, se fabricó una nueva serie de laminados optimizados, utilizando la misma matriz nanoreforzada con grafeno y nanopartículas de SiC conjuntamente y empleando en este caso un tejido de para-aramidas de uso militar como fibras de refuerzo. Se determinó el límite balístico (V_0) de dichas placas frente a las municiones 7,62x51 FMJ y 5,56x45 SS109 s/STANAG 2920. Los resultados mostraron mejoras en el parámetro V_0 respecto a las probetas sin dopar del 11,1 % y del 22,6 %, respectivamente. Estos resultados muestran que los *nanocomposites* basados en el grafeno y las nanocerámicas pueden aportar soluciones de interés en el diseño y desarrollo de nuevos materiales para sistemas de protección balística personal, proporcionando mejores niveles de protección y ligereza a los operativos de las Fuerzas Armadas del Estado español.

Palabras clave

Grafeno, nanocomposites, nanocerámicas, protección balística.

1. Introducción

Los conflictos actuales y aquellos que se desarrollen en el futuro cercano pueden enmarcarse adecuadamente en el concepto de guerras de cuarta generación (GCG), enunciado originalmente por *William S. Lind* y que alcanzó especial repercusión a partir de 2005 y durante los peores años de la insurgencia iraquí [1]. Hoy en día, también se emplean otras nomenclaturas como las de guerras asimétricas o guerras híbridas para hacer referencia a esta nueva realidad. En el centro de este fenómeno se encuentra no una evolución militar sino una revolución política, social y moral: una crisis de legitimidad del Estado. A lo largo del mundo, los ciudadanos de diferentes países están transfiriendo su lealtad primaria del Estado a otras entidades: grupos étnicos, religiones, bandas, ideologías y «causas». Este tipo de conflictos se caracterizan porque aunque siguen existiendo los niveles táctico, operacional y estratégico, todos pueden darse en un espacio muy limitado, debido a que las operaciones se desarrollan fundamentalmente en entornos urbanos y en condiciones de combate cercano que pueden cambiar muy rápidamente.

Un chaleco antibalas o sistema de protección pasiva del combatiente (SPPC) es un equipo de protección individual, cuyas funciones son las de evitar la penetración en el cuerpo de proyectiles de armas de fuego, fragmentos de metralla y/o armas blancas, y la de absorber la energía del impacto, reduciendo el trauma causado por este. Los chalecos convencionales son relativamente flexibles y ligeros, debido a que están fabricados con tejidos de fibras sintéticas dispuestos en capas sucesivas, pero solamente ofrecen protección frente a impactos de proyectiles de arma corta y núcleo deformable, perdigones de escopeta y pequeños fragmentos como los de las granadas de mano. La protección frente a proyectiles de fusil de alta velocidad, metralla de mayor tamaño u objetos punzantes muy afilados, requiere el empleo de placas rígidas que normalmente se superponen a un chaleco convencional y tienen el gran inconveniente de ser gruesas, pesadas e incómodas, por lo que su uso limita sensiblemente la movilidad del portador.

El análisis de los datos referentes al número de bajas sufridas por el conjunto de las tropas de la coalición multinacional desplegadas en las operaciones *Enduring Freedom, Iraqui Freedom, New Dawn, Inherent Resolve y Freedom's Sentinel* (porcentajes, causas, localización anatómica, etc.), muestra patrones similares a los de todos los conflictos a gran escala desde la Segunda Guerra Mundial (inclusive), salvo por tres excepciones fundamentales. En primer lugar, el porcentaje de bajas causadas por algún tipo de mecanismo explosivo (IED, artillería, granadas de mano, etc.) es del 84 %, frente al 13 % causado por armas de fuego, siendo esta diferenciación la más acusada vista hasta la fecha. En segundo lugar, se observa un cambio sustancial en la localización de las heridas que se traduce en un aumento notable tanto de las bajas ocasionadas por lesiones en las zonas cabeza-cuello y extremidades, como en el número de heridas por cada combatiente que causa baja [2–6]. Por último, aparece una nueva amenaza que no se contemplaba en las anteriores estadísticas porque su incidencia sobre el total era irrelevante pero que actualmente, se acerca a valores del 3 % y es cada vez más significativa: los accidentes de tráfico en zona de operaciones (ZO).

Tomando en consideración lo anterior, la tendencia apunta a que los SPPC actuales se acercan a volverse inadecuados para equipar al combatiente con un equipo acorde a sus nuevas necesidades. Protección/peso, movilidad y adaptabilidad son cada vez aspectos más determinantes. Ejemplos de esta nueva realidad son el futuro sistema SPS (por *Soldier Protection System*) norteamericano o el *Ratnik-3* ruso (figura 1) [7, 8].

Figura 1. Imagen del futuro SPPC Soldier Protection System (SPS) en desarrollo por el ejército de los Estados Unidos (izquierda) y del Ratnik-3 en desarrollo por el ejército ruso (derecha) [7,8].

Desde su descubrimiento en 2004 por Geim y Novoselov [9] el grafeno está suscitando un interés que crece día a día en diversos sectores tecnológicos y de un modo más acusado si cabe en el sector de la defensa. Estructuralmente, el grafeno es una lámina de espesor monoatómico, formada por átomos de carbono con hibridación sp^2, enlazados entre sí y constituyendo un enrejado cristalino hexagonal, en el que la longitud del enlace C-C es de 1,42 Å [10]. Aunque además del grafeno existen otros nanomateriales que ya han sido propuestos para su aplicación en el campo de los *nanocomposites* [11], recientemente es este, el nanomaterial que más interés está generando. Esto se debe a que, aunque el grafeno destaca sobre todo por las propiedades que le postulan para ser el material por antonomasia en la electrónica y la informática del futuro, cuenta también con propiedades mecánicas sorprendentes [12].

A finales de 2014, un equipo conjunto de investigadores pertenecientes a la Universidad de Rice y al Instituto Tecnológico de Massachusetts publicó un estudio sobre las propiedades mecánicas del grafeno frente a impactos de microesferas de SiO_2 a alta velocidad [13]. Sin embargo y hasta la fecha, el único estudio publicado sobre las capacidades de los *nanocomposites* de grafeno en términos de protección balística a escala macroscópica es de origen español [14].

Con objeto de analizar la viabilidad del desarrollo de nuevos materiales basados en el grafeno y las nanocerámicas para su posible aplicación en SPPC de nueva generación, nuestro grupo de trabajo ha llevado a cabo un estudio de la influencia que la adición de grafeno y nanopartículas de SiC a un material compuesto, tiene sobre algunas de sus propiedades como protector frente a un impacto balístico. En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos utilizando una serie de *nanocomposites* preparados a base de una resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio y para-aramidas y dopada con grafeno prístino *few-layer* (≤7 capas) y nanopartículas de SiC.

2. Materiales y métodos

El grafeno prístino *few-layer*, fue sintetizado en nuestro laboratorio y caracterizado por espectroscopía de Raman (Jovin-Ivon LabRam, SiO_2/Si, 532 nm) y microscopía electrónica de transmisión de alta resolución o HR-TEM (JEOL JEM-2100, 200 kV) tal como se ha descrito en trabajos anteriores [14].

Los materiales empleados para la fabricación de los *nanocomposites* fueron el grafeno previamente producido, una resina de poliéster insaturado ortoftálica (Recapoli 955 INF DCPD), nanopartículas pseudoesféricas de SiC (*Minerals Water*), un tejido bidireccional de fibra de vidrio E (*plain*, 0º/90º, 600 $g \cdot m^{-2}$) y un tejido de fibras de para-aramidas de uso militar (*plain*, 0º/90º, Twaron CT 709, 200 $g \cdot m^{-2}$).

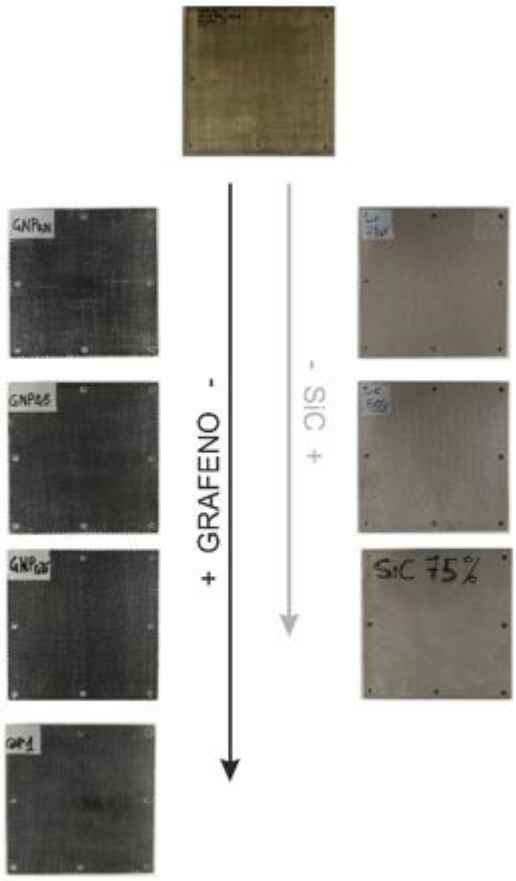


Figura 2. Secuencia de las probetas reforzadas con fibra de vidrio con la probeta blanco sin dopar (arriba, centro), las dopadas con grafeno (izquierda) y las cargadas con SiC (derecha).

La preparación de las matrices de los nanocomposites dopados se realizó de un modo similar al descrito en nuestra patente con algunas modificaciones [15], utilizando cuatro grados diferentes de dopaje de grafeno (0,25 %, 0,5 %, 0,75 % y 1 %) y tres grados de carga de SiC (25 %, 50 % y 75 %) en peso y por separado. La fabricación de los laminados se llevó a cabo mediante una técnica combinada de laminación manual y moldeo por compresión asistido por vacío y a temperatura ambiente. Para la fabricación de las probetas combinadas reforzadas con para-aramidas y dopadas con grafeno y nanocerámicas se siguió un procedimiento similar. A partir de los resultados obtenidos, se realizó la fabricación y caracterización balística de dos laminados de resina de poliéster y refuerzo de para-aramidas, uno sin dopar y otro dopado mediante la combinación del grafeno con las nanopartículas cerámicas (figura 2).

Finalizados los procesos de curado, las probetas fueron mecanizadas en forma de placas cuadradas de 250 mm x 250 mm x 5 mm, tal como se muestra en las figuras 2 y 3.

La caracterización del límite balístico (V_0) de los laminados fabricados se llevó a cabo en colaboración con operativos del Tercio de Levante del Cuerpo de Infantería de Marina, según las directrices establecidas en la norma NATO STANAG 2920 [16], mediante un sistema desarrollado a tal fin e instalado en el

campo de tiro de esta unidad. Como armas para los ensayos se utilizaron un fusil de precisión *Accuracy International AW 07 11664* con munición 7,62x51 mm FMJ y un fusil *Heckler & Koch HK G36 E* con munición 5,56x45 SS109. El taller de polvorines de la Estación Naval de la Algameca proveyó para los experimentos varias series de cartuchos con cargas de proyección modificadas (100 %, 90 %, 80 %, 70 %, 60 % y 50 %), con objeto de obtener las curvas de comportamiento balístico de los materiales ensayados en un amplio rango de velocidades de impacto.

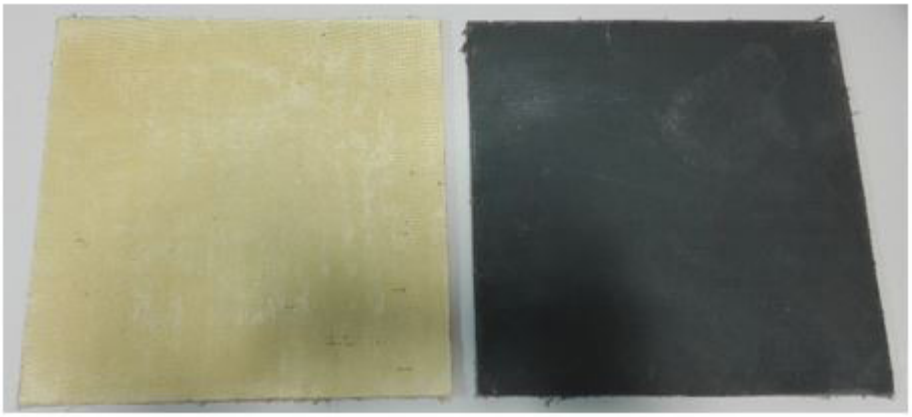


Figura 3. Probeta blanco de resina de poliéster reforzada con paraaramidas (izquierda) y reforzada con grafeno y nanocerámicas (derecha).

3. Resultados y discusión

La figura 4 muestra el espectro Raman del grafeno obtenido con sus parámetros fundamentales de caracterización, quedando probado que en efecto, se trata de grafeno prístino *few-layer* [17].

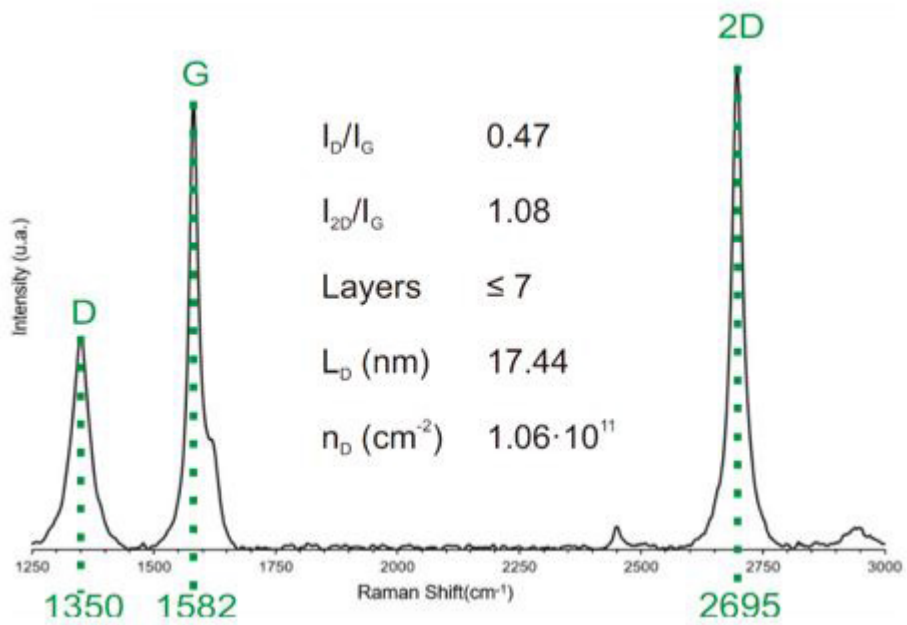


Figura 4. Espectro de Raman del grafeno obtenido con la posición de los tres picos de interés, así como los parámetros más relevantes de su caracterización.

Los datos experimentales de las velocidades de impacto (Vs) y escape (Ve) de los proyectiles, obtenidas en los ensayos de caracterización balística (7,62x51 FMJ) permitieron determinar los valores experimentales del límite balístico (V_0) para las placas dopadas reforzadas con fibra de vidrio (figuras 5 y 6).

El límite balístico para las probetas reforzadas con fibra de vidrio y dopadas con grafeno aumenta con el incremento del porcentaje de dopaje, alcanzando un valor máximo de 266,4 $m \cdot s^{-1}$ para el laminado dopado al 1 % en peso. Este aumento significa una mejora relativa del 72,2 % respecto al laminado sin dopar.

El límite balístico para las probetas reforzadas con fibra de vidrio y dopadas con nanopartículas de SiC aumenta con el incremento del porcentaje de dopaje, alcanzando un valor máximo de 237 $m \cdot s^{-1}$ para el laminado dopado al 75 % en peso. Este aumento significa una mejora relativa del 53,2 % respecto al laminado sin dopar.

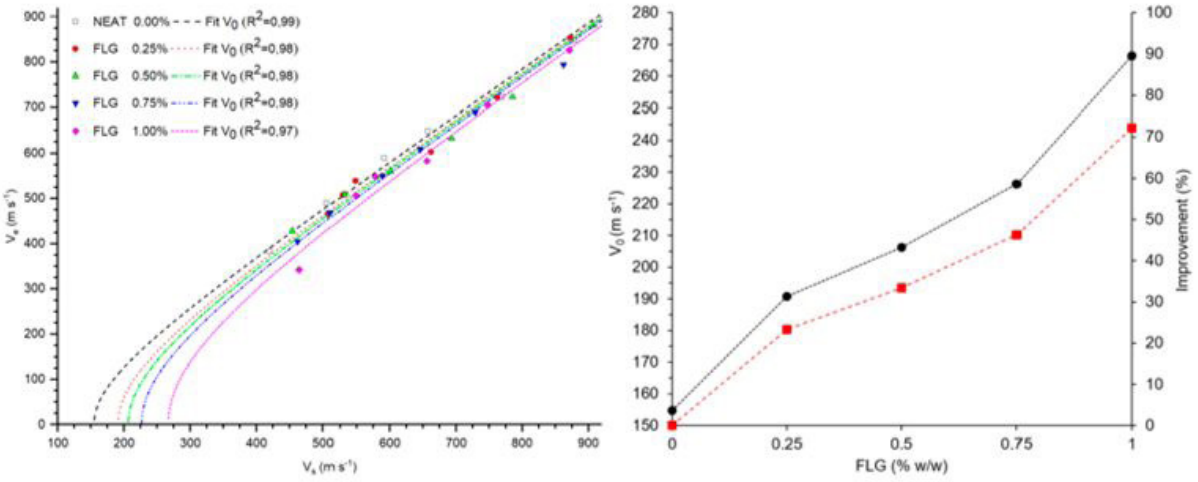


Figura 5. Izquierda: velocidades de impacto (Vs) frente a velocidades de escape (Ve) de los laminados ensayados con sus curvas y coeficientes de ajuste para el límite balístico (V0). Derecha: representación gráfica de los resultados experimentales obtenidos para el parámetro V0 en términos de valores absolutos (negro) y de mejora relativa (rojo) según el grado de dopaje de grafeno (% FLG).

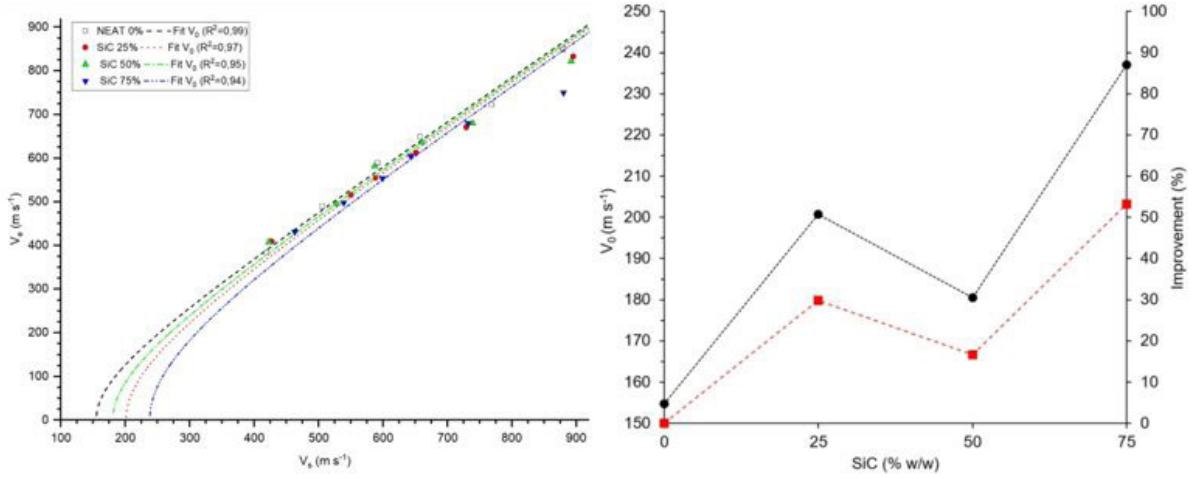
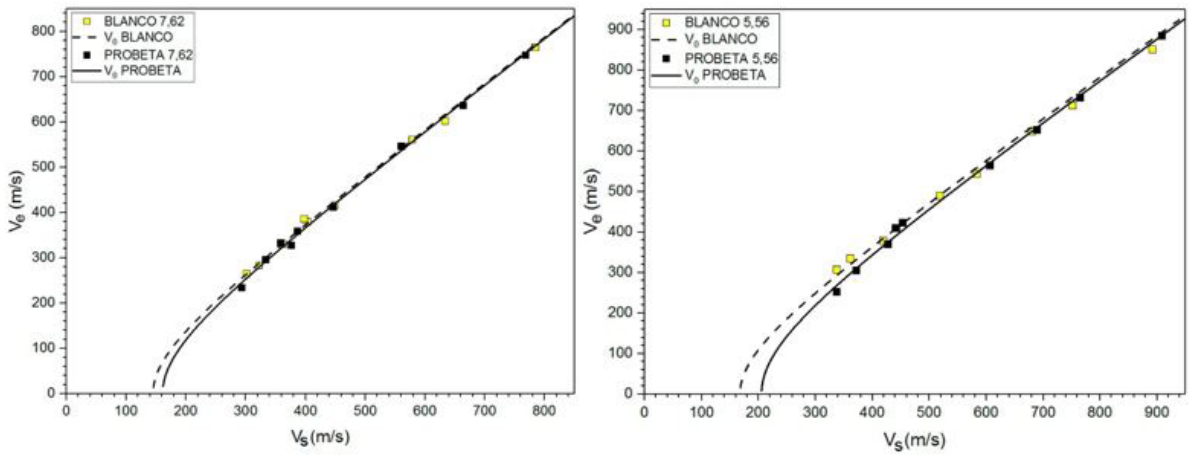


Figura 6. Izquierda: velocidades de impacto (Vs) frente a velocidades de escape (Ve) de los laminados ensayados con sus curvas y coeficientes de ajuste para el límite balístico (V0). Derecha: Representación gráfica de los resultados experimentales obtenidos para el parámetro V0 en términos de valores absolutos (negro) y de mejora relativa (rojo) según el grado de carga de SiC (% SiC).

Los datos experimentales de las velocidades de impacto (V_s) y escape (V_e) de los proyectiles, obtenidas en los ensayos de caracterización balística (7,62x51 FMJ y 5,56x45 SS109) permitieron determinar los valores experimentales del límite balístico (V_0) para las placas finales de resina de poliéster reforzada

con fibras tejidas de para-aramidas y dopadas conjuntamente con grafeno y nanocerámicas de SiC, tal como se muestra en la figura 7.

El límite balístico para las probetas reforzadas con para-aramidas y dopadas con grafeno y nanopartículas de SiC aumenta con respecto al laminado sin dopar, alcanzando valores máximos y mejoras relativas respecto a la probeta sin dopar de 160,8 $m \cdot s^{-1}$ (+11,1 %) para la munición 7,62x51 FMJ y de 205,3 $m \cdot s^{-1}$ (+22,6 %) para la munición 5,56x45 SS109.



4. Conclusiones

En esta comunicación se describen los resultados obtenidos por nuestro equipo de trabajo en los estudios sobre la capacidad del grafeno y las nanocerámicas de SiC para mejorar el límite balístico de un material compuesto, formado por una matriz de resina termoestable de poliéster reforzada con fibra de vidrio, para-aramidas y dopada con grafeno prístino *few-layer* y nanopartículas de SiC.

La caracterización balística de las probetas nanoreforzadas muestran mejoras en el parámetro V_0 respecto a las probetas sin dopar del 11,1 % y del 22,6 % frente a las municiones 7,62x51 FMJ y 5,56x45 SS109, respectivamente y según lo establecido en la norma NATO STANAG 2920.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del desarrollo de nuevos *nanocomposites* basados en la combinación del grafeno con nanomateriales cerámicos con propiedades mecánicas mejoradas, que permitirán en un futuro próximo el diseño y la fabricación de una nueva generación de sistemas de protección balística personal más eficientes. Este tipo de sistemas significarán un aumento notable de las capacidades operativas y la seguridad de las unidades de las Fuerzas Armadas el Reino de España.

Agradecimientos

Este estudio ha sido cofinanciado por el programa COINCIDENTE 2014 del Ministerio de Defensa del Reino de España y la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). Los autores agradecen el apoyo prestado por la Armada Española y el Tercio de Levante del Cuerpo de Infantería de Marina, así como el proporcionado por el Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica (SAIT) de la UPCT y la compañía española Fábrica Española de Confecciones S.A.

Referencias

1. *Lind WS, Thiele GA. 4th generation warfare handbook. Castalia House; 2015.*
2. *Owens BD, Kragh Jr JF, Wenke JC, Macaitis J, Wade CE, Holcomb JB. Combat wounds in operation Iraqi Freedom and operation Enduring Freedom. Journal of Trauma and Acute Care Surgery. 2008: Feb 1;64(2):295-9.*

3. *Kelly JF, Ritenour AE, McLaughlin DF, Bagg KA, Apodaca AN, Mallak CT, Pearse L, Lawnick MM, Champion HR, Wade CE, Holcomb JB. Injury severity and causes of death from Operation Iraqi Freedom and Operation Enduring Freedom: 2003–2004 versus 2006. Journal of Trauma and Acute Care Surgery. 2008: Feb 1;64(2):S21-7.*
4. *Fischer H. US military casualty statistics: operation new dawn, operation Iraqi freedom, and operation enduring freedom. Library of Congress Washington Dc Congressional Research service; 2013.*
5. *Carr DJ, Horsfall I, Malbon C. Is behind armour blunt trauma a real threat to users of body armour? A systematic review. Journal of the Royal Army Medical Corps. 2016 Feb 1;162(1):8-11.*
6. *Merkle AC, Ward EE, O'connor JV, Roberts JC. Assessing behind armor blunt trauma (BABT) under NIJ standard-0101.04 conditions using human torso models. Journal of Trauma and Acute Care Surgery. 2008 Jun 1;64(6):1555-61.*
7. *U.S. Army Acquisition Support Center. Soldier protection system (SPS). 2018. [En línea]. Disponible: https://asc.army.mil/web/portfolio-item/soldier-protection-system-sps/*
8. *D. Crane. Russian ratnik-3 (warrior-3) infantry combat system. 2018. [En línea]. Disponible: http://www.defensereview.com*
9. *Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, Jiang DA, Zhang Y, Dubonos SV, Grigorieva IV, Firsov AA. Electric field effect in atomically thin carbon films. Science. 2004 Oct 22;306(5696):666-9.*
10. *Varghese SS, Lonkar S, Singh KK, Swaminathan S, Abdala A. Recent advances in graphene based gas sensors. Sensors and Actuators B: Chemical. 2015 Oct 31;218:160-83.*
11. *Mohanty A, Srivastava VK, Sastry PU. Investigation of mechanical properties of alumina nanoparticle loaded hybrid glass/carbon fiber reinforced epoxy composites. Journal of Applied Polymer Science. 2014 Jan 5;131(1).*
12. *Lee C, Wei X, Kysar JW, Hone J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. Science. 2008 Jul 18;321(5887):385-8.*
13. *Lee JH, Loya PE, Lou J, Thomas EL. Dynamic mechanical behavior of multilayer graphene via supersonic projectile penetration. Science. 2014 Nov 28;346(6213):1092-6.*
14. *Gago I, del Río M, Carretero J, Ibarra I, León G, Miguel B. Nanocomposites basados en el grafeno para chalecos antibalas: límite balístico y propiedades en tensión e impacto. Premios Isdefe I+D+i. Los diez artículos finalistas del DESEi+d 2017; 2017.*
15. *Gago Velasco I, Ibarra Berrocal IJ, León Albert G, Miguel Hernández B. ABS dopado con grafeno. Patente Española ES 2 570 391 B2. 2016.*
16. *Agreement NS. Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing, NATO Standardisation Agency; 2003.*
17. *Cançado LG, Jorio A, Ferreira EM, Stavale F, Achete CA, Capaz RB, Moutinho MV, Lombardo A, Kulmala TS, Ferrari AC. Quantifying defects in graphene via Raman spectroscopy at different excitation energies. Nano letters. 2011 Jul 5;11(8):3190-6.*

Depósitos de combustible autosellantes, antiderrame y antiexplosión

Mañero Moreno, Juan Carlos*

Director de Explostop Protection S.L. (Anterior denominación: Sistemas de Protección Pasiva SL), CIF: B87331377, Calle Urano 21B, 28936 Móstoles (Madrid), admin@sppsecurity.es

*Autor principal y responsable del trabajo; Mañero Moreno Juan Carlos (admin@sppsecurity.es).

A. DEPÓSITOS PYROTEC-EXPLOSTOP: AUTOSELLANTES Y ANTIEXPLOSIÓN

A.1. Introducción

La utilización de los autosellantes en los depósitos de combustibles fue empleada por primera vez por la aviación militar inglesa. En los aviones militares debido a las velocidades que deben alcanzar requieren de mucho combustible, lo que obliga a utilizar grande depósitos, haciendo que sea un blanco fácil y sobre todo inflamable. El blindaje que se aplica con acero blindado a vehículos terrestres o marítimos aumentaría mucho su peso, consumo, y reduciría su velocidad.

Los desarrollos tecnológicos aplicados al armamento han influido en la obtención de la victoria frente al enemigo. Un ejemplo lo tenemos en la Segunda Guerra Mundial, con los aviones de caza japoneses AEM y KI-43, su ligereza y maniobrabilidad les hicieron temibles y de alto rendimiento durante los primeros años del conflicto en el Frente del Pacífico. Su escaso blindaje y la falta de depósitos autosellantes les convirtieron en blancos fáciles para los aliados, al incendiarse o romperse con pocos impactos, frente a los aviones de los aliados que tenían blindaje y depósitos autosellantes.

Los alemanes consiguieron alcanzar el espacio aéreo británico con bombarderos Dornier 17Z a pesar de haber recibido múltiples impactos de los aviones británicos del tipo Spitfire y Hurricane, los cuales utilizaban proyectiles del calibre 7,69 mm. Tal concentración de fuego equivalía a que dos cazas británicos hubieran utilizado prácticamente toda su munición contra ese bombardero, desde una distancia corta.

Figura 1. Hurricane.

Figura 2. Spitfire.

Figura 3. Dornier 17Z.

Uno de los factores que contribuían a la supervivencia de estos bombarderos era sus depósitos de combustible autosellantes: los depósitos de combustible, de aleación ligera, iban revestidos de varias capas de goma, vulcanizada y no vulcanizada, alternas. De esta forma, al ser perforados por proyectiles de pequeño calibre, el combustible que escapaba por el orificio causaba una reacción en la goma no vulcanizada, haciendo que el revestimiento se hinchara, tapando el orificio. Esto salvó a muchos bombarderos alemanes de convertirse en antorchas volantes, como ocurrió en el Frente del Pacífico con los aviones japoneses, que sacrificaban la seguridad de sus pilotos y capacidad de supervivencia del aparato, ante la velocidad y la maniobrabilidad.

Para contrarrestar el efecto de los depósitos autosellantes se dotó a los cazas del cañón Hispano de 20 mm. Cuando producía un agujero en el depósito auto-sellante, este era tan grande que el efecto de la goma no era suficiente para taponarlo. Sin embargo, los pilotos no estuvieron satisfechos del todo con

la instalación de este cañón en los primeros Spitfire: reducía su armamento de ametralladoras a solo 4, a cambio de dos cañones con un limitadísimo número de cartuchos por arma, solo 60

En la actualidad no solo se está utilizando en fuerzas aéreas sino también en vehículos terrestres. Un ejemplo lo encontramos en la empresa General Dinamycs que ha instalado depósitos autosellantes en su vehículo blindado 8x8 LAV 700.

Figura 4. LAV 700 8X8 BLINDADO.
Fuente: defensa.com.

La utilización de balas perforantes exige grandes espesores en las paredes de los depósitos, aunque estos sean blindados, con el consiguiente aumento de peso. Esto queda demostrado en pruebas realizadas en el INTA con un proyectil multipropósito DEFA 30 mm con una velocidad de impacto de 800 m/ s requería para su protección de un espesor mínimo de 53,8 mm de acero balístico SECURE 400.

A.2. Material autosellante

La continua investigación de nuevos materiales ha permitido obtener una mayor efectividad con un menor peso. Se ha pasado de utilizar en aviones japoneses Ki-61-I-Tei Hien materiales autosellantes de 164 kg/m^2 a 17 kg/m^2 en nuestros depósitos con Pyrotect.

Los materiales utilizados son muy variados, siendo algunos de ellos espuma poliéster antiestático de célula abierta a las que suelen añadirse fibras de aramida.

A.3. Depósitos autosellantes y antiexplosión

La constante mejora de nuestras Fuerzas Armadas y su participación en misiones de paz en el exterior implica la posibilidad de necesitar mayor seguridad para no sufrir ataques, con lo que se hace necesario la búsqueda de soluciones que ofrezcan mayor grado de protección a las tropas y vehículos.

La autonomía de un vehículo depende de la cantidad de combustible que pueda conservar y almacenar. La utilización de munición perforante e incendiaria disponible en la actualidad puede atravesar grandes espesores de acero blindado y hacerlos explotar bien por la bala incendiaria o por el incendio del combustible derramado.

Explostop Protection SL cuenta con una larga experiencia de su personal en aportar soluciones, de hecho, ha realizado en el INTA en el año 2009 y 2017 pruebas donde se aportan tecnologías que mejoran la seguridad de los depósitos de combustibles sometidos a fuego intenso y proyectiles.

Como ampliación a lo anterior se han realizado pruebas oficiales entre los días 8 al 10 de mayo del 2017 en el Campus La Marañosa del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) que pusieron de manifiesto un aumento de seguridad de la tecnología de protección de depósitos de combustible.

Explostop Protección comercializa dos productos destinados a incrementar la seguridad de los depósitos de combustible empleados en vehículos militares, cisternas o embarcaciones marítimas, tanto para combustible diésel como para gasolina.

La utilización combinada de dos tecnologías: Pyrotect (un recubrimiento exterior autosellante que se cierra al paso de determinados proyectiles) y ExploStop, mediante el llenado del depósito a base de pequeñas esferas metálicas porosas de una aleación especialmente diseñada para mejorar la seguridad contra explosiones e incendios en depósitos cerrados de combustibles, han permitido poder garantizar la no explosión del depósito.

Estas tecnologías reaccionan físicamente y se pueden aplicar sobre depósitos de combustible de aluminio, acero normal, e incluso acero blindado.

A.4. Pruebas oficiales realizadas en el INTA en 2017

A.4.1. Localización de las pruebas, organismo y norma aplicada

Las pruebas tuvieron lugar en la plaza de ensayos del Área de Modelado y Simulación en el Campus La Marañosa, Comunidad de Madrid.

Figura 5. Campus de la Marañosa.

Las pruebas corrieron a cargo del Departamento de Sistemas de Armas y Balística de la Subdirección General de Sistemas Terrestres del INTA. Se siguió la normativa OTAN, concretamente el STANAG 4241 Ed. 2 *Bullet Impact, munition test procedure*. También se aplicó el procedimiento interno del INTA relativo al impacto de bala sobre municiones, ajustado a las características del ensayo. En las pruebas se obtuvo la clasificación Tipo IV según AOP-39 Ed. 3 de fecha 3/2010 origen OTAN *Guidance on the development assessment and testing of intensive munition* (MURAT).

A.4.2. Características de los productos

A.4.2.1. PYROTEC

Es una combinación de tejidos y polímeros que se autosellan al paso de proyectiles. El espesor de recubrimiento es de 2 cm.

A.4.2.2. EXPLOSTOP®

Ha sido utilizado en su forma esférica procedente de la elaboración de una lámina de una aleación especial fabricada en España por Aludium Transformación de Productos SL – Alicante.

El análisis de diferentes parámetros se muestra a continuación en la siguiente tabla

CARACTERÍSTICAS ESFERAS EXPLOSTOP	
Peso de bolas en volumen de un litro	45 g ± 1 g
Tamaño medio bolas	30 mm ± 5 mm
Volumen bolas en un litro tanto en gasolina como en gasoil	20 cc (2 % ± 0,5 %)
Volumen retención de gasolina por litro	35 cc (3,5 %±0,5 %)
Volumen retención de gasoil de bolas por litro	45 cc (4,5 % ± 0,5 %)

Tabla 4: características de las esferas de ExploStop®

Figura 6. Explostop en Esferas.

Figura 7. Solo ocupa el 2 % de volumen.

A.4.3. *Depósitos utilizados*

Se utilizaron dos tipos de depósitos de combustible. Uno de aluminio lleno de esferas de ExploStop y recubrimiento autosellante exterior Pyrotect, y otro un depósito de acero con blindaje Mars 240 y un espesor de 4,2 mm, rellenado con esferas ExploStop. Ambos depósitos disponían de una capacidad de 18,5 litros de combustible y se llenaron a un tercio de su capacidad con gasoil y gasolina 98.

Figura 8. Depósito autosellante.

Figura 9. Depósito blindado.

A.4.4. Equipos de medición

Los equipos para registrar correctamente los datos fueron cámaras de vídeo de alta velocidad, cámaras de vídeo y radar para calcular la velocidad tanto de salida como de impacto del proyectil.

A.4.5. Munición

Se empleó un arma de laboratorio con municiones de 7,62 x 51 mm. ordinaria y perforante, munición rusa 7,62 x 39 mm. perforante e incendiaria y 5,56 x 45 semiperforante, munición habitualmente utilizada en zonas de riesgo. Se realizaron dos disparos desde 25 metros a cada depósito de aluminio, uno en la zona líquida donde estaba el combustible y otro en la zona de los gases, mientras que a los depósitos de acero blindado se les hizo un único disparo en la zona de gases.

Figura 10. Bala incendiaria 7,62.

Figura 11. Bala perforante 7,62.

Figura 12. Bala semiperforante 5,56 x 45 mm.

A.4.6. Valoración de los resultados

Las pruebas resultaron muy satisfactorias en todos los depósitos protegidos con Explostop donde ninguno explotó ni se incendió tal y como muestran las siguientes instantáneas.

A.4.6.1. Disparo con 7,62 perforante-incendiaria en zona gaseosa

Figura 13. Antes de entrar la bala.

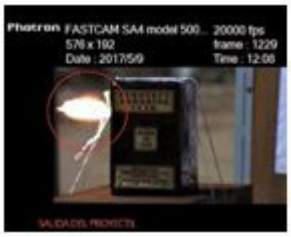


Figura 14. Después de salir la bala.

A.4.6.2. Disparo con 7,62 perforante en zona líquida

Figura 15. Antes de entrar la bala.

Figura 16. Salida de la bala con fragmentos.

A.4.6.3. Disparo a depósito blindado con 7,62 ordinaria

Figura 17. Entrada de la bala.

Figura 18. Salida de la bala.

A.4.6.4. PYROTECT - autosellado

En relación al autosellado de Pyrotect debemos señalar que en todas las entradas no se produjo ningún derrame, registrándose solo pérdidas mínimas de combustible en las salidas entre 0,116 a 0,1 mililitros/segundo en dos de los ensayos, concretamente en los que se había empleado la munición 7,62 perforante, mientras que en las salidas de la bala incendiaria 7,62 y 5,56 se cerraron.

Figura 19. Pérdidas de 0,116 ml/s, inapreciables a simple vista, solo a la salida del proyectil 7,62 perforante.

Figura 20. Sellado total a la salida y entrada del proyectil 5,56 mm.

A.5. Ventajas del autosellado frente al blindaje

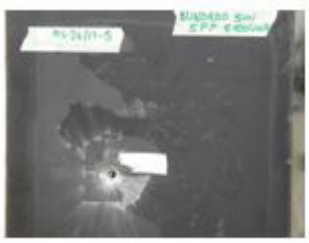


Figura 21. Depósito blindado perforado.

Los resultados obtenidos tanto en depósitos blindados como autosellantes nos permiten valorar mejor la conveniencia de su utilización.

Pruebas realizadas en nuestros laboratorios han evaluado el único orificio generado por una bala ordinaria en un depósito de acero blindado, evacua por el mismo, con el depósito totalmente lleno, una media de 40 ml/sg , es decir que un depósito de combustible totalmente lleno de 130 litros, tardaría en vaciarse 54 minutos, frente al caso más desfavorable de los 4 ensayos con deposito autosellante en donde sus pérdidas son de 0,116 ml/sg, es decir que se vaciaría en 13 días aproximadamente. En otro ensayo con depósito blindado, se disparó con bala perforante originando dos orificios con lo cual el tiempo de vaciado se reduciría a menos de la mitad porque lo orificios de salida suelen ser mayor que el de la entrada: esto es, se vaciaría en menos de 27 minutos.

A.6. Uso actual

En la actualidad Explostop Protection está suministrando producto en esferas a UROVESA desde el 2012 hasta la fecha para la protección de los depósitos de 762 unidades VAMTAC ST5

Su uso desde el 2012, en más de 500 unidades VAMTAC ST5, no ha generado ningún problema en el correcto funcionamiento de los vehículos, como queda acreditado en un documento 3-417 emitido por la Sección de Plataformas Terrestres de la Subdirección de Sistemas de Armas, Dirección de Adquisiciones del Ejército de Tierra.

Figura 22. VAMTAC ST5.

Figura 23. Depósito protegido con ExploStop.

En el 2017 se han protegido 16 embarcaciones marítimas para la Royal Navy de Arabía Saudita.

A.7. Conclusión

La exposición de depósitos de combustible en vehículos blindados frente a la munición existente no asegura totalmente que cierta munición de arma ligera no la atraviese, generando pérdidas importantes de combustible y el riesgo de explosión.

La utilización combinada de ExploStop + Pyrotec asegura la ausencia o las mínimas perdidas de combustible en los depósitos, permitiendo así mayor tiempo de operatividad

B. Depósitos de combustible Pyrobladder-Explostop: depósitos antiderrame - antiexplosivo.

La colisión de un vehículo con otro o con otro objeto: arboles, muros, etc., puede provocar su desestructuración, impidiendo la salida de sus ocupantes, y además puede romperse el depósito de combustible causando derrame, contaminación, y en ciertas circunstancias, incendiarse y posteriormente explosionar.

La estrecha colaboración entre Pyrotect y Explostop Protection ha permitido combinar sus productos más innovadores; Pyrobladder y ExploStop, para ofrecer un depósito antiderrame, deformable sin roturas y antiexplosión que mejora la seguridad de los ocupantes de un vehículo en caso de colisión o vuelco. Los depósitos de combustible Pyrobladder-Explostop están:

- Protegidos contra roturas por medio de Pyrobladder, una bolsa en el interior del depósito que se deforma sin romperse ante un fuerte impacto, evitando el derrame de combustible aunque el depósito externo se haya roto, fisurado o agujereado.
- Protegidos contra explosiones con Explostop.

Pyrotect Safety Equipment de EEUU tiene más de 30 años de experiencia y capacidad en la fabricación de depósitos de combustible para uso en carreras que están aprobados según los estándares FIA FT3 (Federación Internacional de Automovilismo) donde el nivel de exigencia en seguridad es muy elevado, debido al elevado riesgo de colisión.

Los depósitos Pyrobladder además tienen una válvula de ventilación que en caso de vuelco se cierra para evitar derrames de combustible, evitando perdidas de combustible y el riesgo de incendiarse.

Figura 4. Depósito Pyrobladder -ExploStop.

Figura 5. Componentes del Pyrobladder.

Usos

Se pueden usar en todo tipo de vehículos: vehículos (motos, 4x4, blindados, camiones), helicópteros, barcos, motos y lanchas acuáticas, y el transporte de combustible por tierra, mar y aire.

C. Conclusión

Explostop al impedir la explosión de los depósitos, único a la conservación del combustible que ofrece Pyrotec, tanto con sus depósitos autosellantes como los depósitos Pyrobladders deformables antiderrame, ofrecen a nuestras Fuerzas Armadas una mayor seguridad y operatividad para afrontar la presencia internacional de nuestro país en misiones de paz.

Blindajes electromagnéticos: materiales compuestos a base de partículas de magnetita y matrices de caucho de nitrilo butadieno (NBR)

Garzón Posada, Andrés[1-2,*], Landínez Téllez, David[2], Roa-Rojas Jairo[2], Ramos Barrado José[1]

1 Departamento de Física Aplicada I (UNIDAD DE NANOTECNOLOGÍA), Facultad de Ciencias, Campus de Teatinos, Universidad de Málaga, E29071 Málaga, España.

2 Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Grupo de Física de Nuevos Materiales, Universidad Nacional de Colombia, E111321 Bogotá, Colombia.

Email:

* Andrés Orlando Garzón Posada; correo electrónico: aogarzonp@uma.es

Resumen

Este trabajo describe la producción y las propiedades de apantallamiento electromagnético de materiales compuestos basados en matrices de caucho de nitrilo butadieno (NBR) reforzadas con partículas de magnetita (Fe3O4) tanto de origen mineral como sintético (nano-partículas). Este tipo de materiales se utilizan no solo para la fabricación de elementos electrónicos como sensores y transductores, sino especialmente para la producción de materiales absorbentes de radiación electromagnética en aplicaciones de defensa pasiva y construcción civil tales como edificios, vehículos o aviones. Los materiales compuestos con magnetita natural y magnetita sintética se han considerado por separado. En ambos casos se utilizó un molino de caucho para la fabricación de las muestras. Se añadieron refuerzos en diferentes cantidades de 5, 10, 20, 30 y 40 phr. Las propiedades de apantallamiento electromagnético de los compuestos se midieron empleando una cavidad resonante en los rangos de frecuencia de 7,5-12,5 GHz y 18-26,5 GHz. La influencia de la fracción de volumen del relleno, la frecuencia y el espesor del absorbedor en el apantallamiento del ancho de banda se discuten y se correlacionan.

Palabras clave

Materiales compuestos, cavidad resonante, materiales de blindaje electromagnético, banda X, banda K

1. Introducción

La interacción con ondas electromagnéticas es un problema importante para la seguridad de muchos dispositivos electrónicos y también es un problema importante para la seguridad militar y la lucha antiterrorista. La perturbación de las comunicaciones e incluso su interrupción es un objetivo claro de los grupos terroristas que obstaculizaría en gran medida la acción de las fuerzas de seguridad de los estados. Además, está hoy en día ampliamente discutido los riesgos potenciales para la salud humana y los sistemas biológicos asociados con la exposición a campos electromagnéticos [1].

El blindaje de interferencia electromagnético (EMI) se define como la mitigación en la propagación de ondas electromagnéticas de un área a otra mediante el uso de materiales conductores y/o magnéticos. El blindaje puede lograrse reduciendo la señal que pasa a través de un sistema, ya sea por reflexión o por absorción y disipación de la radiación dentro del material [2]. Los parámetros de estos materiales, aparte de las propiedades magnéticas y eléctricas son: operatividad en una amplia banda de frecuencias, elevado coeficiente de absorción, baja reflectividad, bajo peso específico, pequeño espesor, así como las propiedades mecánicas y resistencia ambiental [1,2]. La efectividad de blindaje EMI (SE) se expresa en decibelios (dB) [3]. Una eficacia de blindaje de 30 dB, que corresponde a 99,9 % atenuación de la radiación EMI, es un nivel adecuado para muchas aplicaciones [4].

Los metales pueden ser empleados como materiales EMI debido a que reflejan la radiación electromagnética incidente. Esta protección es conocida hace ya más de dos siglos como el efecto Jaula de Faraday y se basa en la reorganización de las cargas en el interior de un conductor al ser sometido a un campo electromagnético externo ya que se anula el campo eléctrico en el interior del conductor dependiendo de la posición de la fuente [2]. Sin embargo, los metales tienen elevado peso y densidad, alto costo, susceptibilidad a la corrosión y ajuste limitado de la eficacia del blindaje (SE) [5]. Además, los metales reflejan la radiación y no se pueden utilizar en aplicaciones militares de vigilancia y sigilo, donde la absorción de ondas de alta frecuencia, las producidas por dispositivos de localización, es necesaria [6].

Actualmente, las investigaciones se centran en materiales compuestos para EMI con materiales poliméricos reforzados con partículas, nanotubos y fibras [1, 2, 5]. Los polímeros tienen bajo peso, bajo costo, resistencia a la corrosión, fácil procesamiento y buenas propiedades mecánicas. La adición de partículas conductoras pretende la absorción de la radiación a través de las partículas limitando la reflexión total en la superficie del material [2]. No obstante, debe tenerse en cuenta que a medida que se aumenta la concentración del refuerzo tanto el peso como el costo y la complejidad del procesamiento también aumentan. Además, es clave para el material de refuerzo tener una adecuada relación de aspecto, homogeneidad en su dispersión y elevada conductividad, para así obtener valores aceptables de efectividad en el blindaje EMI [2].

La magnetita (Fe_3O_4) debido a sus excelentes propiedades magnéticas y dieléctricas [1,7] es uno de los mejores materiales magnéticos para reforzar compuestos empleados en EMI. La abundancia en la naturaleza, el bajo costo y sus propiedades hacen de esta ferrita un material de refuerzo en matrices poliméricas. Artificialmente, es posible obtener este tipo de óxido de hierro a través de rutas de síntesis química

como los métodos sol gel y de precipitación, y obtener partículas de magnetita de tamaño nano-métrico [8]. Por lo tanto, al emplear la magnetita como material particulado de refuerzo en una matriz polimérica se le puede conceder al compuesto las buenas propiedades eléctricas y magnéticas de esta, dependiendo de la proporción en que sea agregada a la vez que se conservan la flexibilidad, el bajo costo y las propiedades mecánicas del polímero. El resultado final será un material compuesto apto para ser empleado en una aplicación de blindaje electromagnético.

2. Desarrollo experimental

2.1. Preparación de las muestras

La producción de los materiales compuestos se llevó a cabo empleando un molino de cauchos; a la matriz de caucho nitrilo butadieno (NBR) se le añadió magnetita en diferentes proporciones 5, 10, 20, 30 y 40 phr, considerando por separado la adición de magnetita mineral y sintética. El término phr, (*parts per hundred rubber*), significa partes de cualquier material no elastómero adicionado durante la producción del compuesto por cada cien partes del caucho usado como materia prima, en este caso NBR. Las «partes» pueden traducirse en cualquier unidad de masa siempre y cuando la unidad seleccionada sea usada a lo largo de la formulación y preparación del compuesto final. En todos los casos, el peso final de la mezcla empleada fue de 500 gramos y se siguió siempre la misma secuencia de mezcla entre precursores. Además de la magnetita mineral o sintética, a todas las muestras se les añadió negro de carbono (CB referencia N330) en cantidades constantes (40 phr), con el fin de proporcionar a todos los compuestos características conductoras y mejores propiedades mecánicas.

La muestra S5, contendrá 5 phr de magnetita sintética, mientras que la muestra S10 estará compuesta por 10 phr y así sucesivamente para las muestras S20, S30 y S40. La misma nomenclatura aplica para las muestras reforzadas con magnetita artificial (M5-M40).

Posteriormente al proceso de mezcla en el molino de cauchos, los compuestos siguen una etapa de curado usando una plancha vulcanizadora donde las muestras se calientan hasta 120 ºC durante 5 minutos para mejorar las propiedades mecánicas del material como la dureza y su resistencia frente a la degradación causada por efectos ambientales. Durante esta parte de la producción los materiales compuestos son moldeados de acuerdo a la geometría requerida para la caracterización.

2.2 Medidas

Las medidas de blindaje electromagnético de los materiales compuestos se tomaron en el rango de 7,5 - 12,5 GHz y en el rango de 18 – 26,5 GHz empleando el método de cavidad resonante, para ello se empleó el analizador vectorial de redes N5242A PNA-X perteneciente al grupo de investigación en nano-electrónica de la Universidad de Granada. Este equipo permite realizar mediciones en un rango continuo de frecuencias de 10MHz a 26,5GHz con una resolución de 1Hz. La cavidad resonante fue fabricada en cobre, de geometría cilíndrica, con un radio interior de 15 mm, radio exterior de 20 mm y una altura de 40 mm. Para las medidas de blindaje electromagnético las muestras se fabricaron con geometría cilíndrica de 30 mm de diámetro con espesores de 35 mm y 26 mm respectivamente.

3. Resultados y discusión

Cuando una onda electromagnética colisiona con un material cuya impedancia es diferente a la del medio donde se venía propagando, se crean dos tipos de ondas en la superficie del material: la onda reflejada y la transmitida. La onda incidente que logra penetrar se propaga por el material y su amplitud decrece exponencialmente debido a la absorción del medio. La energía absorbida se disipa en forma de calor. Cuando la onda logra llegar a la segunda superficie del material una parte será transmitida hacia el medio circundante y otra reflejada nuevamente hacia el interior [3], figura 1.

Existen tres mecanismos de blindaje electromagnético según la atenuación de la interferencia electromagnética se lleve a cabo: la reflexión (R), la absorción (A) y las reflexiones múltiples (B) [2,3]. El mecanismo de atenuación de los materiales conductores, como los metales, es la reflexión. En la reflexión (R) los portadores de carga, como los electrones del material de refuerzo, transportan las corrientes eléctricas inducidas por la radiación y las disipan en el interior del material en forma de calor debido a la alta resistividad de las matrices poliméricas. La conducción eléctrica en el material requiere de conectividad del material de refuerzo en la trayectoria de conducción dentro de la matriz [5], aunque esta posición es discutida [4]. En el material de blindaje la absorción (A) se lleva a cabo por la formación de dipolos eléctricos y/o magnéticos en su interior y se ha establecido que está directamente ligada con el espesor del material [2, 3]. Las múltiples reflexiones (B) se refieren a las reflexiones generadas al interior de las interfaces matriz-refuerzo y superficies del material de blindaje.

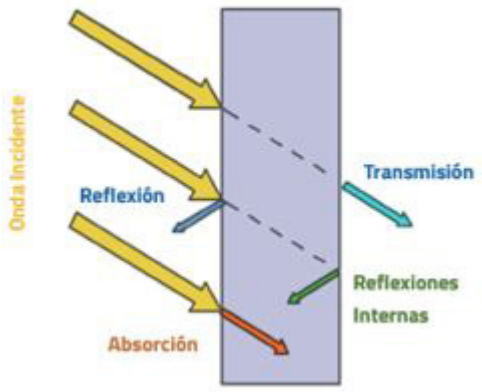


Figura 1. Ondas resultantes en la superficie del material al ser expuesto a un campo electromagnético incidente.

El blindaje electromagnético de un material se define como la capacidad que tiene este para atenuar la propagación de ondas electromagnéticas incidentes, a través de mecanismos de reflexión, absorción y las múltiples reflexiones, figura 1. La efectividad del blindaje *(SE)* de un material es la proporción entre la potencia incidente y transmitida del campo magnético [9, 10] y puede expresarse por la suma de tres contribuciones principales SE_R, SE_A, y SE_{MR}. SE_R se relaciona con las diferencias de impedancias entre la superficie del material y el medio de propagación, SE_A resulta de la energía disipada y atenuada al interior del material y la contribución SE_{MR} se asocia con las múltiples reflexiones entre las superficies del material y que se puede desestimar para efectividades de blindaje mayores a 15dB. La efectividad del blindaje electromagnético *(SE)* se puede escribir como [10]:

$$(dB) + SE_A(dB) + SE_{MR}(dB) = SE_R(dB) + SE_A(dB) \quad 1)$$

Los parámetros de dispersión medidos por el equipo S_{22}, (S_{11}) y S_{12} (S_{21}) se relacionan con los coeficientes de reflexión y transmisión del material al interior de un campo electromagnético incidente y reflexión También se pueden relacionar con los valores de SE_R y SE_A, de la siguiente manera [2, 19]:

$$SE_R(dB) = -10log_{10}(1 - |S_{22}|^2) \quad (2)$$

$$SE_A(dB) = -10log_{10}\left[\frac{|S_{12}|^2}{1-|S_{22}|^2}\right] \quad (3)$$

$$SE = SE_R(dB) + SE_A(dB) = -10log_{10}|S_{12}|^2 \quad (4)$$

Fig. 2 muestra la efectividad del blindaje para los compuestos con magnetita mineral y sintética, y para los espesores de 25 mm-36 mm. En todos los casos el apantallamiento del campo electromagnético es en

promedio inferior a los 22dB para el rango de frecuencias de 7,5-12,5 GHz (Banda X) logrando la máxima atenuación a 10,4 GHz y 10,99 GHz. La muestra S40 con un espesor de 35 mm logra una atenuación de hasta -35,5 dB para 10,4 GHz, pero son en promedio las muestras S20 y M20 en ambos espesores las de mayor mitigación a lo largo de la frecuencia estudiada.

El ancho de banda es definido como la amplitud en la cual la efectividad del blindaje no es inferior a -25dB; en nuestro rango de frecuencias se alcanzan anchos de banda de hasta 1,4 GHz. Las muestras con magnetita mineral y sintética, espesor de 26 mm (figura 2b y 2d) presentan mayores anchos de banda o superiores a los -28 dB. Otro fenómeno, particular de las muestras reforzadas con magnetita sintética para espesores de 26 mm (figura 2b, figura 3a y 3b) es el desplazamiento en frecuencia que tienen los picos de máximo apantallamiento a medida que se aumenta el contenido de refuerzo.

La muestra S40, espesor de 26 mm, presenta un corrimiento de 150 MHz respecto a la muestra S40 con un espesor de 35 mm en el pico de máxima atenuación aproximadamente a 10,5 GHz y 10,4 GHz, respectivamente. La muestra S30, presenta un desplazamiento de 30 MHz respecto a los espesores de 35 y 26 mm para el pico de máximo apantallamiento.

El corrimiento hacia frecuencias más elevadas de las muestras S30 Y S40 es debido a las características del material (conductividad, permitividad y permeabilidad) y con la longitud de onda cuando el espesor *(d)* del material satisface la ecuación:

$$d = \frac{n}{4}\lambda\ (n = 1{,}3{,}5{,}\ldots\ldots) \qquad (5)$$

haciendo que las ondas electromagnéticas incidentes y reflejadas se encuentren fuera de fase resultando en una reflexión mínima del material [11]. Al incrementar el espesor del material de blindaje la longitud de onda puede aumentar haciendo que la frecuencia de atenuación máxima se mueva hacia frecuencias un poco más bajas (figura 3), este comportamiento coincide con los hallados por Vinayasree *et al*. [12].

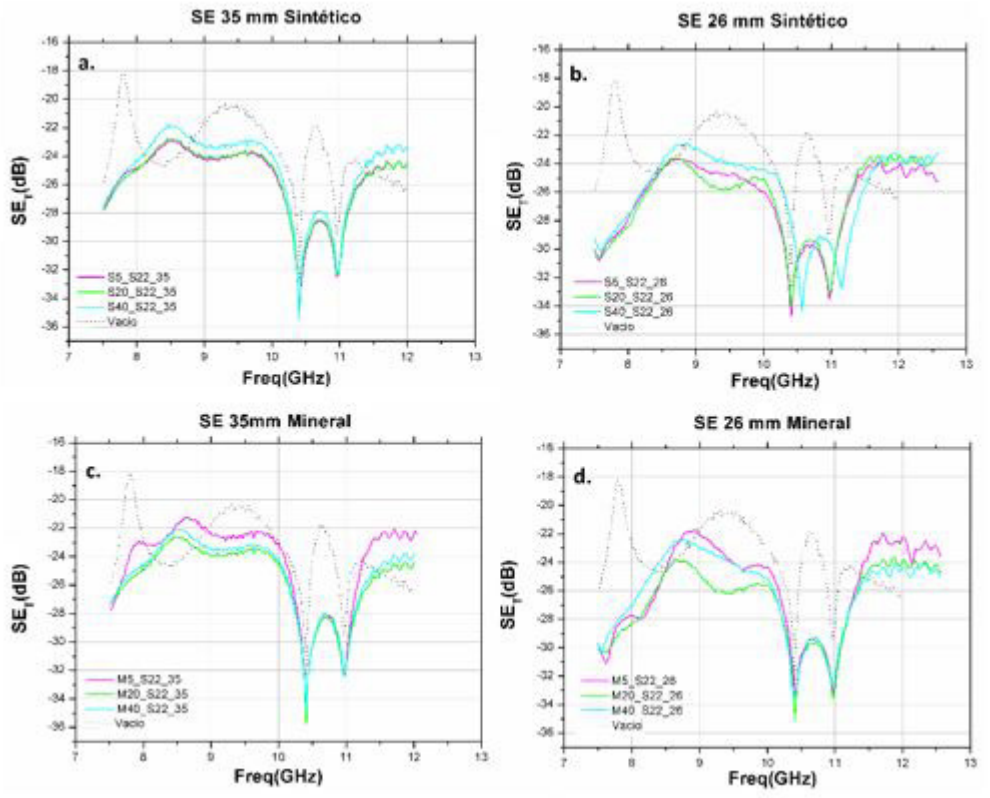


Figura 2. Efectividad del blindaje electromagnético de las muestras S5, S20, S40, M5, M20, M30 y M40 con espesores de 35 y 26 mm para el rango de frecuencias de 7,5-12,5 GHz.

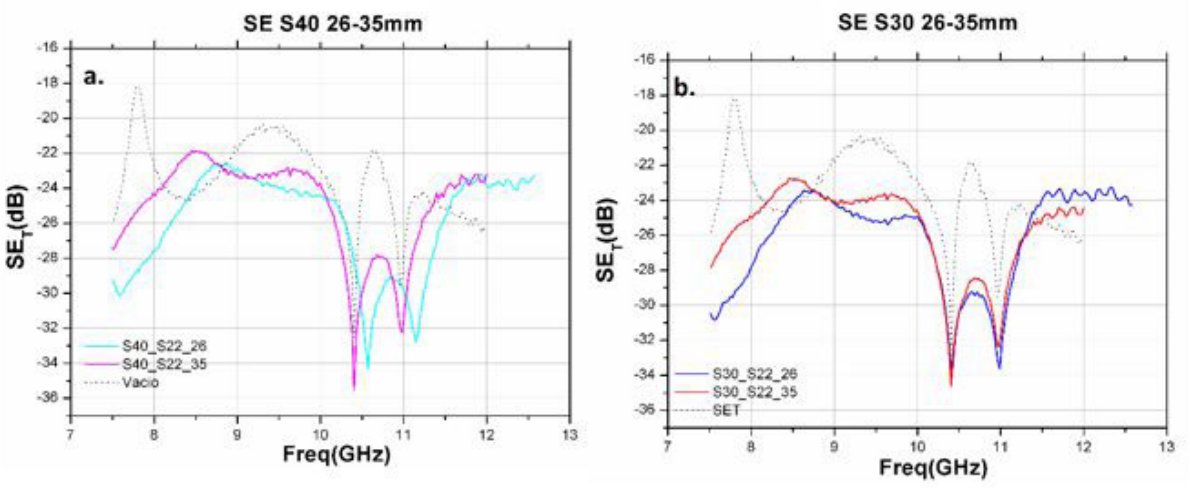


Figura 3. Desplazamiento en la frecuencia de las muestras S40 y S30 para espesores de 26 mm, respecto a las mismas muestras con espesores de 35 mm.

En la figura 4 se observa la efectividad del blindaje debido a la reflexión (SE_R) y la absorción (SE_A) para las muestras S30 y S40; se puede evidenciar que para la región de 10-11 GHz el principal aporte del blindaje es por absorción mientras que la reflexión es mínima. A menores frecuencias el mecanismo predominante en el blindaje es la reflexión. La máxima atenuación por absorción SE_A y, en general, la mejor efectividad del blindaje (*SE),* es propia de la muestra S2O y se debe a la conformación conjunta y equilibrada de aglomerados de negro de carbono que le confiere las principales propiedades conductoras, junto con aglomerados de magnetita que proporcionan los dipolos magnéticos favoreciendo así el blindaje por absorción. Para contenidos superiores de magnetita, el mayor volumen de los aglomerados formados va en detrimento de las propiedades conductoras de las muestras.

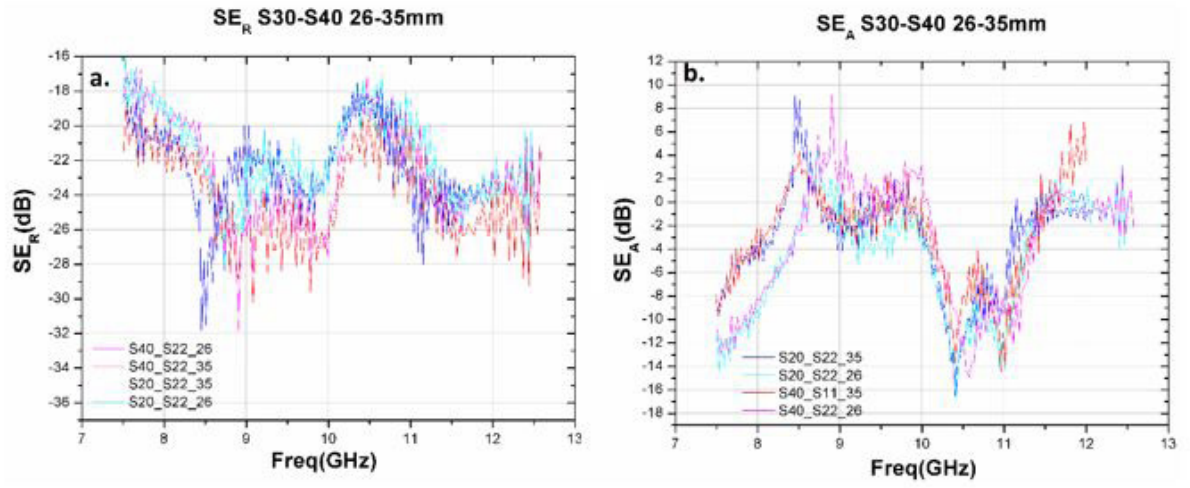


Figura 4. Efectividad del blindaje debido a la reflexión (SER) y la absorción (SEA), para las muestras S30 y S40.

Todas las muestras fueron evaluadas en los rangos de frecuencia mas altos que van desde los 18 GHz hasta los 26,5 GHz, valores que incluyen la banda K. La figura 5 muestra la efectividad del blindaje en función de la frecuencia para las muestras M20, S20, M40 y S40 en los espesores de 26 y 35 mm.

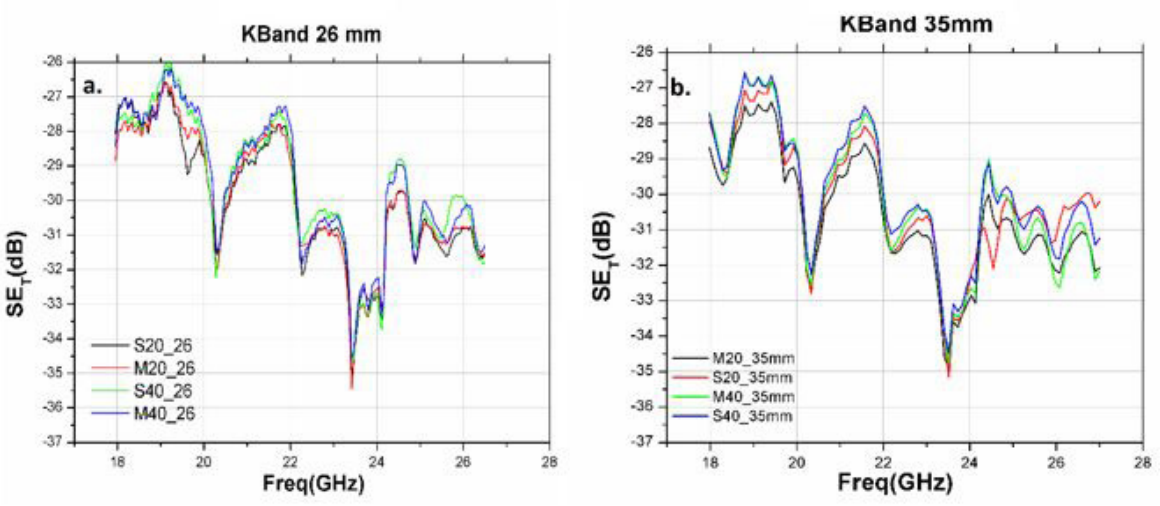


Figura 5. Efectividad del blindaje para la banda de frecuencias de 18 GHz-26,5 GHz para las muestras M20, M40, S20 y S40 para espesores de a) 26 mm y b) 35 mm.

Las muestras evaluadas en el rango de frecuencias 18 GHz-26,5 GHz presentan anchos de banda para atenuaciones inferiores a -32 dB de hasta 1,4 GHz para las muestras con un espesor de 26 mm y 800 MHz para las muestras con un espesor de 35 mm y, en términos generales, durante todo el rango de frecuencias todas las muestras tuvieron atenuaciones por debajo de los -26 dB. Una atenuación de -30 dB corresponde una atenuación del 99,9 % de la potencia incidente [3, 6, 7]. Comparativamente los picos de máxima atenuación (23,5 GHz) son logrados por la muestra S20 con una diferencia promedio del de 2 % respecto a las muestras M20, S40 y M40, de la misma manera que se presentó en el rango de frecuencias anterior las muestras cuyo contenido es 20 phr de magnetita presentan mejor atenuación a lo largo del intervalo.

4. Conclusiones

Los materiales de matriz NBR reforzados con magnetita mineral y sintética se llevó a cabo empleando un molino de cauchos. Todas las muestras evidencian atenuaciones para la banda X inferiores a 21 dB y para la banda K inferiores a -26 dB. Los anchos de banda para atenuaciones superiores a -28 dB en el rango de 10 GHz-11 GHz logran un valor cercano a 1 GHz, para las muestras cuyo espesor es de 26 mm, lo que significa que el material fabricado con ese espesor puede atenuar por encima del 90 % del campo irradiado. En la banda de frecuencias K se encontró anchos de banda de hasta 1,4 GHz con apantallamientos inferiores a -32 dB.

Las muestras con picos de mayor atenuación para las dos bandas de frecuencia estudiadas son las 40 phr y 20 phr de magnetita independientemente de su naturaleza, pero son las muestras M20 y S20 las que presentan atenuaciones en promedio mas bajas a lo largo de los rangos de frecuencias. La principal diferencia de blindaje electromagnético entre los materiales reforzados con los diferentes tipos de magnetita se encuentra en las muestras con espesores de 26 mm, en los cuales se evidencia un desplazamiento de las máximas atenuaciones en la banda X para los materiales reforzados con magnetita sintética.

El principal mecanismo de blindaje electromagnético en las zonas de máxima atenuación es la absorción sustentada en los dipolos magnéticos propios del refuerzo, mientras que para el resto de frecuencias es principalmente la reflexión debida a las partículas de negro de carbono presentes en la matriz.

El estudio demuestra que es posible modular las frecuencias de máxima atenuación del material variando el espesor de las muestras, la naturaleza del refuerzo y finalmente variando el contenido de este en el interior de la matriz ya que los desplazamientos empiezan con las muestras con contenidos de 20 phr de magnetita sintética hasta hacerse más evidentes en los compuestos con contenidos de 40 phr.

Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo por medio de la colaboración mancomunada del Laboratorio de Materiales y Superficies (Unidad de Nanotecnología) de la Universidad de Málaga, España y del grupo de investigación de Nuevos Materiales, de la Universidad Nacional de Colombia.

Referencias

1. *Kong I, Hj Ahmad S, Hj Abdullah M, Hui D, Nazlim Yusoff A, Puryanti D. Magnetic and microwave absorbing properties of magnetite–thermoplastic natural rubber nanocomposites. J. Magn. Magn. Mater. 2010;322 (21):3401-9.*
2. *Thomassin J-M, Jérôme C, Pardoen T, Bailly C, Huynen I, Detrembleur C. Polymer/carbon-based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials. Mat. Sci. Eng .R:. 2013;74(7):211-232.*
3. *Al-Saleh, M. H. & Sundararaj, U. Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites. Carbon 2009; 47(7): 1738–1746.*
4. *Yang, S., Lozano, K., Lomeli, A., Foltz, H. D. & Jones, R. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites. Composites Part A: Appl. Sci. Manufac. 2005; 36(5):691–697.*
5. *Geetha, S., Satheesh Kumar, K.K., Rao, C.R.K., Vijayan, M., and Trivedi, D.C. EMI shielding: Methods and materials. A review. J. Appl. Polym. Sci. 2009; 112(2):2073–2086.*
6. *Huang, Y., Li, N., Ma, Y., Du, F., Li, F., He, X., Lin, X., Gao, H., and Chen, Y. The influence of single-walled carbon nanotube structure on the electromagnetic interference shielding efficiency of its epoxy composites. Carbon 2007;45(6):1614–1621.*
7. *Bayat, M., Yang, H., Ko, F.K., Michelson, D., and Mei, A. (2014). Electromagnetic javascript:void(0) interference shielding effectiveness of hybrid multifunctional Fe3O4/carbon nanofiber composite. Polymer 2007; 55(2):936–943.*
8. *Xu J, Yang H, Fu W, Du K, Sui Y, Chen J, et al. Preparation and magnetic properties of magnetite nanoparticles by sol–gel method. J. Magn. Magn. Mater. 2007;309(2):307-11.*
9. *Al-Saleh, M. H., Gelves, G. A. & Sundararaj, U. Carbon nanofiber/polyethylene nanocomposite: Processing behavior, microstructure and electrical properties. Mater& Design 2013;52(12): 128–133.*
10. *Ohlan, A., Singh, K., Chandra, A. & Dhawan, S. K. Microwave absorption properties of conducting polymer composite with barium ferrite nanoparticles in 12.4–18GHz. Appl Phys. Lett. 2008; 93: 053114.*
11. *Zhai, Y., Zhang, Y. & Ren, W. Electromagnetic characteristic and microwave absorbing performance of different carbon-based hydrogenated acrylonitrile–butadiene rubber composites. Mater. Chem. Phys. 2012; 133(1):176–181.*
12. *Vinayasree S, Soloman M, Sunny V, Mohanan P, Kurian P, Anantharaan M. A microwave absorber based on strontium ferrite–carbon black–nitrile rubber for S and X-band applications. Comp. Sci. Tech., 2013;82(6):69-75.*

Mejora de las propiedades caloportadoras de lubricantes de uso militar basados en siliconas, mediante la adición de nanopartículas de grafeno

Igartua Aranzabal, Amaya[1,*], Hernaiz Miguel, Marta[1] Cerrillo Redondo, Cristina[1] y Alberdi Aguirrebeña, Alberto[1]

[1] IK4-TEKNIKER, c/ Iñaki Goenaga, 5, 20600. Eibar, Guipúzcoa, España.

* amaya.igartua@tekniker.es

Resumen

Los fluidos basados en silicona se vienen usando desde hace ya cierto tiempo en numerosas aplicaciones militares, tanto en plataformas aéreas, como navales o terrestres. Frente a los lubricanes basados en hidrocarburos, las siliconas presentan una superior resistencia a la degradación por temperatura. Además, convenientemente aditivados con partículas de bisulfuro de molibdeno, se emplean profusamente en sistemas mecánicos que trabajan bajo condiciones de lubricación límite.

En el presente trabajo se exploran las aptitudes de los lubricantes basados en siliconas como lubricantes con propiedades caloportadoras, buscando la mayor eficiencia posible en la evacuación del calor a través del propio lubricante. Para ello, se ha estudiado las propiedades de conductividad térmica de un fluido base silicona con aditivaciones de diferentes contenidos de nanopartículas de óxidos de aluminio y titanio, o de grafeno. Estas últimas resultaron ser las más eficaces, mejorando, por ejemplo, hasta un 20 % la conductividad térmica con la presencia de un 2 % de grafeno en el fluido. También el coeficiente de transferencia del calor por convección, de gran importancia en las propiedades caloportadoras de un fluido, se incrementa en un 70 % con tan solo 0,5 % de grafeno. El poder lubricante de los fluidos de silicona también se intensifica con la adición de nanopartículas de grafeno, de modo que con adiciones del 0,5 % de grafeno se reduce tanto el coeficiente de fricción como la velocidad de desgaste en torno al 20-30 %.

Palabras clave

Fluidos caloportadores de silicona, nanopartículas, grafeno.

1. Introducción

1.1. Propiedades de los fluidos de silicona y su uso en aplicaciones para defensa y seguridad

Por lo general, el término «siliconas» se refiere a compuestos oligoméricos o poliméricos de silicio, en los que los átomos de silicio están unidos entre sí a través de átomos de oxígeno, de modo que la columna vertebral de estas moléculas está constituida por enlaces Si-O-Si alternados. La figura 1-a muestra la forma general de las moléculas de aceite de silicona, donde R puede corresponder a H, OH, CH_3 u otros radicales orgánicos [1]. Un compuesto típico de esta familia es el polidimetilsiloxano o PDMS (figura 1-b).

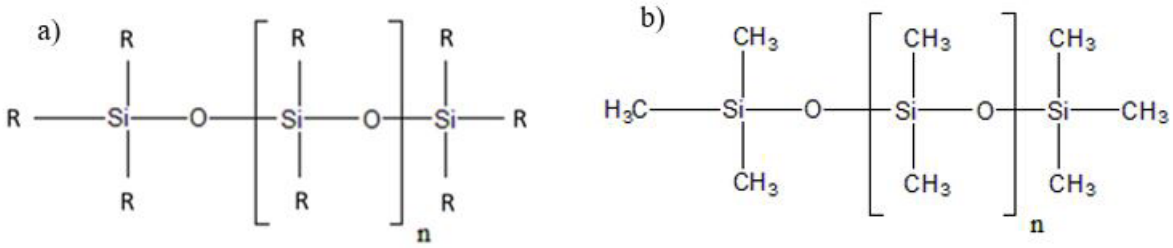


Figura 1. a) Forma general de las moléculas de los fluidos de silicona. b) Molécula de polidimetilsiloxano (PDMS).

Los fluidos de silicona son extremadamente estables frente a la oxidación térmica. Por ejemplo, el polidimetilsiloxano se mantiene prácticamente inalterado cuando se expone a temperaturas de hasta 150°C en el aire. Otro fluido de la serie, el polimetilfenilsiloxano (PMFS) presenta una resistencia al calor aún mejor que el PDMS y se puede utilizar durante largos periodos de tiempo en entornos que alcanzan los 250°C [2].

Los fluidos de silicona se pueden sintetizar en una amplia gama de viscosidades. Por ejemplo, en el caso del PDMS, se fabrican variantes con viscosidades entre 0,65 y 1.000.000 mm^2/s. Por otro lado, los polisiloxanos muestran pocas variaciones en la viscosidad debido a los cambios de temperatura. Además de los productos de baja viscosidad (10 mm^2/s o menos), el PDMS ofrece la ventaja de tener un menor cambio de viscosidad en función de la temperatura que los aceites minerales y sintéticos de base carbono.

Por lo tanto, los fluidos de silicona son ideales para su uso como fluidos amortiguadores en una amplia gama de aplicaciones militares e industriales, para amortiguar la vibración y el par. Pueden utilizarse en los entornos más extremos de alta o baja temperatura y alta presión, donde se producen elevadas tasas de vibración y pulsación. Los fluidos amortiguadores de silicona se utilizan en manómetros, instrumentos de presión, amortiguadores de pulsaciones, instrumentos de nivel, actuadores electrohidráulicos, caudalímetros, termostatos, instrumentos de aviación, sistemas electrónicos de temporización, instrumentos submarinos, amortiguadores de choque para vehículos de ruedas o cadenas, y un largo etcétera de equi-

pos utilizados en aviones, navíos y vehículos terrestres. Un líquido amortiguador de silicona correctamente seleccionado puede extender significativamente la vida útil del equipo de medida y proporcionar lecturas más precisas [3].

Los fluidos de silicona son casi químicamente inertes y a temperatura ambiente prácticamente no se ven afectados por soluciones acuosas alcalinas de hasta el 10 % de concentración, o soluciones acuosas ácidas de hasta el 30 %. Sin embargo, la viscosidad aumenta y la gelificación puede ocurrir si se introducen incluso trazas de ácidos o álcalis a altas temperaturas. Los líquidos de silicona casi no se ven afectados por la presencia de aluminio, acero inoxidable y la mayoría de los otros metales. Sin embargo, plomo, selenio y teluro pueden causar gelificación.

Los fluidos de silicona tienen muchas propiedades ventajosas para su uso como lubricantes y fluidos hidráulicos. Una aplicación donde los lubricantes basados en siliconas están ya bastante bien estudiados, es en los embragues para vehículos militares terrestres. Además de la viscosidad estable y su resistencia a temperaturas extremas, tanto altas como muy bajas, los fluidos de silicona proporcionan una buena lubricación para las interfaces acero-bronce, acero-aluminio, acero-zinc, madera-madera y para varias combinaciones de plásticos. Sin embargo, adolecen de pobres propiedades de lubricación límite en las interfaces acero-acero. Este problema habitualmente se resuelve mediante la adición de partículas de disulfuro de molibdeno (MoS_2) que aportan la lubricidad necesaria al sistema. Desde hace ya algunos años, el fabricante norteamericano Lone Star Lubricants [4] produce este tipo de lubricantes para uso militar. Concretamente, por ejemplo, el lubricante de referencia LS-68, que consiste en una base de polimetilfenilsiloxano (PMFS) con partículas de disulfuro de molibdeno, cuyos tamaños cumplen la especificación MIL/AMS-M-7866, ofrece un rango de funcionamiento continuo de -50ºC a +230ºC con funcionamiento intermitente por encima de los 300ºC. Este tipo de productos permite resolver una amplia gama de problemas de lubricación. Tienen una excelente resistencia a la oxidación y se pueden utilizar con la mayoría de los materiales, aunque presentan cierta incompatibilidad con algunos cauchos sintéticos, como el SBR [5].

Además de inercia química y poder lubrificante, para muchas aplicaciones militares se requiere que el lubricante posea también buenas propiedades como fluido caloportador, para evacuar el calor que se genera en puntos críticos del sistema. Para ello, es necesario también considerar los parámetros termodinámicos del fluido.

La conductividad térmica del PDMS es inferior a la de los compuestos orgánicos de base carbono (casi la misma que la del benceno y el tolueno) y es aproximadamente el 25 % de la del agua. Aunque la conductividad térmica aumenta con viscosidades más altas, se vuelve casi constante a viscosidades superiores a 100 mm^2/s. La conductividad térmica del polidimetilsiloxano es de 0,10-0,14 W/mºK a viscosidades inferiores a 20 mm^2/s, y de 0,15-0,16 W/mºK a viscosidades superiores a 50 mm^2/s [2].

El calor específico de los fluidos de silicona puede variar un poco con la viscosidad, pero generalmente su valor es en torno a un tercio del calor específico del agua. Son valores comparables a los de los compuestos orgánicos comunes que tienen un calor específico bajo. El calor específico del PDMS es de 1,63-1,97 J/kgºK para viscosidades inferiores a 20 mm^2/s, y de aproximadamente 1,50 J/kgºK para viscosidades superiores a 100 mm^2/s [2].

Un tercer parámetro importante en la caracterización termodinámica de los fluidos caloportadores es su coeficiente de convección, que mide la transferencia de calor entre una superficie y un fluido. El coeficiente de convección no es una propiedad exclusiva del fluido refrigerante, también influyen la velocidad del fluido, su grado de turbulencia, la geometría del contacto y las temperaturas de ambas partes. Sin embargo, es posible determinar la idoneidad de un fluido caloportador realizando medidas comparativas del coeficiente de convección cuando el resto de los parámetros permanece constante.

1.2. Nanopartículas de grafeno como aditivos para lubricantes

El grafeno es un material nanométrico bidimensional, consistente en unas pocas capas de átomos de carbono fuertemente cohesionados mediante enlaces C=C dispuestos en una superficie uniforme, ligera-

mente ondulada, con una estructura semejante a la de un panal de abejas, por su configuración atómica hexagonal. El grafeno tiene increíbles propiedades mecánicas, electrónicas, químicas, magnéticas y ópticas, que lo han convertido en uno de los nanomateriales más estudiados en la actualidad. Aunque para sacar partido a muchas de estas propiedades es necesario obtener grafeno de muy alta calidad, constituido por láminas de grafeno muy finas, cuyo grosor oscila entre 1 y 10 átomos de carbono, también es posible usar grafeno en forma de nanopartículas, también muy finas o con grosores algo mayores [6]. Estas nanopartículas de grafeno se pueden usar como refuerzos en composites de matriz polimérica o como aditivos en fluidos y pinturas, para mejorar todo tipo de propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas [7].

Existe abundante bibliografía sobre el uso de nanopartículas de grafeno para mejorar la conductividad térmica y eléctrica de diversos fluidos [8-9]. En el caso particular de los lubricantes, existen en bibliografía trabajos que demuestran, por ejemplo, que la conductividad térmica de las grasas o las prestaciones antidesgaste de los aceites sintéticos tipo polialfaolefina (PAO) mejoran cuando se les incorporan como aditivos nanopartículas de grafeno [10].

Sobre la base de estos antecedentes, todo parece indicar que los fluidos de silicona podrían también mejorar sus prestaciones como fluidos lubricantes y caloportadores, con la adición de nanopartículas de grafeno.

2. Desarrollo experimental

Para el estudio llevado a cabo, se preparó un fluido de silicona estándar, base polidimetilsiloxano (PDMS) con una viscosidad nominal de 10 mm^2/s, **DOW CORNING Fluid-200**, en el que se dispersaron diferentes porcentajes de nanopartículas de grafeno tipo GP500, fabricadas por la empresa española **Graphene-Tech** [11]. De acuerdo con las especificaciones de este producto, el espesor de las láminas de **grafeno GP500** es de entre 4 y 7 átomos de carbono, el tamaño lateral de las nanopartículas está en el rango entre 45 y 300 nm, su densidad es de 0,2 g/cm^3 y la superficie específica de 450 m^2/g.

Para la preparación de una dispersión estable en el tiempo (figura 2) se empleó una mezcla dispersante de PDMS/éter 1:1, y diferentes opciones de surfactantes. Una vez añadidas las nanopartículas al fluido de silicona, se procedió a la agitación mecánica de la dispersión durante 15 min y posterior agitación en ultrasonidos durante 60 min.

Figura 2. Proceso de dispersión de las nanopartículas en el fluido.

Como materiales de referencia para los distintos ensayos de caracterización se emplearon el fluido de silicona puro, sin nanopartículas. En los ensayos de conductividad térmica se estudiaron también dispersiones de fluido de silicona con diferentes cantidades de nanopartículas de óxido de aluminio (Al_2O_3) y de óxido de titanio (TiO_2). Para la preparación de estas dispersiones de referencia se empleó el mismo protocolo seguido para la preparación de las dispersiones de grafeno.

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades térmicas y reológicas

La Tabla 5 muestra los resultados de las medidas de conductividad térmica, realizadas a temperatura ambiente, sobre las dispersiones de nanopartículas de Al_2O_3 TiO_2 y grafeno, a diferentes concentraciones. Se puede ver que solo las nanopartículas de grafeno tienen un efecto positivo claro sobre la conductividad térmica, con incrementos que van del 5 % para un 0,5 % de nanopartículas en dispersión, hasta un 20 % de mejora en el caso de la muestra con un 2 % de partículas.

Nanopartículas naturaleza	**Nanopartículas concentración**	**Conductividad térmica, k [W/mºK]**	**Variación**
PDMS puro (ref.)	-	0,131	-
Al_2O_3	0,25 %	0,131	-
	1 %	0,132	+0,8 %
	5 %	0,135	+3,0 %
TiO_2	0,25 %	0,132	+0,8 %
	1 %	0,133	+1,5 %
	5 %	0,131	-
Grafeno GP500	0,25 %	0,131	-
	0,5 %	0,137	+4,6 %
	1 %	0,144	+10 %
	2 %	0,158	+20 %

Tabla 5: conductividad térmica del fluido de silicona PDMS con diferentes adiciones de nanopartículas (temperatura ambiente)

Temperatura [ºC]	**Densidad, ρ [kg/m³]**	**Viscosidad dinámica, μ [10⁻³ Pa s]**	**Viscosidad cinemática, ν [10⁻⁶ m²/s]**	**Calor específico, Cp [J/kgºK]**	**Conductividad térmica, k [W/mºK]**	**Coeficiente de convección, h [W/m²ºK]**
40º	917	7,0	7,6	1640	0,129	57
400º	547	0,25	0,46	2260	0,063	205
Variación	-40 %	-96 %	-94 %	+38 %	-51 %	+258 %

Tabla 6: propiedades reológicas y térmicas del fluido de silicona PDMS puro a 40 ºC y 400 ºC

La Tabla 6 compara las propiedades reológicas y térmicas del fluido de silicona utilizado en este estudio, a 40ºC y 400ºC. A alta temperatura se constata un fuerte descenso en la viscosidad: la viscosidad cinemática a 400ºC es un 6 % de la que el mismo fluido tiene a 40ºC. La reducción de la densidad es de un 40 %, aproximadamente la misma proporción en la que se incrementa el calor específico. Esto nos indica que la capacidad térmica volumétrica, que es el producto de ambas magnitudes, y mide la capacidad del fluido para almacenar energía térmica, se mantiene prácticamente constante. A alta temperatura se constata también una importante reducción de la conductividad térmica, en torno al 50 %, y un fuerte incremento del coeficiente de convección, que se multiplica por un factor de 3,6.

La Tabla 7 compara las propiedades reológicas y térmicas del fluido de silicona puro y con un 0,5 % de nanopartículas de grafeno, a 400ºC. Bajo el punto de vista reológico, lo más destacado es el notable incremento de la viscosidad, 51 % para la viscosidad dinámica y 64 % para la cinemática. La viscosidad es un parámetro que da cuenta de la fricción interna entre los microconstituyentes del fluido en movimiento, y pare lógico que la presencia de las nanopartículas incremente tal fricción interna. La densidad disminuye un 8 %, pero esto también es lógico, si tenemos en cuenta que la densidad de las partículas a temperatura ambiente es de 200 kg/m^3, y no variará mucho a 400ºC, ya que la densidad de los sólidos es mucho menos sensible a la temperatura que la de líquidos o gases.

Muestra	Densidad, ρ [kg/m^3]	Viscosidad dinámica, μ [10^{-3} Pa s]	Viscosidad cinemática, ν [10^{-6} m^2/s]	Calor específico, Cp [J/kg^{o}K]	Conductividad térmica, k [W/m^{o}K]	Coeficiente de convección, h [W/m^{2o}K]
PDMS puro (ref.)	547	0,25	0,46	2260	0,063	205
PDMS + 0,5 % Grafeno GP500	504	0,38	0,75	1950	0,068	349
Variación	-8 %	+51 %	+64 %	-14 %	+7 %	+70 %

Tabla 7: propiedades reológicas y térmicas del fluido de silicona PDMS puro y con un 0,5 % de nanopartículas de grafeno, a 400ºC

En cuanto a las propiedades térmicas, lo más destacable es el notable incremento que se produce en el coeficiente de convección, un 70 % con tan solo un 0,5 % de grafeno añadido. La conductividad térmica también mejora con la presencia de las nanopartículas de grafeno, incrementándose en un 7 % a 400ºC, aproximadamente el mismo orden de magnitud que incrementaba a temperatura ambiente (+4,6 % en Tabla 5). Por el contrario, el calor específico disminuye un 14 %, y como consecuencia, también la capacidad térmica volumétrica, lo que nos indica que, al añadir las nanopartículas, la capacidad del fluido para almacenar energía térmica disminuye en un 20 %, de 1,24 MJ/m^{3}ºK a 0,98 MJ/m^{3}ºK.

3.2 Propiedades tribológicas

La caracterización del comportamiento como lubricante del PDMS aditivado con nanopartículas de grafeno, se realizó mediante ensayos de fricción y desgaste en configuración bola sobre disco, con movimiento recíproco, en una máquina de ensayos tribológicos tipo SRV (figura 2). Como probetas de ensayo se emplearon bolas de alúmina de 10 mm de diámetro y discos de acero inoxidable AISI 304. Las pruebas se realizaron a dos niveles de caga, de 10 N y 50 N, respectivamente, a una velocidad de oscilación de 150 mm/s. La temperatura del sistema se mantuvo siempre por debajo de 100ºC.

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos para el coeficiente de fricción medio a lo largo del ensayo, y el volumen desgastado por unidad de longitud deslizada, en 5 minutos de ensayo. Para ambos niveles de carga, los ensayos lubricados con la dispersión de nanopartículas de grafeno en PDMS mostraron coeficientes de fricción y velocidades de desgaste del orden de 25-30 % inferiores a los lubricados con PDMS puro. Además, atendiendo a la dispersión de resultados, vemos que el coeficiente de fricción se mantenía siempre más estable con el lubricante con grafeno.

Figura 3. Máquina de ensayos tribológicos SRV y configuración del contacto bola sobre disco.

Lubricante	Carga: 10 N		Carga: 50 N	
	Coeficiente de fricción	**Desgaste [µm³/mm]**	**Coeficiente de fricción**	**Desgaste [µm³/mm]**
PDMS puro (ref.)	0,50 ± 0,07	44 ± 5	0,45 ± 0,01	2.130 ± 30
PDMS + 0,5 % Grafeno GP500	0,36 ± 0,04	30 ± 8	0,34 ± 0,01	1.600 ± 20
Variación	-28 %	-31 %	-26 %	-25 %

Tabla 8: coeficientes de fricción y velocidades de desgaste medidas en ensayos bola sobre disco con movimiento recíproco, lubricados con fluido de silicona PDMS puro y con un 0,5 % de nanopartículas de grafeno

4. Conclusiones

Se han estudiado las propiedades lubricantes y caloportadoras de los fluidos de silicona. Además de las buenas propiedades, ya conocidas, de inercia química y alta resistencia a la degradación por temperatura, se han demostrado las mejoras que se consiguen en sus propiedades lubricantes y caloportadoras al adicionar nanopartículas de grafeno en muestras de polidimetilsiloxano (PDMS) con una viscosidad nominal de 10 mm²/s. Por ejemplo, se consiguen incrementos de hasta un 20 % la conductividad térmica con la presencia de un 2 % de grafeno en el fluido. También el coeficiente de transferencia del calor por convección, de gran importancia en las propiedades caloportadoras de un fluido, se incrementa en un 70 % con tan solo 0,5 % de grafeno. Otros tipos de nanopartículas, como óxidos de aluminio y titanio, añadidos al mismo fluido base, no depararon resultados tan prometedores.

El poder lubricante de los fluidos de silicona también se intensifica con la adición de nanopartículas de grafeno, de modo que con adiciones del 0,5 % de grafeno se reduce tanto el coeficiente de fricción como la velocidad de desgaste en torno al 20-30 %.

Agradecimientos

Los autores desean mostrar su agradecimiento a la Unión Europea por la financiación recibida para la realización de este trabajo, a través del proyecto SUSPIRE (http://suspire-h2020.eu/) con referencia H2020-EE-2015-1-PPP-680169.

Referencias

1. *Huber P, Kaiser W. Silicone Fluids: Synthesis, Properties and Applications. Journal of Synthetic Lubrication [Internet] 1986 [cited 2018 Sept. 3] 105-120. Available from: Wiley Online Library.*
2. *Shin-Etsu Silicone. The Unique Properties of Silicones [Internet] Shin-Etsu Chemical Co. Ltd. [cited 2018 Sept. 3]. Available from: https://www.shinetsusilicone-global.com/products/type/oil/*
3. *CLEARCO. Silicone Dumping Fluids [Internet] Clearco Products Co, Inc. [cited 2018 Sept. 3] Available from: http://www.clearcoproducts.com/*
4. *Lone Star Lubricants for Military [Internet] Lone Star Lubricants. Fort Worth, Texas 76117, USA [cited 2018 Sept. 3] Available from: http://www.lonestarlubricants.com/military.html*
5. *Schoeder Z., Sebastian, T. Yost D., Jeyashekar, N. Bramer, J. Watson, D. Silicone Brake Fluid Compatibility with Anti-Lock Braking Systems for Identifying Future Military Brake Fluid Requirements. 2017 NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium. Power & Mobility (P&M) Technical Session. Novi, Michigan, USA. August 8-10, 2017.*
6. *European Defence Agency. Materials CapTech. Workshop on Graphene in Defence. EDA, Bruselas, Bélgica. 23 de mayo de 2018.*

7. *Shahil K M F, Balandin A A. Graphene-Based Nanocomposites as Highly Efficient Thermal Interface Materials. Graphene Based Thermal Interface Materials. 2011*
8. *Hadadian M, Goharshadi E K, Youssefi A, Electrical conductivity, thermal conductivity, and rheological properties of graphene oxide-based nanofluids. Journal of Nanoparticle Research 16(12) DEC 2014, 16:2788. DOI 10.1007/s11051-014-2788-1.*
9. *Ma W, Yang F, Shi J, Wang F, Zhang Z, Wang S. Silicone based nanofluids containing functionalized graphene nanosheets. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 431. AUG (2013) 120-126.*
10. *Hernaiz M, Mendoza G, Alonso V, Elexpe I, Fernández X, Muntada L, Ortega E, Tribological assessment of nanoadditives for next generation of lubricants. LUBMAT 2018. San Sebastian, España. Junio 5-6, 2018.*
11. *http://www.graphene-tech.net/*

Aplicaciones de la fabricación aditiva en el sector defensa: del prototipado a la producción

García García, Manuel Antonio[1], González Álvarez, Almudena[1,*], Santos González, David[1] y Valenzuela Castañeda, Adrián[1]

1 Fundación PRODINTEC. Avenida del Jardín Botánico, 1345 - Parque Científico Tecnológico, zona Intra – 33203 Gijón (Asturias). Correo electrónico: mgg@prodintec.com (MAGG), dsg@prodintec.com (DSG), avc@prodintec.com (AVC).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: aga@prodintec.com (AGA).

Resumen

Las tecnologías de fabricación aditiva (también conocidas como impresión 3D) permiten construir objetos directamente a partir de un archivo 3D mediante la deposición sucesiva de capas de material. Estas tecnologías han revolucionado los métodos de fabricación tradicionales, aportando ventajas como el abaratamiento de los costes, la reducción de tiempos de llegada al mercado y la personalización de la producción en multitud de sectores industriales. Asimismo, la fabricación aditiva es de gran interés para el sector de la defensa. Fruto del proyecto AMFAD realizado a petición de la Agencia Europea de Defensa (EDA), en este trabajo se presenta el estado del arte en fabricación aditiva y las posibilidades y beneficios que estas tecnologías pueden aportar a las capacidades de defensa, tanto para el desarrollo de nuevos productos que favorezcan la supremacía operacional, como para la fabricación de piezas en campo, aumentando así la disponibilidad de repuestos y reduciendo los costes de mantenimiento y la carga logística. Además, se muestran los resultados del proyecto asociados al desarrollo y despliegue de una fábrica móvil de impresión 3D.

Palabras clave

Fabricación aditiva, impresión 3D, capacidades de defensa.

1. Introducción

1.1. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva (también conocida como impresión 3D) engloba un conjunto de tecnologías que permiten crear objetos a partir de un modelo 3D virtual mediante la superposición de capas sucesivas de material. Los procesos de fabricación aditiva son herederos de los procesos conocidos por el término inglés *Rapid Prototyping*, surgidos con la finalidad de crear prototipos físicos a partir de un CAD 3D, pero que no cumplían con los requisitos mínimos para su uso como pieza funcional. A lo largo de la década de los 90 se desarrollaron nuevos procesos y se empezaron a comercializar los primeros sistemas capaces de fabricar piezas funcionales tanto en materiales poliméricos como metálicos. Estos procesos comenzaron a ser utilizados en algunas aplicaciones industriales como la fabricación de pequeños moldes, insertos de moldes de alta complejidad y la fabricación de componentes de plástico para vehículos de competición o de muy alta gama. Aun así, el precio de los equipos seguía siendo prohibitivo para la mayoría de las empresas y el nicho de aplicaciones donde las técnicas de fabricación aditiva podían ser rentables seguía siendo reducido. Sin embargo, en los últimos años los procesos, materiales y aplicaciones de la fabricación aditiva se han multiplicado exponencialmente debido al impulso producido por: a) el vencimiento de las primeras patentes, cuyo efecto inmediato fue la investigación y la innovación en maquinaria, *software*, materiales y aplicaciones, b) proyectos de *software* libre y c) avances en ciencia e ingeniería de los materiales. Así, hoy en día, la fabricación aditiva está identificada como uno de los principales exponentes de la denominada Industria 4.0 y una de las tecnologías habilitadoras clave para mejorar la competitividad industrial europea, favoreciendo la transición de la producción en masa a la personalización en masa.

El mercado de la fabricación aditiva ha sufrido un crecimiento exponencial en los últimos siete años, alcanzando los 6 billones de dólares en 2016. Actualmente, ya se producen a nivel industrial una gran variedad de componentes finales mediante fabricación aditiva en diversos sectores, entre los que destacan el de la salud y la industria aeroespacial. En estos sectores en los que la tecnología está más avanzada, la fabricación aditiva permite hoy en día obtener desde implantes personalizados según las necesidades del paciente hasta componentes para los motores de las aeronaves [1].

1.2. Aplicaciones de la fabricación aditiva en el sector defensa

En su informe *Technological Trends Report 2017*, la OTAN identifica la fabricación aditiva como una de las cinco tecnologías que alcanzarán su punto álgido en defensa y seguridad en los próximos seis años [2]. Asimismo, tanto en la OTAN (AVT-ST-006) como en la EDA (*CapTech Materials&Structures*) existen grupos de trabajo con actividades relacionadas con la impresión 3D. Este interés deriva del enorme potencial de estas tecnologías tanto para a) el desarrollo de nuevos productos que den lugar a supremacía operacional (nuevos diseños, soluciones mejoradas, productos personalizados, ahorro en costes en los procesos productivos industriales, etc.), como para b) trasladar las capacidades de fabricación a

las operaciones en campo, con las consiguientes ventajas asociadas a la reducción de la carga logística (disponibilidad para fabricar piezas de recambio *in situ*, menor dependencia de fabricantes, ahorro de penalizaciones asociadas al transporte, reducción de inventarios, etc).

En el marco del proyecto EDA, *Additive Manufacturing Feasibility Study & Technology Demonstration - AMFAD* [3], PRODINTEC ha llevado a cabo un estudio del estado del arte y un análisis estratégico que ha permitido identificar y explorar aquellas áreas donde la impresión 3D tiene un mayor impacto dentro del sector defensa [4]. Dicho proyecto incluyó también una demostración tecnológica de desarrollo y despliegue de una fábrica móvil aerotransportable y autónoma de impresión 3D. El presente artículo recoge los resultados de este proyecto, propiciando una visión general sobre las posibilidades que ofrecen estas tecnologías para mejorar las capacidades de defensa.

2. Desarrollo

2.1. Estudio del estado del arte y análisis estratégico de la fabricación aditiva en el sector defensa

La metodología utilizada para desarrollar el estudio estratégico a nivel sectorial se basó en:

1. Una revisión bibliográfica exhaustiva (Internet, publicaciones científico-técnicas, agendas estratégicas, proyectos de I+D, bases de datos, etc.), mediante la cual se caracterizaron las diferentes tecnologías de fabricación aditiva y se recopilaron casos de uso existentes.
2. Un análisis del impacto de la implementación de la fabricación aditiva en las principales cadenas de valor de la defensa.
3. Una encuesta a más de 70 organizaciones públicas y privadas dentro del sector de la defensa, con la finalidad de identificar el grado de conocimiento y experiencia actual, así como las principales limitaciones para aplicaciones futuras.

2.2. Demostración tecnológica

Se llevó a cabo el diseño y desarrollo de una fábrica móvil de impresión 3D (figura 1) integrada en el interior de un contenedor estándar, con capacidad para trabajar de forma autónoma y ser aerotransportado. El desarrollo se realizó sobre un contenedor ISO 1C (6m x 2,4m x 2,4m) que fue acondicionado a las necesidades de uso marcadas por las tecnologías de impresión 3D incluidas en la fábrica móvil (*material jetting* y *fused deposition modelling*), tales como separación de espacios y accesos, ventilación y climatización, alimentación eléctrica, sistemas anti-vibración, *software*, conectividad, soluciones para el almacenamiento de materiales y herramientas, equipamiento para el post-procesado de piezas, etc. Asimismo, el contenedor se adaptó a los requisitos de aerotransportabilidad marcados por la normativa STANAG OTAN 3400, lo que implicó el refuerzo de las paredes y el diseño de anclajes y soluciones de transporte específicas para todos los elementos (equipos, mobiliario, materiales y herramientas) incluidos en el interior del laboratorio.

El laboratorio móvil fue desplazado a la base aérea de Zaragoza para ser testado en el marco de unas maniobras del Ejército del Aire, que incluyeron su transporte en un vuelo de 30 minutos en un avión militar Hércules C-130 y la posterior fabricación *in situ* de piezas bajo demanda.

Figura 1. Vistas exterior e interior del laboratorio móvil desarrollado en el proyecto AMFAD.

3. Resultados y discusión

3.1. Estudio del estado del arte y análisis estratégico de la fabricación aditiva en el sector defensa

El primer paso a la hora de afrontar la fabricación aditiva de una pieza es la selección de la tecnología más adecuada. Bajo el paraguas de la impresión 3D se engloban diversas tecnologías que, de acuerdo al estándar ISO/ASTM 52900:2015, se clasifican en siete categorías diferentes en función del principio que rige la deposición capa a capa (Tabla 9). Con este abanico de tecnologías puede abordarse la fabricación de piezas de diversos materiales, tanto metálicos, como poliméricos o cerámicos. Algunas de estas tecnologías dan lugar a piezas con propiedades mecánicas y precisiones que limitan su uso a modelos ilustrativos y maquetas. Sin embargo, la mayoría de ellas permiten la fabricación de piezas finales funcionales.

Tabla 9. Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva atendiendo al principio de funcionamiento

Nombre de la tecnología	Descripción básica	Materiales/aplicaciones
Fused Deposition Modelling	Las capas se conforman por extrusión de un material termoplástico a través de una boquilla.	Materiales: polímeros termoplásticos.
		Aplicaciones: modelos ilustrativos o funcionales.
Powder Bed Fusion	Se deposita una fina capa de material en polvo y se sinteriza/funde por acción de una fuente de calentamiento selectiva.	Materiales: plástico, metal.
		Aplicaciones: modelos funcionales y pieza final.
Direct Energy Deposition	De manera similar a un proceso de soldadura convencional, una boquilla montada en un brazo multi-eje deposita material a la vez que proporciona la energía térmica necesaria para fundir el material a medida que se deposita.	Materiales: metales.
		Aplicaciones: modelos funcionales y pieza final.
VAT Photopolymerization	Utiliza resinas fotosensibles que se curan de manera selectiva mediante la acción de luz ultravioleta.	Materiales: resinas.
		Aplicaciones: modelos ilustrativos o funcionales.
Material Jetting	De manera similar a un proceso de impresión tradicional, utiliza cabezales de inyección de tinta para depositar el material.	Materiales: resinas, metales, ceras.
		Aplicaciones: modelos ilustrativos o funcionales.
Sheet Lamination	Consiste en ir depositando láminas finas a partir de material en rollo, que posteriormente son recortadas con la forma de la pieza por una fresadora o un láser de CO_2.	Materiales: papel, composites.
		Aplicaciones: modelos ilustrativos (papel), modelos funcionales/pieza final (composite).
Binder Jetting	Utiliza un agente aglutinante líquido que se deposita selectivamente sobre una capa de material en polvo.	Materiales: arenas.
		Aplicaciones: modelos ilustrativos.

Aunque la gran variedad de tecnologías disponibles puede parecer un hándicap a la hora de implementar la fabricación aditiva en el entorno de la defensa, se ha encontrado que esta flexibilidad es una de las principales ventajas para adaptar su uso a las diferentes aplicaciones militares. La fabricación aditiva impacta positivamente tanto en el diseño y fabricación de productos por parte de la industria de defensa como en las operaciones en campo o

en la logística de las instalaciones de apoyo permanentes. En la Tabla 10 se recopilan de manera general las aplicaciones de la impresión 3D en cada uno de estos campos, que se ejemplifican en los siguientes casos de éxito:

1. Empresas como Raytheon o MBDA incluyen elementos fabricados por impresión 3D en la producción de sus misiles y sistemas de propulsión [5]. Thales Athenia Space emplea la impresión 3D para la fabricación de antenas de aluminio, y en enero 2017 puso en órbita satélites (constelación Indium Next) que contienen 79 piezas metálicas y 3.520 soportes de tubos fabricados por impresión 3D [6].
2. El Ejército de EE. UU. está adoptando la tecnología para fabricar gran variedad de objetos, como equipos de protección, drones o herramientas.
3. Se han fabricado las primeras armas por impresión 3D como, por ejemplo, el prototipo de lanzagranadas similar al M203 del ejército estadounidense denominado RAMBO (*Rapid Additively Manufactured Ballistics Ordnance*) [7]. Cincuenta partes del arma, a excepción de los resortes y los sujetadores, fueron impresos en acero, aluminio y otros materiales. La munición utilizada en la prueba posterior también se imprimió en 3D, obteniendo un rendimiento similar al modelo en serie.
4. En el año 2014, el ejército de EE. UU. envió un laboratorio móvil de impresión 3D a una de sus bases en Afganistán. Diversos Ministerios de Defensa europeos también están explorando la utilización de la impresión 3D en operaciones en campo. Así, la armada noruega llevó a cabo en 2016 un ejercicio naval en el que se produjeron piezas de repuesto en un entorno de aguas abiertas. Por su parte, *Netherlands Defence Material Organisation* desplegó una máquina de impresión 3D de escritorio a Mali [8].

Tabla 10. Aplicaciones de la fabricación aditiva en defensa

Aplicaciones de primer nivel		**Aplicaciones de segundo nivel (específicas)**
Diseño y desarrollo de productos	**Nuevos productos/diseños**	- Diseños/productos no asumibles con tecnologías tradicionales de manufactura. - Prototipos no funcionales. - Testeo. - Planificación de la manufactura. - Personalización y ahorros en costes.
	Optimizaciones de proceso/diseño	- Diseño topológico. - Estructuras reforzadas y aligeradas.
	Prototipado/Fabricación de series cortas	- Fabricación y testeo de primeras series de nuevos productos. - Testeo de sucesivas iteraciones de diseño.
	Fabricación seriada	- Piezas y elementos finales.
Apoyo a operaciones de campo	**Planificación estratégica y táctica**	- Obtención de información en campo (robots y drones fabricados en campo). - Planificación de operaciones (maquetas 3D.)
	Apoyo a tropas desplegadas en campo	- Personalización de equipamiento y accesorios. - Monitorización de constantes vitales (sensores/tejidos inteligentes, electrónica impresa, etc.). - Necesidades nutricionales específicas (alimentos fabricados con AM). - Asistencia en campo (robots y drones fabricados en campo).
	Ayuda humanitaria/Asistencia en catástrofes	- Reconocimiento del terreno (robots y drones fabricados en campo): localización de supervivientes. - Fabricación de accesorios y repuestos. - Construcción de estructuras de construcción. - Formación en impresión 3D a nativos.
	Situaciones de aislamiento (submarinos, barcos, etc.)	- Fabricación de artículos de repuesto. - Soluciones a demanda.

Aplicaciones de primer nivel		**Aplicaciones de segundo nivel (específicas)**
Operaciones *in-house*	**Mantenimiento/reparación**	- Mantenimiento y reparación de vehículos y equipamiento. - Fabricación de accesorios y elementos personalizados y adaptados. – Fabricación de herramientas manuales.
	Aplicaciones médicas	- Impresión de tejidos orgánicos (ejemplo: piel). - Implantes y prótesis. - Planificación operatoria y herramientas y utillajes quirúrgicos.
	Construcción	- Estructuras de construcción a demanda.
	Formación y entrenamiento	- Cuadros de control para el entrenamiento en el manejo de máquinas y vehículos. - Formación y entrenamiento (ej: desactivación de IEDs, minas, etc.).

Todos estos ejemplos ponen de manifiesto que el empleo de la fabricación aditiva es ya una realidad en el sector defensa, lo cual fue corroborado por la encuesta desarrollada en el marco del proyecto AMFAD, en la que el 80 % de las organizaciones del sector defensa consultadas manifestaron tener algún tipo de experiencia en fabricación aditiva. En la misma línea, de la búsqueda de patentes realizada sobre los principales contratistas en el campo de la defensa se concluye que desde el año 2012 ha habido un aumento significativo en el número de solicitudes de patente que contienen el término «fabricación aditiva» en el título/resumen del documento, llegando a duplicarse de año en año. Además, las patentes otorgadas a contratistas de defensa suponen un 20 % del total de patentes sobre fabricación aditiva en este periodo, lo que indica que el sector está actuando como motor de desarrollo de estas tecnologías.

El proyecto AMFAD desarrolló asimismo un análisis de impacto de la fabricación aditiva en diversas cadenas de valor asociadas al ámbito de la defensa, de manera concreta en las cadenas de valor de los procesos de desarrollo de productos para defensa y los procesos logísticos. Una tercera cadena de valor, surgida como resultado de la implementación en campo de estas tecnologías, fue asimismo identificada. Una vez que se establecieron estas tres cadenas de valor, se identificaron y definieron las diferentes etapas de cada una de ellas, sobre las que individualmente se analizaron los impactos concretos que la experiencia acumulada en el estado del arte sugiere en cada una de ellas. Este impacto fue descrito en base a una correlación de ventajas y desventajas concretas de la tecnología en cada caso (figura 2).

Las principales conclusiones de dicha actividad muestran cómo, de manera fundamental, las tecnologías de impresión 3D plantean un claro potencial para reducir plazos y costes en el desarrollo y revisión de productos (en base a su capacidad para agilizar la implementación de revisiones de diseño y la posibilidad de prescindir de utillajes), para racionalizar y reducir las necesidades de *stock* y transporte entre centros logísticos (en base a la posibilidad de descentralizar la producción) y para aportar capacidades de fabricación en campo (en base a la disponibilidad de máquinas y sistemas transportables). Por el contrario, existen aún aspectos que dificultan una implementación completa en el corto plazo. En este sentido, la todavía escasa oferta de equipamiento de fabricación aditiva «paquetizable» y homologado para el transporte, así como la falta de un mayor avance en los esquemas de normalización y la dificultad para encontrar perfiles de personal adaptados al uso de estas tecnologías, actúan como limitantes más significativos de cara a su implementación.

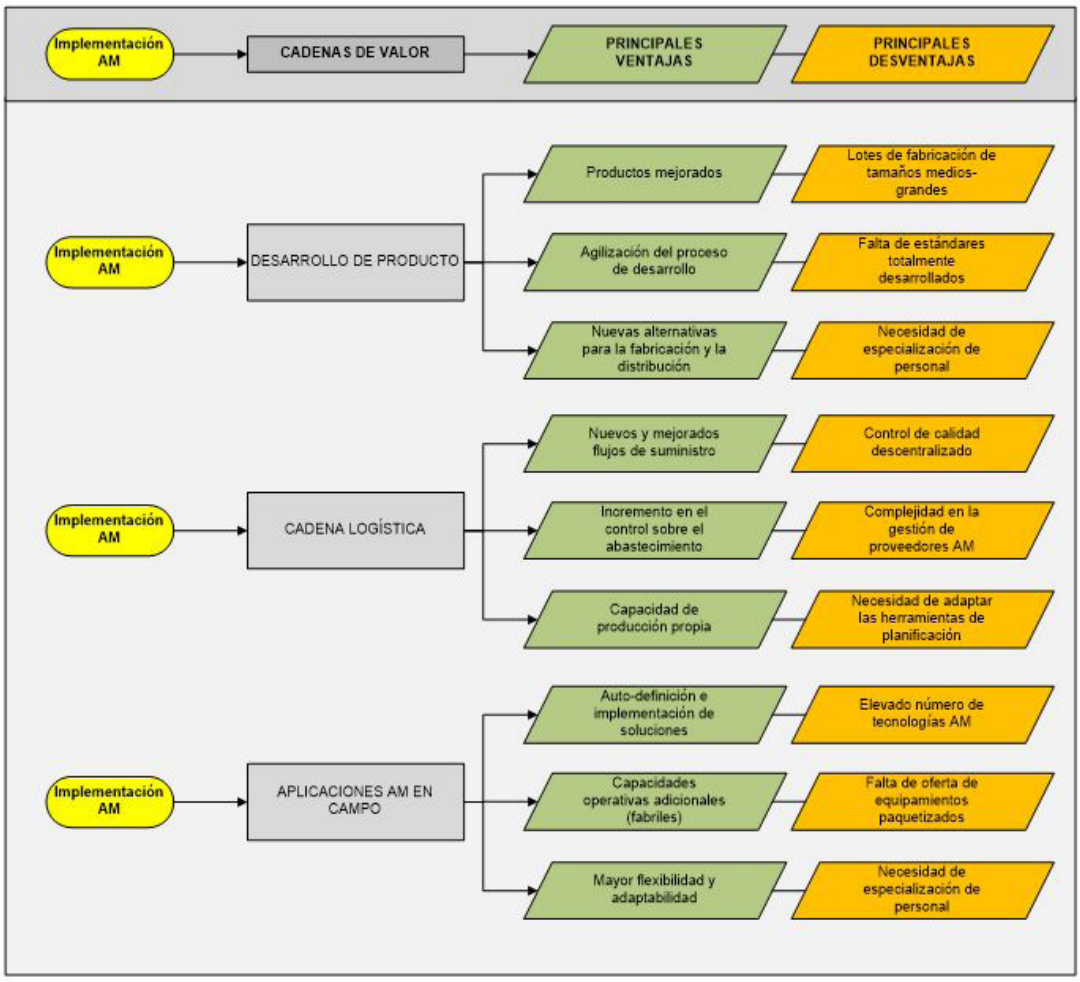


Figura 2. Pros y contras de la implementación de la fabricación aditiva en las principales cadenas de valor del sector defensa.

3.2. Demostración tecnológica

La viabilidad operativa del laboratorio móvil quedó demostrada mediante la producción de piezas tras ser transportado en el vuelo militar. Las dos impresoras incluidas en el contenedor (*Stratasys Objet 500 Connex* y *Marforgot Mark Two*) funcionaron sin necesidad de calibración tras el aterrizaje y operaron de manera autónoma gracias al generador incorporado en la fábrica móvil. Durante el ejercicio se obtuvieron excelentes resultados tanto para la fabricación de piezas predefinidas que fueron comparadas con los correspondientes ejemplares producidos previamente en los talleres de PRODINTEC, como piezas a demanda. Las piezas predefinidas fueron seleccionadas por el ala 31 del Ejército del Aire (figura 3) entre las piezas de repuesto frecuentes en sus talleres de mantenimiento, atendiendo a criterios de frecuencia de desgaste y dificultad para ser fabricadas con tecnologías convencionales.

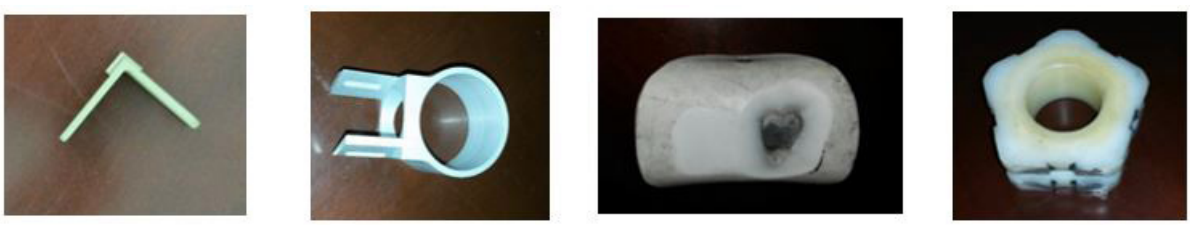


Figura 3. Casos de estudio propuestos por el ala 31 como demostradores durante el despliegue. De izq. a drcha.: marco puerta paracaidistas de T-10; pieza de los asientos de T-10; tope de manguera de repostaje; pieza de la torre de iluminación del sistema de elevación de focos.

4. Conclusiones

Hoy en día existen diferentes tecnologías de fabricación aditiva con capacidad para ser integradas en la producción en masa de piezas funcionales, la posibilidad de trasladar la impresión 3D a las operaciones en campo ha sido demostrada, y se han identificado multitud de casos de aplicación. Todo ello apunta a un futuro prometedor de la fabricación aditiva en la defensa.

Sin embargo, aunque muchas de las organizaciones que participan en actividades de defensa ya han adquirido experiencia significativa en fabricación aditiva, aún es necesario generalizar y ampliar dicha experiencia para lograr la introducción completa de la tecnología en el sector y maximizar su impacto en las capacidades de defensa. Al respecto, cabe señalar que las principales barreras identificadas para lograr dicha implementación no se corresponden con limitaciones de la tecnología, sino con otro tipo de factores no técnicos como IPR, formación, estandarización y certificación, salud y seguridad, etc.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la EDA por la financiación del proyecto AMFAD, y a la empresa MBDA Missile Systems (Francia) por su colaboración en el mismo. Asimismo, quieren mostrar su gratitud a la Jefatura de Movilidad Aérea del Ejército del Aire (JMOVA), a la Base Aérea de Zaragoza y a los participantes en el Curso Europeo Avanzado de Entrenamiento de Transporte Táctico (EAATTC 17-3) por las facilidades prestadas durante el despliegue de la fábrica móvil.

Referencias

1. *Wohlers Report. 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Annual worldwide progress report. Wohlers Associates; 2017.*
2. *NATO Science & Technology Board, STO Tech Trends Report 2017, 8 August 2017, Reference: Public Release Version of AC/323-D(2017)0006 (INV).*
3. *Más información sobre el proyecto AMFAD disponible en: https://eda.europa.eu/what-we-do/activities/activities-search/additive-manufacturing-3d-printing-feasibility-study-technology-demonstration*
4. *Informe del estado del arte y estratégico disponible en: https://eda.europa.eu/docs/default-source/projects/eda-am-study-and-strategic-report_v6.pdf*
5. *http://www.3ders.org/articles/20160714-entirely-3d-printed-missiles-on-the-horizon-says-raytheon-missile-systems-president.html*
6. *http://www.infoespacial.com/es/2017/05/19/noticia-thales-puesto-orbita-piezas-metalicas-realizadas-impresion.html*
7. *https://gizmodo.com/the-armys-new-3d-printed-grenade-launcher-is-straight-o-1793135356*
8. *Seeing is believing, Netherlands Defence Materiel Organisation, 2017. Disponible en: https://magazines.defensie.nl/materieelgezien/2017/03/mg2017033d-printer*

Caracterización de diferentes tipologías de estructuras lattice fabricadas mediante tecnología FDM

Martín Iglesias, S.[1]*, Pires Galicia, D.[2], González Larran, P.[3] León Calero, M.[1]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) «Esteban Terradas», Ctra. de Ajalvir, km. 4,5, 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid). Correo electrónico: martinis@inta.es (SMI).

[2] Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Rey Juan Carlos. Camino del Molino s/n. 28943 Fuenlabrada – Madrid. Correo electrónico: pires.d.galicia@gmail.com (DPG).

[3] Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, Universidad Politécnica de Madrid. Ronda de Valencia, 3, 28012 Madrid. Correo electrónico: pablo.glarran@gmail.com (PGL).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: martinis@inta.es (SMI).

Resumen

Las estructuras *lattice,* son un tipo de estructuras aligeradas diseñadas para optimizar estructuralmente la geometría del producto, con el fin de reducir la cantidad de material manteniendo las propiedades mecánicas. El empleo de esta tecnología está limitado por la complejidad de la fabricación y se ve restringido a geometrías simples. La aparición de la fabricación aditiva ha supuesto una revolución en este campo de investigación, permitiendo la fabricación de estructuras más complejas y adaptadas a la aplicación.

En este *artículo* se presenta un análisis comparativo de diferentes tipologías estructurales para conocer su comportamiento frente a cargas de compresión. Las probetas han sido fabricadas mediante tecnología de fabricación aditiva (FDM, *Fused Deposition Modeling*), ya que permite realizar un estudio rápido y económico. Al ser un análisis comparativo de la geometría de diseño, todas las probetas han sido fabricadas empleando el mismo material, ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Finalmente, los prototipos han sido sometidos a una serie de ensayos a compresión hasta alcanzar la rotura. El objetivo es establecer las bases para el desarrollo de futuras aplicaciones en estructuras aeroespaciales donde el peso supone un factor crítico, además de analizar el nivel de tolerancia al daño de este tipo de estructuras.

Palabras clave

Ingeniería aditiva, *fused deposition modeling*, estructura *lattice*, ABS, optimización.

1. Introducción

En la actualidad, las empresas que ofertan productos de bajo coste suponen un gran reto para la participación en proyectos internacionales. Para poder competir con ello, la optimización de los recursos es un factor crítico. La innovación se presenta como un elemento fundamental para ofrecer un valor diferencial y asegurar la rentabilidad del proyecto. Una posible solución es el desarrollo de diseños geométricos optimizados que reduzcan la cantidad de material empleado, al mismo tiempo que sean capaces de resistir las solicitaciones a las que deben ser sometidos.

Las estructuras celulares consisten en la combinación de material sólido y de aire, lo que reduce el peso estructural [1]. En la naturaleza existe un amplio abanico de estructuras aligeradas como son los panales de abeja [2], esponjas o espumas [3]. El diseño de estas geometrías proporciona interesantes propiedades mecánicas, tales como gran resistencia específica y capacidad de absorción de energía [4]. Entre las estructuras celulares podemos encontrar otro tipo de configuración, conocido como estructuras *lattice*, que consiste en la agrupación de estructuras alojadas en pequeñas celdas unitarias colocadas de manera consecutiva. La fabricación de estas estructuras se ve limitada por las técnicas convencionales y se encuentra restringida a geometrías simples.

La **fabricación aditiva** se presenta como una tecnología innovadora que permite obtener configuraciones *lattice* con geometrías mucho más complejas, y además reduce significativamente la cantidad de material empleada. Esto permite optimizar componentes, en los cuales es posible sustituir sus partes sólidas por microestructuras [5]. Existen diferentes técnicas de impresión clasificadas principalmente en función del estado del material que procesen [6, 7]. Entre las más destacadas se encuentra la tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*) [8] que busca que cada vez más sectores industriales centren su atención en la fabricación de piezas funcionales.

En este *artículo* se presenta un **análisis comparativo del comportamiento de diferentes tipologías *lattice***. Para ello, se han fabricado una serie de probetas con diferentes configuraciones geométricas con el fin de conocer su comportamiento a compresión. Al ser un estudio comparativo de la geometría de diseño, todos los prototipos han sido fabricados con el mismo material (ABS, Acrilonitrilo Butadieno Estireno), empleando tecnología FDM, ya que presenta grandes ventajas para la reducción del coste y tiempos de fabricación. Finalmente, las probetas han sido sometidas a una serie de ensayos de compresión hasta alcanzar la rotura, permitiendo conocer de este modo información sobre la tolerancia al daño y su capacidad de absorción de energía, que son factores críticos en el sector aeroespacial. Los resultados obtenidos han proporcionado información muy interesante, mostrando la gran capacidad que presentan estos diseños y estableciendo las bases para el desarrollo de futuras investigaciones.

2. Diseño topológico

En este estudio se ha realizado un análisis del comportamiento a compresión de una serie de diseños estructurales aligerados. El objetivo de ello es poder reducir el peso de grandes estructuras manteniendo las propiedades mecánicas del conjunto. Para ello, se han fabricado una serie de probetas en formato de columna de 45 x 45 x 135 mm donde se han integrado de manera repetitiva las estructuras. Estas dimen-

siones han sido seleccionadas con el fin de analizar la posibilidad de inestabilidad elástica. Para el diseño de las estructuras, se ha partido de celdas unitarias con las siguientes geometrías:

1. Estructura BCC (*Body Centered Cubic*). La estructura está formada por un conjunto de barras que van de las esquinas hacia el centro de la celda.
2. Estructura FCC (*Face Centerd Cubic*), donde se distinguen dos configuraciones:
   a. FCC: las barras se cruzan en el punto medio de las caras del cubo que contiene a la celdilla.
   b. FCC_2: considerando la configuración FCC, se genera un octaedro central que une los centros de las caras.
3. Estructura HCP (*Hexagonal Compact Packing*). Consiste en un prisma hexagonal cuya estructura interna simula la estructura interna del Titanio.
4. Estructura diamante. Su geometría está basada en la cúbica centrada en las caras FCC. Consiste en dos redes FCC: la primera se sitúa en la posición habitual; y la segunda se desplaza ¼ respecto a la diagonal del cubo de la primera red [9].
5. Honeycomb. Estructura inspirada en la geometría hexagonal que se observan en los panales de abeja. Consiste en prismas hexagonales unidos entre sí por sus caras laterales.
6. Honeycomb 2. Variación del panal de abeja, que modifica el diseño hexagonal pero mantiene la direccionalidad.
7. Vintil. Consiste en dos medias esferas enfrentadas formadas por hexágonos y cuadrados.
8. Teseracto. Consiste en un cubo dentro de otro, unidos por barras que conectan sus vértices [10-11].
9. Estrella. Variación de la celda BCC que incluye barras de unión entre los vértices para reforzar la estructura.

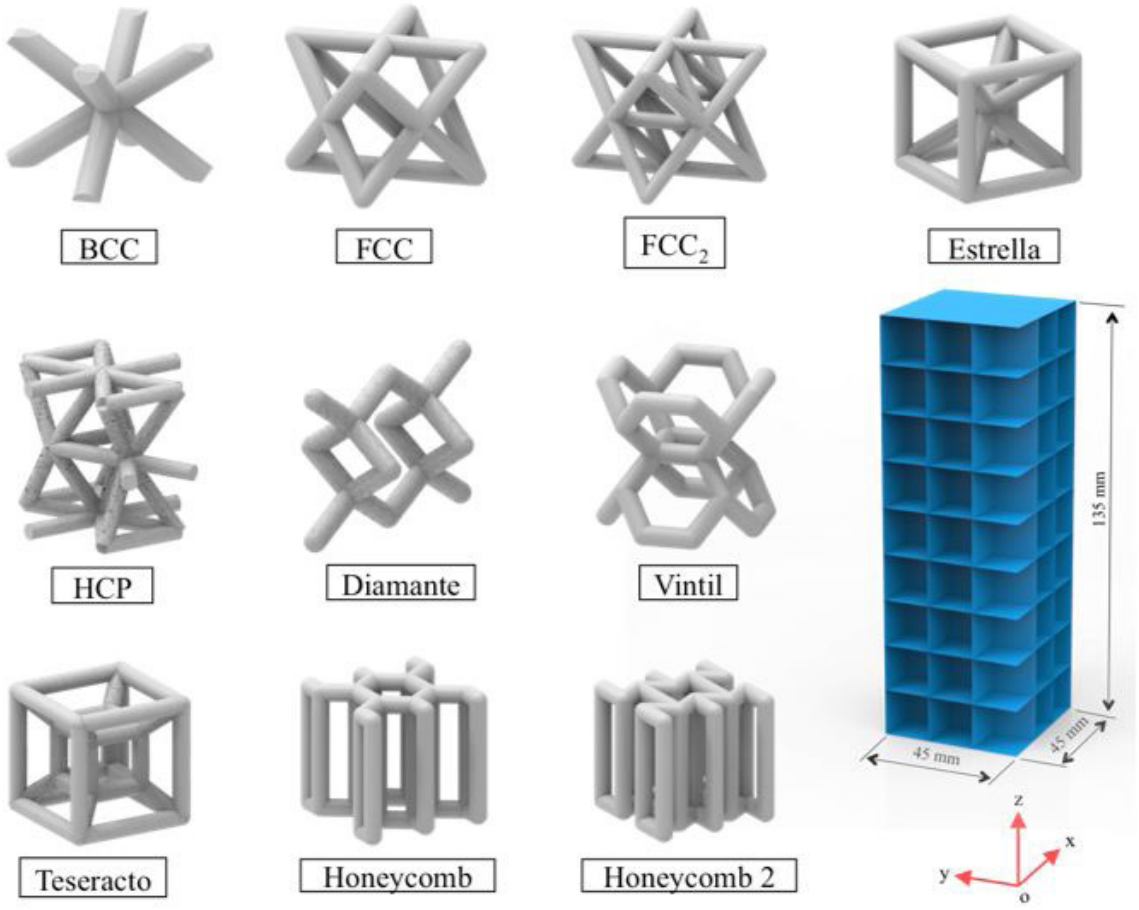


Figura 1. Configuraciones de celda.

Se debe tener en cuenta que cada una de estas celdas ha sido inscrita en un cubo de 15 mm^3, repitiéndose como patrón en las direcciones x, y, z. Como resultado, se obtiene una probeta formada por 3 x 3 x 9 celdillas como se observa en la figura 1. Finalmente, la unión entre barras viene dada por las dimensiones de nodo, que en este caso se ha asumido igual al diámetro de las barras. Todos estos parámetros pueden ser modificados y optimizados en función de la aplicación y el comportamiento estructural deseado.

3. Metodología

3.1. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva es una tecnología innovadora que permite fabricar modelos a partir de un diseño CAD. Esta tecnología presenta numerosos beneficios ante los métodos de producción tradicionales, entre los que destacan el ahorro del material y la reducción de tiempos [7]. Existe un amplio abanico de técnicas aditivas con diferentes ventajas [11]. En este estudio se ha empleado la tecnología FDM [12] que deposita material capa a capa hasta obtener el prototipo final. La figura 2 muestra el proceso seguido para obtener cada una de las probetas de ensayo. Una vez realizados los diseños CAD, el archivo es procesado para proporcionar el código de control de la máquina que divide el archivo en capas y movimientos (*slicing*). Finalmente, se obtiene el modelo listo para ensayar sin requerir ningún mecanizado

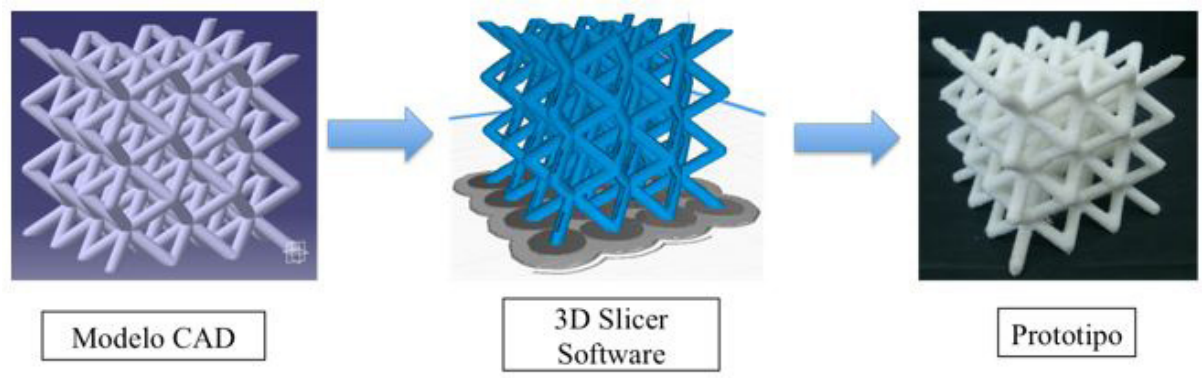


Figura 2. Metodología de fabricación.

o post-procesado.

En este estudio se ha empleado una Zortrax M200, cuyo *software* de control es el Z-Suite. Las condiciones de fabricación seleccionadas son las mostradas en la tabla 1. Como se puede observar todos los modelos han sido fabricados sin soportes y con una densidad de relleno del 100 %.

Parámetros de impresión			
Espesor de capa	0,19 mm	Soportes	No
Calidad de impresión	Normal	Velocidad de impresión	Normal
Tipo	Sólido	Temperatura de impresión	Predefinida
Densidad del relleno	100 %	Capas superficiales	Superior – 6 Inferior – 3

Tabla 1. Parámetros de impresión de estructuras

3.2 Selección de material

Para la fabricación de las estructuras se ha empleado ABS, un tipo de material polimérico muy común en impresión 3D. La tabla 1 muestra algunas de las propiedades proporcionadas por el fabricante que caracterizan este material.

Physical Properties		**Mechanical Properties**	
Density	1,04 g/cm^3	Hardness, Rockwell R	108
Linear Mold Shrinkage	0,0055 cm/cm	Tensile Strength, Yield	30,3 MPa
Melt Flow	3,9 g/10min Load 3,8 kg Temperature 230°C	Elongation at Yield	1,8 %
		Tensile Modulus	1,86 GPa

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas del ABS [13]

A pesar de las bajas propiedades mecánicas que presenta este material, el bajo coste y la facilidad en la fabricación han sido los motivos para el empleo del mismo en las distintas probetas. Esto es posible ya que el objetivo del estudio es la comparación de las geometrías, por lo que el empleo del mismo material en cada configuración es una condición primordial.

4. Ensayo de compresión

Los ensayos para la caracterización de las diferentes tipologías de diseño se han llevado a cabo en las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Para ello, se dispone de una MTS 810, máquina universal de ensayos servohidráulica, con una capacidad de carga máxima de 100 kN. La figura 3 muestra un ejemplo de la estructura BCC, donde se puede observar que la máquina dispone de dos platos con un diámetro de 170 mm. El plato superior se encuentra fijo y dispone de una rótula para su correcta adaptación a la superficie de la muestra bajo estudio. Por el contrario, el plato inferior se desplaza verticalmente para generar la compresión.

Con el objetivo de estudiar su comportamiento a compresión, los diferentes diseños han sido sometidos

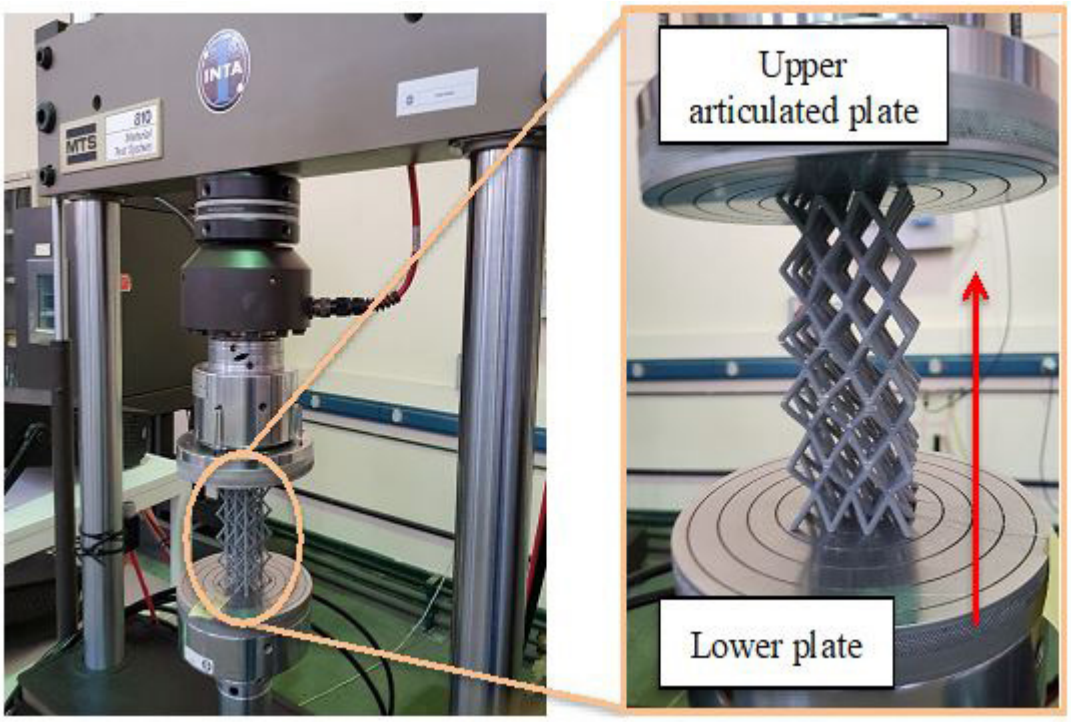


Figura 3. MTS 810 servo hydraulic universal testing machine.

a un desplazamiento constante de 2 mm/min, lo que permite realizar un análisis cuasiestático. Los ensayos han sido realizados hasta alcanzar la condición de fallo, lo cual, permite conocer la deformación elástica y plástica, así como la capacidad de absorción de energía y la fuerza máxima soportada. Los datos registrados proporcionan información de la fuerza aplicada sobre la estructura en intervalos de tiempo conocidos de 0,2 segundos.

5. Resultados

5.1. Curvas fuerza especifica vs deformación

A partir de los resultados obtenidos durante los ensayos, se ha calculado la fuerza específica que soporta la estructura frente a la variación de la deformación de la misma (ε). La figura 4 muestra las curvas para cada uno de los ensayos realizados pudiendo clasificarse en dos grupos: estructuras que soportan mayor carga de impacto (figura 4 a) ya que el valor de fuerza específico es mayor, pero presentan un colapso brusco; y aquellas que tienen mayor tolerancia al daño (figura 4 b), donde se puede observar que tras una primera fase de máximo esfuerzo hay una recuperación que permite a la estructura mantenerse más tiempo antes del colapso.

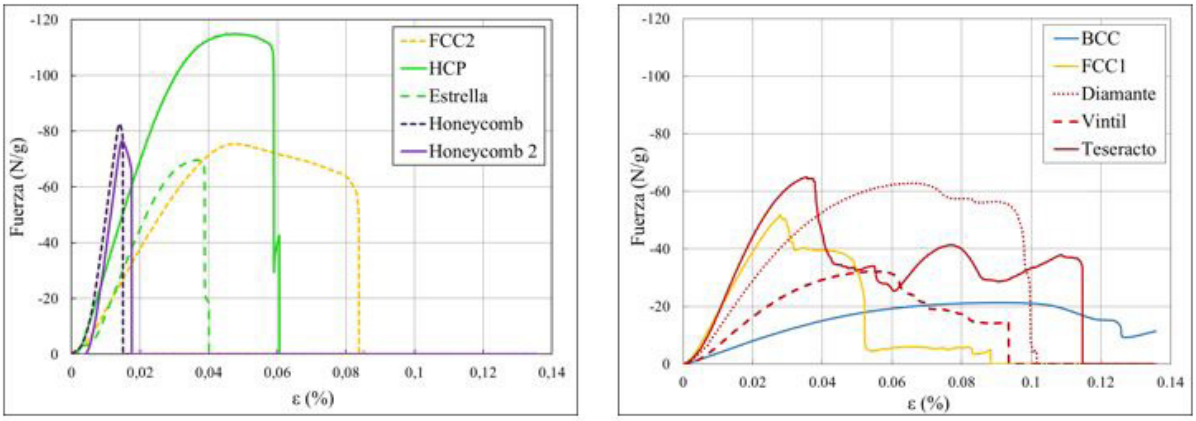


Figura 4. Curvas fuerza específica vs. deformación: a) alta carga de impacto; b) tolerantes al daño.

En la figura 5, se ha representado una comparación de curvas caracterizadas por presentar un diseño o comportamiento similar. El grafico de la izquierda muestra la comparación de estructuras *lattice* cuyo diseño original ha sido modificado. Como se puede observar, el comportamiento de la estructura *Honeycomb* es similar en ambas configuraciones, mientras que la estructura FCC difiere en función de la configuración, siendo bastante superior la configuración FCC_2. La mejora adquirida en la segunda configuración se debe al octaedro de su interior. Finalmente las curvas de la derecha muestran las estructuras que presentan mayor absorción de energía.

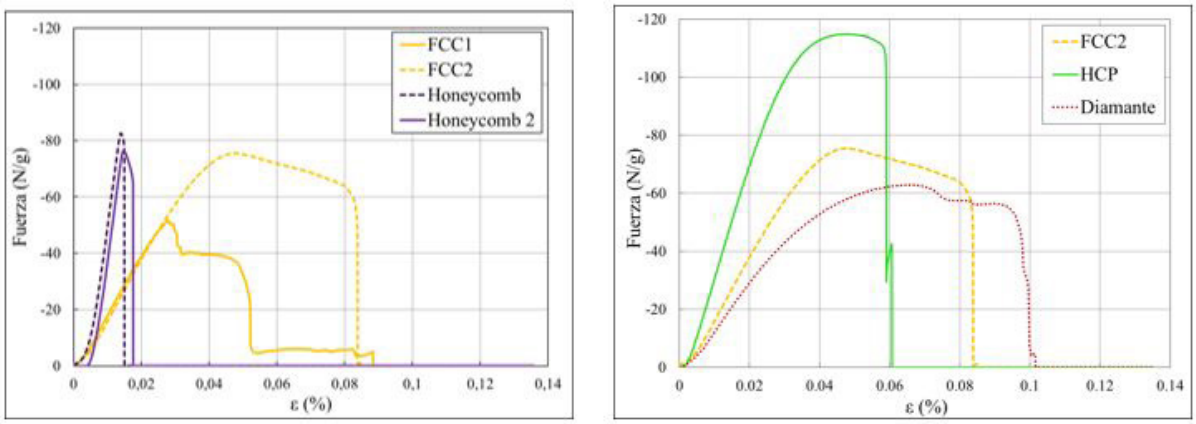


Figura 5. Curvas fuerza especifica vs. deformación: a) comparación estructura común; b) mayor absorción de energía.

5.2. Tolerancia al daño y absorción de energía

Como se ha comentado, algunas estructuras presentan propiedades interesantes en función de las necesidades de la aplicación. A partir de los gráficos es posible obtener valores de absorción de energía (Eq. 1), punto de máximo esfuerzo y punto de rotura. Como se observa en la Eq. 1, se ha obtenido la energía absorbida como integración del área bajo la curva.

$$E_{spc} = \int \frac{F}{m} dx \qquad (1)$$

La tabla 3 presenta los resultados calculados. Se puede apreciar que la estructura **HCP** alcanza los valores más altos, pero la condición de rotura es rápida y brusca lo que implica que tiene baja tolerancia al daño. Por otro lado, se observa que estructuras, como el **diamante**, el **vintil**, o el **teseracto**, que presentan valores menores de absorción de energía o punto de rotura, pero ofrecen tolerancia al daño. Este comportamiento implica que la deformación de la estructura será alta antes de colapsar. Finalmente, cabe destacar la estructura **FCC_2,** que aunque tiene un punto de rotura inferior a la HCP, tiene un nivel de absorción de energía muy alto, y se mantiene más tiempo estable antes de colapsar.

	Absorción de energía total	**Punto de máximo esfuerzo**		**Punto de rotura**	
BCC	13,96	21,36	0,09	11,49	0,14
FCC1	12,72	51,75	0,03	18,24	0,05
FCC2	30,93	75,55	0,05	47,00	0,08
HCP	32,51	114,86	0,05	98,73	0,06
Diamante	30,93	62,89	0,07	40,08	0,10
Vintil	12,77	32,14	0,06	14,47	0,09
Teseracto	27,71	64,95	0,04	33,58	0,11
Estrella	10,53	69,68	0,04	62,20	0,04
Honeycomb	3,46	82,64	0,01	76,33	0,01
Honeycomb 2	3,86	76,41	0,01	63,49	0,02

Tabla 3. Absorción de energía, punto de rotura y punto de máximo esfuerzo de cada configuración

6. Conclusiones

La fabricación aditiva es una tecnología que permite la generación de estructuras complejas sin la necesidad de emplear moldes o utillaje. El empleo de estructuras celulares para el desarrollo de diseños geométricos optimizados que reduzcan la cantidad de material empleado se presenta como una línea interesante de investigación para la aplicación en la industria aeroespacial.

En este comunicado se ha estudiado el comportamiento a compresión de diferentes configuraciones geométricas de *lattice* fabricadas mediante tecnología FDM. Para ello, se han fabricado y analizado una serie de probetas cuyos resultados muestran la gran eficiencia de las *lattice* para diferentes tipos de aplicaciones: tolerancia al daño o tolerancia al fallo, resistencia específica o absorción de energía. Entre los casos más destacados encontramos el HCP que es capaz de soportar altos valores de fuerza y tiene gran capacidad de absorción de energía, pero la condición de rotura es rápida y brusca, lo que implica que tiene baja tolerancia al daño. Por otro lado, se observó que estructuras como el diamante, el vintil, o el teseracto, ofrecen gran tolerancia al daño, lo que implica que la deformación de la estructura será alta antes de colapsar. Finalmente, cabe destacar la estructura FCC_2, tiene un nivel de absorción de energía muy alto, y se mantiene más tiempo estable antes del colapso.

Los resultados obtenidos han proporcionado información interesante para el desarrollo de futuras investigaciones, mostrando la gran capacidad que presentan estos diseños. Una posible línea de investigación es la optimización de los parámetros geométricos de la estructura, con el fin de alcanzar mejores comportamientos. A esto hay que añadirle la posibilidad de crear estructuras mixtas, resultantes de la combinación de estructuras *lattice* optimizadas y estructuras simplificadas como pueden ser cilindros, pieles u otras geometrías continuas. El objetivo de la combinación es maximizar los modos de trabajo de una estructura. Por último, cabe destacar la necesidad de investigar la aplicación de estas estructuras empleando diferentes materiales y comprobar que los resultados presentan comportamientos similares.

Referencias

1. *Williams, C. B. (2008). Design and development of a layer-based additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructure (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).*
2. *Umeda, T., Kataoka, K., & Mimura, K. (2016). Experimental Study of the Effects of Geometry and Strain Rate on Dynamic Behavior of Axial Crushing Honeycomb. Key Engineering Materials, 715.*
3. *Kavianiboroujenia, A., Cloutier, A., & Rodrigue, D. (2017). Low Velocity Impact Behaviour of Asymmetric Three-layer Sandwich Composite Structures With and Without Foam Core. Polymers & Polymer Composites, 25(5).*
4. *Nguyen, D. S., & Vignat, F. (2016, December). A method to generate lattice structure for Additive Manufacturing. In Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2016 IEEE International Conference on (pp. 966-970). IEEE.*
5. *Wang, Y., Zhang, L., Daynes, S., Zhang, H., Feih, S., & Wang, M. Y. (2018). Design of graded lattice structure with optimized mesostructures for additive manufacturing. Materials & Design, 142, 114-123.*
6. *Stucker, B., Gibson, I., & Rosen, D. (2010). Additive Manufacturing Technologies. Springer.*
7. *Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing-An Overview. Materials Today: Proceedings, 5(2), 3873-3882.*
8. *Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. Advances in Manufacturing, 3(1), 42-53.*
9. *Fan, Q., Gao, Y., Zhao, Y., Yang, Q., Guo, L., & Jiang, L. (2018). Fabrication of diamond-structured composite materials with Ni-P-diamond particles by electroless plating. Materials Letters, 215, 242-245.*
10. *Pichierri, F. (2014). Hypercubane: DFT-based prediction of an Oh-symmetric double-shell hydrocarbon. Chemical Physics Letters, 612, 198-202.*
11. *Cranford, S. W. (2018). Compressive failure of a carbon nano-tesseract: Sci-Fi inspired materials and the strength of thanos. Extreme Mechanics Letters, 22, 19-26.*
12. *Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering.*
13. *Material Data Sheet: Z-ABS. (acceso el 4 de Septiembre 2018). Disponible online: https://shop.turtlecreations.nl/amfile/file/download/file_id/1/product_id/326/*

Caracterización térmica de estructuras aligeradas fabricadas mediante tecnologías FDM

Gómez Guerrero, N.[2], León Calero, M.[1], Martín Iglesias, S.[1]*

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) «Esteban Terradas», Ctra. de Ajalvir, km. 4,5, 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid). Correo electrónico: martinis@inta.es (SMI).

[2] Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, Universidad Politécnica de Madrid. Ronda de Valencia, 3, 28012 Madrid. Correo electrónico: nuriagguerrero@gmail.com (NGG).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: martinis@inta.es (SMI).

Resumen

En la industria aeroespacial, el desarrollo de estructuras multifuncionales supone un gran reto para la ingeniería. Las estructuras *lattice,* son un tipo de estructuras aligeradas diseñadas para optimizar la geometría, reduciendo de este modo la cantidad de material, pero manteniendo las propiedades mecánicas. A su vez, estas estructuras han demostrado buenas propiedades térmicas permitiendo la disipación de calor. El desarrollo de esta tecnología se ha visto limitado por la complejidad de la fabricación y restringido a geometrías simples. Por ello, la aparición de la *fabricación aditiva*, ha supuesto una revolución en este campo de investigación, permitiendo la fabricación de estructuras más complejas y adaptadas a la aplicación.

En este *artículo* se realiza un análisis comparativo de diferentes tipologías estructurales aligeradas con el objetivo de conocer su respuesta en ambientes térmicos. Las probetas han sido fabricadas mediante tecnología de fabricación aditiva (FDM, *Fused Deposition Modeling*), ya que permite realizar un estudio rápido y económico al mismo tiempo que permite gran flexibilidad geométrica. Finalmente, los prototipos han sido sometidos a una serie de ensayos térmicos no destructivos. El objetivo es establecer las bases para el desarrollo de aplicaciones multifuncionales en estructuras aeroespaciales donde el peso y el control térmico son factores críticos.

Palabras clave

Fabricación aditiva, *fused deposition modeling*, impresión 3D, estructura lattice, ABS, reducción de peso, optimización de material, transmisión de calor, conductividad térmica.

1. Introducción

En la actualidad, uno de los requisitos en la mayoría de las aplicaciones del ámbito aeroespacial es la reducción de peso, optimizando material para poder reducir los costes de lanzamiento. Las estructuras aligeradas son una de las soluciones más empleadas para ello, permitiendo mantener las propiedades mecánicas. Dentro de las estructuras aligeradas podemos distinguir las *estructuras lattice* que consisten en la agrupación de pequeñas celdas unitarias colocadas de manera consecutiva. Estas estructuras no solo ofrecen ligereza, sino también gran rigidez y resistencia específica, al mismo tiempo que permiten mejorar otros aspectos multifísicos de una estructura [1-4].

Por otro lado, el control térmico es una variable crítica para asegurar el correcto funcionamiento de los equipos y subsistemas aeroespaciales [5]. Factores como las condiciones de temperatura extremas o las fuentes de calor de equipos electrónicos suponen un reto para su correcto funcionamiento dentro de los rangos de temperatura de operación [6]. Partiendo de esta filosofía, las estructuras lattice ofrecen propiedades térmicas interesantes, permitiendo la conducción de calor a través de la estructura interna y la disipación del mismo mediante un flujo que se propaga a través de las celdas. La implementación exitosa de estas estructuras en aplicaciones térmicas exige un enfoque integrado que combine modelado y pruebas, todo ello para cuantificar su rendimiento térmico en función de parámetros morfológicos y densidad relativa. De esta manera, las estructuras lattice son candidatos ideales para aplicaciones donde, además de soportar cargas estructurales considerables con el mínimo material y peso, también se demanda eficiencia térmica en términos de disipación [7, 8].

El inconveniente que presenta este tipo de estructuras es la dificultad de fabricación mediante métodos convencionales. La aparición de la *fabricación aditiva* proporciona una solución a este problema, siendo posible la obtención de estructuras complejas de manera rápida y sencilla. Además, ofrece beneficios como el ahorro de material, ya que no se requiere la fabricación de utillaje y la reducción de tiempos de fabricación [9]. Todo ello hace posible la producción de pequeñas series a coste reducido, optimizadas y centradas en la aplicabilidad del componente en la industria aeroespacial. Existen multitud de técnicas aditivas con ventajas diferenciales [10] clasificadas principalmente en función del estado del material que procesen [9, 11]. Entre las técnicas más destacadas se encuentra la tecnología FDM (*fused deposition modeling*) [12] que consiste en depositar material capa tras capa hasta conseguir el objeto tridimensional diseñado desde un archivo CAD [13].

En este *artículo* se realiza un análisis comparativo del comportamiento térmico en diferentes estructuras aligeradas. Los ensayos llevados a cabo en esta investigación han sido desarrollados en las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). El objetivo es caracterizar térmicamente los distintos tipos de estructuras aligeradas y desarrollar sus posibles aplicaciones. Para ello, se han fabricado una serie de probetas tipo sandwich [10] que constan de dos placas paralelas en cuyo interior se encuentran las celdas unitarias. En el diseño se han tenido en cuenta la geometría y dimensiones de dichas celdas para cada tipo de estructura. Para la fabricación de las probetas se ha empleado un filamento de base polimérica ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), usando la tecnología de fabricación aditiva FDM (*fused deposition modeling*). Dichas probetas han sido sometidas a ensayos térmicos no destructivos, cuyos resultados han sido analizados y demuestran la capacidad de estos diseños tanto para aplicaciones aislantes como para aquellas donde se requiera la disipación o concentración de calor.

2. Diseño

Para la realización del análisis del comportamiento térmico de los diferentes diseños estructurales aligerados seleccionados, se han fabricado probetas en formato sándwich de dimensiones 80x80x10 mm. La estructura sándwich consta de dos placas paralelas de 2 mm de espesor en cuyo interior se han integrado las estructuras de manera repetitiva como se observa en la figura 1. La dimensión lateral ha sido seleccionada teniendo en cuenta las restricciones dadas por la configuración de ensayo. El espesor de la probeta se ha escogido de forma que se trate de un panel esbelto y atendiendo a la configuración del ensayo. Para el diseño de los paneles, se ha partido de celdas unitarias con las siguientes geometrías internas:

1. Sólido. Esta probeta consiste en un bloque macizo de material, permitiendo de este modo conocer el comportamiento térmico en caso de no existir optimización estructural.
2. Hueco. La probeta tipo hueco permite establecer una referencia de medidas para el caso en el que el interior de las probetas sea totalmente aire.
3. Estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC-*body centered cubic*). Es la celdilla unidad propia del hierro a temperatura ambiente. Está compuesta por un conjunto de 8 barras que van desde los vértices hasta el centro donde se unen en un nodo central.
4. Estructura cúbica centrada en las caras (FCC-*face centerd cubic)*. Es la celdilla unidad propia del hierro a temperaturas comprendidas entre los 918ºC y 1394ºC. Está compuesta por barras que se cruzan en el centro de las caras del cubo que envuelve la celda unidad.
5. Estructuras BCC y FCC seccionadas por la mitad (BCC-H y FCC-H).
6. Patrón de relleno de impresoras. Teniendo en cuenta patrones de impresión para densidades de relleno inferior al 100 %, se han diseñado tres configuraciones prismáticas con bases: cúbica (S, *squared*), cilíndrica (C, *cilindros*) y hexagonal (PH, *prisma hexagonal*).

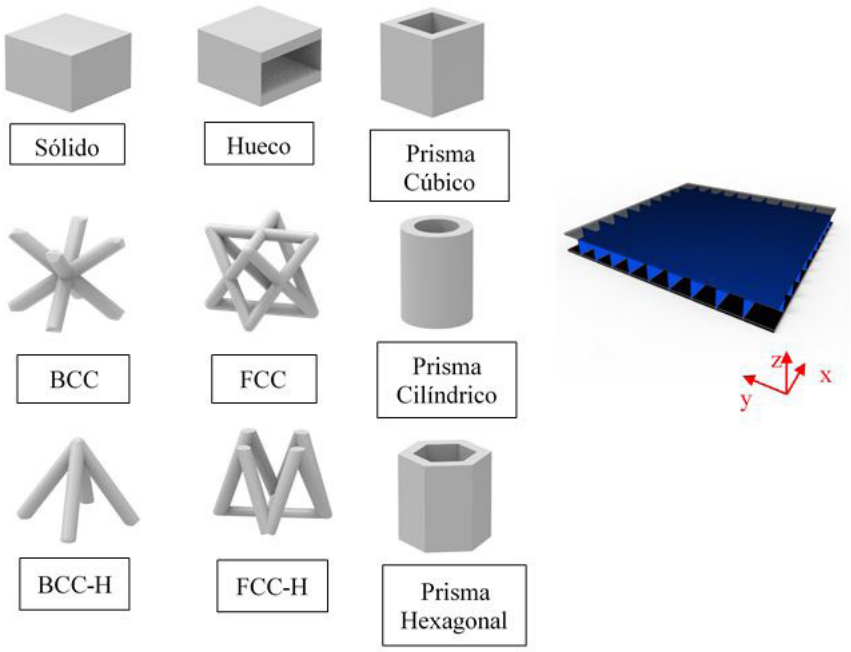


Figura 1. Configuraciones de estructuras.

Cada una de las configuraciones ha sido inscrita en celdas de 8 y 4 mm de lado, repitiéndose como patrón en las direcciones x e y. Como resultado, se obtiene una probeta formada por celdas múltiplo de la celda matriz de 10x10x1 como se observa en la figura 1. Además, se ha establecido un espesor de barras/pared de celda de 1,5 o 3 mm. Todos estos parámetros pueden ser modificados para optimizar la

estructura en función de la aplicación final. Cabe destacar que la configuración de estructura sándwich ha facilitado los ensayos de manera que una de las caras está en contacto con la placa caliente y en la otra se colocan los termopares para medir la temperatura.

3. Metodología de fabricación

3.1. Fused Deposition Modeling – FDM

La ingeniería aditiva es una nueva técnica de fabricación que está siendo desarrollada en los últimos años para una amplia variedad de aplicaciones tanto en ingeniería como en otros campos de la ingeniería y la ciencia [14]. Esta técnica consiste en depositar material capa tras capa hasta conseguir el objeto tridimensional diseñado desde un archivo CAD [13]. En este estudio se ha empleado una impresora 3D Zortrax M200 basada en la tecnología FDM ya que permite realizar un estudio rápido y económico. Para ello, una vez se ha obtenido el archivo CAD, este se procesa mediante el *software* Z-Suite que proporciona el código de control de la máquina. La figura 2 muestra un ejemplo del proceso seguido para la obtención de las probetas.

Figura 2. Metodología de fabricación.

3.2. Condiciones de fabricación

Para la fabricación de las probetas se han establecido una serie de parámetros de impresión comunes a todas ellas. La tabla 1 muestra dichos parámetros donde destaca la densidad de relleno, siendo esta del 100 %. Por este motivo, para poder estudiar los patrones de relleno comentados (cuadrados, cilindros y hexágonos) ha sido necesario un diseño CAD. En el caso de las probetas de tipo prisma cúbico, estas han sido fabricadas a 45º para evitar la generación de soportes internos, pero siendo necesaria la fabricación de soportes exteriores.

Parámetros de impresión			
Espesor de capa	0.14 mm	**Soportes**	No
Calidad de impresión	Normal	**Velocidad de impresión**	Predeterminada
Densidad del relleno	100 %	**Temperatura de impresión**	240ºC

Tabla 1. Parámetros de impresión de estructuras

Al ser un análisis comparativo entre estructuras, todas las probetas han sido fabricadas usando el mismo material, un filamento polimérico de ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) comúnmente utilizado en la técnica FDM por las buenas prestaciones que proporciona durante su impresión. Además los polímeros son muy versátiles, y por ello, altamente utilizados hoy en día para producción industrial gracias a su ligereza, comportamiento químico, eléctrico y estructural. En cambio, su aplicación térmica es limitada debido a su baja conductividad térmica, pero puede resultar interesante para apli-

caciones donde se requiera aislamiento térmico [15]. La tabla 2 muestra algunas de las propiedades físicas y térmicas más destacables del ABS.

Propiedades físicas		**Propiedades térmicas**	
Densidad	1.04 g/cm^3	Conductividad térmica	0,173 W/Km
Linear Mold Shrinkage	0,0055 cm/cm	Temperatura transición vítrea	125 ºC
Melt Flow	3.9 g/10min Load 3.8 kg Temperature 230°C	Temperatura fusión	250-260ºC

Tabla 2. Propiedades físicas y térmicas del ABS [16]

4. Metodología de ensayo

Para la realización de los ensayos se ha empleado una serie de instrumentos proporcionados por el INTA. En primer lugar, para proporcionar calor a la superficie de ensayo, se han empleado una serie de *peltiers*. Para controlar la temperatura se dispone de dos canales SPA/EQ-CTC y de un baño isotérmico Grant LTD6G que garantizar su seguridad/correcto funcionamiento. La toma de medidas se realiza mediante termopares, sujetos con Kapton y situados en los puntos de control de la placa caliente y la probeta. Por último, se dispone de un equipo de adquisición de datos Keithley 2700 Multimeter/Data acquisition system y el equipo de lecturas de temperatura Keithley 2000 Multimeter que es el encargado de registrar los datos de temperatura a lo largo del tiempo. En ambos casos, el tiempo de muestreo se realiza cada 5 segundos. La figura 3 muestra los diferentes equipos empleados en la configuración de ensayo.

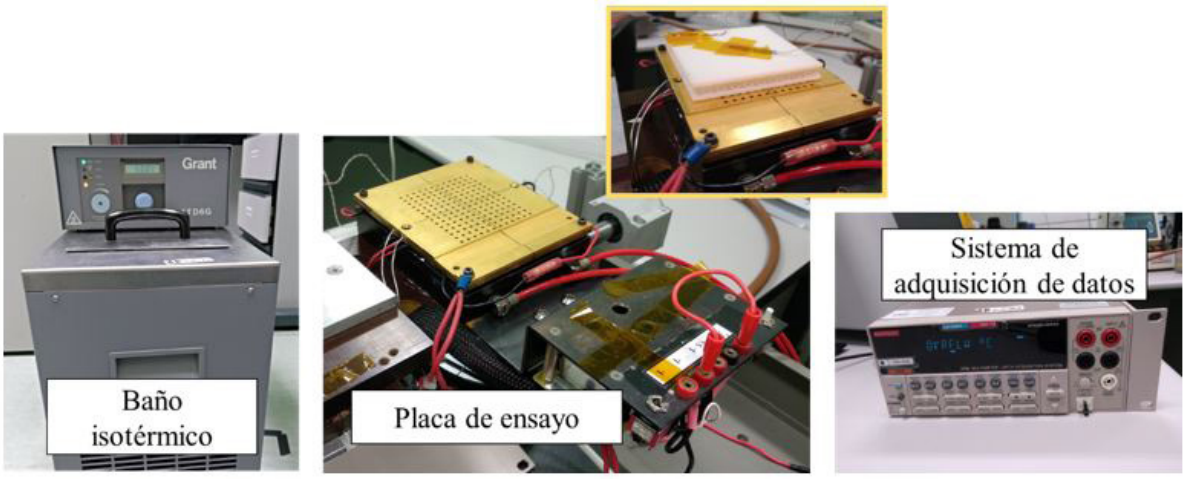


Figura 3. Equipos empleados durante el ensayo/configuración del ensayo.

Los ensayos consisten en la aportación calor a la probeta de manera que se eleve su temperatura desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de estabilización. Con el objetivo de obtener la curva de calentamiento, se ha establecido una duración de ensayo de 30 minutos, garantizando de este modo la correcta adquisición de datos de tiempo y temperatura de estabilización. Así mismo, la temperatura de los ensayos (90ºC) se ha seleccionado teniendo en cuenta la temperatura de transición vítrea del material empleado en la fabricación, con el fin de asegurar la integridad física de las probetas.

5. Resultados

5.1. Gráficos

Una vez extraídos los datos de los ensayos térmicos realizados a las distintas probetas, se ha realizado un análisis de datos y se han representado las curvas de temperatura a lo largo del tiempo. Gracias a las tablas de datos y las curvas que se obtienen, es posible calcular no solo la temperatura a la que estabiliza sino también el tiempo que tarda en estabilizar a dicha temperatura. La figura 4 muestra un ejemplo de la curva de calentamiento. La temperatura de estabilización ha sido definida a partir de la curva de tendencia paralela al eje de abscisas. En función de este resultado, se ha calculado el tiempo de estabilización imponiendo un 5 % de margen antes de alcanzar la temperatura de estabilización. Cabe destacar que el margen ± 5 % ha permitido también eliminar valores erróneos.

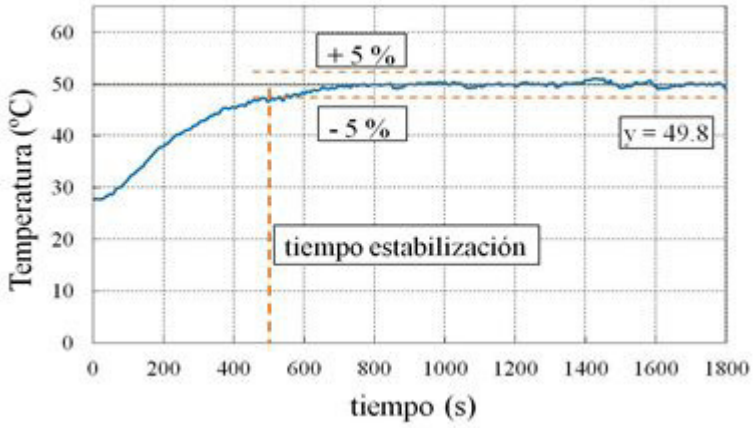


Figura 4. Ejemplo de curva de la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo.

5.2. Análisis de datos

En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos de temperaturas y tiempos de estabilización para cada tipo de estructura. Se puede apreciar que todas ellas se encuentran dentro del rango de temperaturas y tiempos entre la hueca (50,3ºC y 6,12 min) y la sólida (57ºC y 11,7 min). En la imagen de la izquierda se ha realizado una comparación del efecto generado al aumentar el número de celdas. Como se puede observar, a mayor número de celdas los resultados son más próximos al caso sólido, debido a la cantidad de material por unidad de volumen es mayor. Los resultados más destacados son los obtenidos para las configuraciones de BCC y FCC, donde se aprecia una reducción de temperatura similar al caso hueco. Esto permitiría obtener estructuras multifuncionales para aplicaciones donde es necesario un buen comportamiento mecánico y aislamiento térmico. Las estructuras similares al patrón de relleno de impresión 3D muestran resultados más cercanos al caso sólido. Por ello, este tipo de configuraciones permitiría optimizar el material de fabricación, siendo interesantes para aplicaciones donde se requiere bajo aislamiento. Exceptuando el caso de los prismas cúbicos, en concreto S_8x10, donde se aprecia una temperatura mucho menor que en los otros tipos de patrones de impresión.

Por otro lado, en la imagen de la derecha se ha realizado un análisis con el fin de conocer el comportamiento de las estructuras BCC y FCC para distintos espesores y modificaciones de diseño (BCC-H y FCC-H). El aumento del espesor de las barras que constituyen estas estructuras da como resultados valores más similares al caso sólido por el aumento de la cantidad de material, como en el caso anterior.

La configuración BCC-H ha sido analizada en dos orientaciones teniendo en cuenta su estructura no simétrica. Atendiendo a su diseño, se confirma que en el caso BCC-H_3_1a4 genera una disipación de calor, mientras que el caso contrario (BCC-H_3_4a1) da lugar a una concentración del mismo. Cabe

destacar que los casos BCC-H y FCC-H no han podido ser fabricados con espesores de 1,5 mm por motivo de las limitaciones para realizar voladizos tan amplios sin la fabricación de soportes adicionales. Los resultados obtenidos para estos casos muestran valores intermedios de tiempo de estabilización y temperatura, por lo que es necesario fabricar estructuras de mayor tamaño para poder conocer mejor los efectos de estos diseños.

6. Conclusiones

La *fabricación aditiva* es una tecnología innovadora que permite la realización de estructuras complejas sin la necesidad de emplear moldes o utillaje, lo cual da lugar a un proceso de ingeniería ágil y flexible. Además, ofrece características de bajo coste y versatilidad tanto en el uso de los materiales como en la geometría resultante. Un ejemplo de ello es el empleo de estructuras celulares, que se presenta como una línea interesante de investigación en la industria aeroespacial con el fin de desarrollar diseños geométricos optimizados donde se reduzca la cantidad de material empleado.

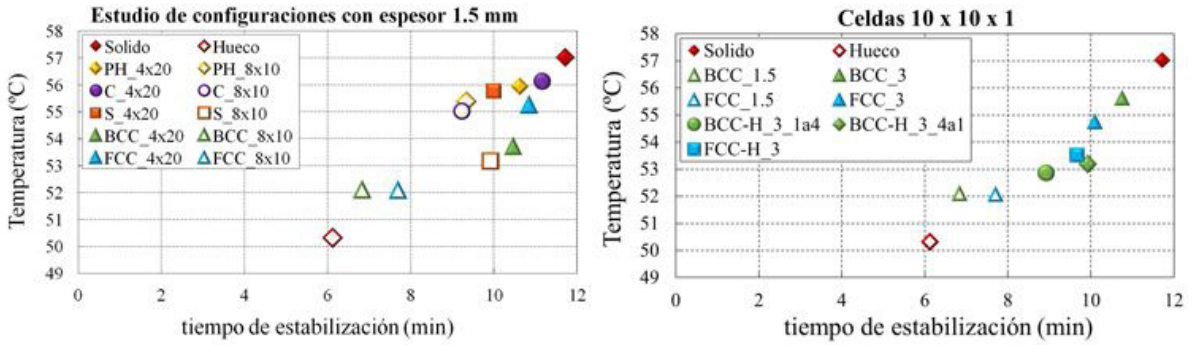


Figura 5. Resultados temperatura de calentamiento vs. tiempo de estabilización: espesor de pared de 1,5 mm (izq.) y variación de espesor de pared (dcha.).

En este artículo se ha estudiado el comportamiento térmico de diferentes configuraciones geométricas de estructuras *lattice* fabricadas mediante tecnología FDM. Para ello, se han fabricado y analizado una serie de probetas para demostrar la eficiencia de dichas estructuras en diferentes aplicaciones. Los resultados han demostrado la gran capacidad que presentan las diferentes configuraciones estableciendo las bases para el desarrollo de futuras investigaciones. Ente los casos más destacados encontramos la FCC y la BCC, así como sus distintas modificaciones de diseño, mostrando buenas propiedades como elementos disipadores/aislantes de calor. Debido a ello, sería interesante continuar estudiando el efecto de la optimización de los parámetros geométricos de las estructuras, así como, analizar el comportamiento en presencia de diferentes fluidos refrigerantes. Por último, cabe destacar la necesidad de investigar la aplicación de estas estructuras empleando diferentes materiales y comprobar que los resultados presentan comportamientos similares.

Referencias

1. *Cheng, X., Wei, K., He, R., Pei, Y., & Fang, D. (2016). The equivalent thermal conductivity of lattice core sandwich structure: a predictive model. Applied Thermal Engineering, 93, 236-243.*
2. *Wei, K., Cheng, X., He, R., Pei, Y., & Fang, D. (2014). Heat transfer mechanism of the C/SiC ceramics pyramidal lattice composites. Composites Part B: Engineering, 63, 8-14.*
3. *Wei, K., He, R., Cheng, X., Pei, Y., Zhang, R., & Fang, D. (2015). Fabrication and heat transfer characteristics of C/SiC pyramidal core lattice sandwich panel. Applied Thermal Engineering, 81, 10-17.*

4. *Yin, S., Wu, L., Ma, L., & Nutt, S. (2011). Pyramidal lattice sandwich structures with hollow composite trusses. Composite Structures, 93(12), 3104-3111.*
5. *Wertz, J. R., & Larson, W. J. (1999). Space Mission Analysis and Design, Space Technology Library. Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers, El Segundo, CA, USA.*
6. *ESA, European Cooperation for Space Standardization, ECSS. (2008). «space engineering: thermal control general requirements», ECSS-E-ST-31C.*
7. *Kim, T., Zhao, C. Y., Lu, T. J., & Hodson, H. P. (2004). Convective heat dissipation with lattice-frame materials. Mechanics of Materials, 36(8), 767-780.*
8. *Kim, T., Hodson, H. P., & Lu, T. J. (2004). Fluid-flow and endwall heat-transfer characteristics of an ultralight lattice-frame material. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(6-7), 1129-1140.*
9. *Matta, A. K., Raju, D. R., & Suman, K. N. S. (2015). The integration of CAD/CAM and rapid prototyping in product development: a review. Materials Today: Proceedings, 2(4-5), 3438-3445.*
10. *Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing-An Overview. Materials Today: Proceedings, 5(2), 3873-3882.*
11. *Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering.*
12. *Stucker, B., Gibson, I., & Rosen, D. (2010). Additive Manufacturing Technologies. Springer.*
13. *Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. Advances in Manufacturing, 3(1), 42-53.*
14. *Faes, M., Ferraris, E., & Moens, D. (2016). Influence of inter-layer cooling time on the quasi-static properties of ABS components produced via fused deposition modelling. Procedia CIRP, 42, 748-753.*
15. *Zhai, S., Zhang, P., Xian, Y., Zeng, J., & Shi, B. (2018). Effective thermal conductivity of polymer composites: Theoretical models and simulation models. International Journal of Heat and Mass Transfer, 117, 358-374.*
16. *Material Data Sheet: Z-ABS. (acceso el 4 de Septiembre 2018). Disponible online: https://shop.turtlecreations.nl/amfile/file/download/file_id/1/product_id/326/*

Caracterización de materiales fabricados mediante tecnología FDM para aplicaciones de radiofrecuencia

Martín Iglesias, S.[1*], Muñoz Rebate, I.[1], León Calero, M.[1], Fernández Romero, S.[1], Poyatos Martínez, D.[1], Plaza Gallardo, B.[2] y Escot Bocanegra, D.[1]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) «Esteban Terradas», Ctra. de Ajalvir, km. 4,5, 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid). Correo electrónico: martinis@inta.es (SMI).

[2] Ingeniería de Sistemas para la Defensa (ISDEFE). Calle Beatriz de Bobadilla, 3. 28040 Madrid. Consultor externo en INTA. Correo electrónico: bplaza@isdefe.es (BPG).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: martinis@inta.es (SMI).

Resumen

La fabricación aditiva presenta numerosas ventajas, frente a técnicas tradicionales, para el desarrollo de diseños complejos y adaptados a la finalidad de la aplicación. La posibilidad de desarrollar estructuras multi-material e integrar componentes electrónicos supone un avance para el desarrollo de aplicaciones en el campo del electromagnetismo. Para beneficiarse de estas ventajas, es necesario investigar en profundidad el comportamiento de los diferentes materiales disponibles.

En esta comunicación, se presenta el estudio experimental mediante el cual se ha analizado una gran variedad de materiales empleados en la tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*). El objetivo de este estudio es conocer el comportamiento electromagnético de estos materiales. Las probetas fabricadas han sido analizadas mediante la técnica OECP (*Open-Ended Coaxial Probe*) proporcionando información sobre su permitividad eléctrica, a partir de la cual es posible obtener el coeficiente de transmisión. Los materiales con mejor comportamiento dieléctrico fueron sometidos a ensayos de transmisión en espacio libre en una cámara anecoica polivalente para medidas electromagnéticas, BIANCHA (*BIstatic ANechoic CHamber*), validando de este modo los resultados obtenidos con la sonda coaxial. Los ensayos realizados han proporcionado información relevante para el desarrollo de futuras aplicaciones en el ámbito de la radiofrecuencia (RF).

Palabras clave

Ingeniería aditiva, *fused deposition modeling*, radiofrecuencia, coeficiente de transmisión.

1. Introducción

La ingeniería aditiva es una tecnología que se encuentra aún en desarrollo pero que supone una gran oportunidad para la fabricación de estructuras complejas. Existen multitud de técnicas aditivas con ventajas diferenciales [1] clasificadas principalmente en función del estado del material que procesen [2]. Entre estas ventajas destacan el ahorro de material, y la reducción de tiempos de fabricación. Todo ello hace posible la producción de pequeñas series centradas en la aplicabilidad del componente. Entre las técnicas más destacadas se encuentra la tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*) [3], técnica donde cada vez más sectores encuentran oportunidades para la fabricación de piezas funcionales. En el ámbito de la radiofrecuencia (RF), la técnica FDM, se presenta como una tecnología prometedora debido al amplio abanico de materiales disponibles [4-7]. Mediante la utilización de polímeros de bajo coeficiente de transmisión se obtienen estructuras transparentes; por el contrario, el empleo de polímeros con cargas, hace posible la fabricación de, por ejemplo, circuitos, antenas o estructuras capaces de apantallar señales electromagnéticas. Este tipo de materiales se caracterizan por estar constituidos por un polímero base al que se le añade partículas de diferente naturaleza (por ejemplo cobre, grafeno o fibra de carbono). A esto hay que añadirle la capacidad de fabricar estructuras multi-material y la posibilidad de embeber componentes durante la fabricación [8]. Por ello, para poder seguir avanzando en esta línea de investigación es necesario conocer en profundidad el comportamiento electromagnético de los materiales en relación a las características asociadas a su fabricación.

En esta comunicación se ha realizado un estudio experimental para determinar las propiedades electromagnéticas de diferentes materiales empleados en la tecnología FDM. El estudio se ha dividido en dos fases. En la primera fase de ensayos, la técnica OECP (*Open-Ended Coaxial Probe*) permitió obtener medidas, desde 10 MHz hasta 20 GHz, del coeficiente de reflexión a partir del cual es posible calcular la permitividad y, por tanto, estimar el comportamiento del material en presencia de campos electromagnéticos. Posteriormente, se realizaron medidas del coeficiente de transmisión en espacio libre, en el rango de frecuencias de 1 GHz hasta 9 GHz, para obtener medidas más precisas del comportamiento dieléctrico de ciertos materiales. Estos ensayos se llevaron a cabo en una cámara anecoica polivalente denominada BIANCHA (*BIstatic ANechoic CHamber*), disponible en el laboratorio de detectabilidad del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Los resultados han proporcionado información para el desarrollo de futuras aplicaciones en estructuras transparentes en RF.

2. Materiales. Diseño y fabricación

En la primera fase del estudio se han fabricado un total de doce probetas cuadradas de 100 x 100 x 3 mm. El objetivo es obtener una primera aproximación de las propiedades electromagnéticas de los materiales. Posteriormente, para el análisis más detallado de los materiales que presentaban mejor comportamiento dieléctrico, ha sido necesario la fabricación de probetas de dimensiones de 200 x 200 x 10 mm, siendo estas más costosas en tiempo y cantidad de material necesario, pero más adecuadas para las técnicas de caracterización seleccionadas [9-12]. En la tabla 1 se muestra la nomenclatura utilizada para cada una de

las probetas, donde el número indica la dimensión del lado de la probeta. Como se puede observar, los materiales analizados se han clasificado en función de la presencia, o no, de cargas.

Material	**Fabricante**	**Código probeta**	**Material**	**Fabricante**	**Observaciones**	**Código probeta**
Z-ABS	ZORTRAX	ABS_100	Nylstrong	SmartFil	Nylon (PA6) + cargas de vidrio	NYL_100
Z-HIPS	ZORTRAX	HIPS_100 HIPS_200	FilaMETAL ALUMINIUM	FFFworld	PLA + cargas de aluminio (10%)	ALU_100
Z-PETG	ZORTRAX	PETG_100	Metal PLA Serie (Copper)	3R3D	PLA + cargas de cobre (5-10%)	CO_100
PC	Ultimaker	PC_100	Magnetic Iron PLA	Protoplant	PLA + cargas de hierro	IRON_100
PLA 3D850	SmartFil	PLA_N_100	Carbon Fiber PLA	Protoplant	PLA + cargas de fibra de carbono (15%)	CAR_100
PLA	SmartFil	PLA_B_100 PLA_B_200	Conductive Graphene Filament	Graphene 3D Lab	PLA + cargas de grafeno	GRA_100

Tabla 1. Nomenclatura de probetas

Se debe tener en cuenta que los materiales empleados estaban disponibles en diferentes diámetros de filamento: 1,75 y 2,85 mm. Por ello, ha sido necesario utilizar dos impresoras diferentes: Raise3D N2 Plus y Ultimaker 3. A pesar de esto, todas las probetas fueron fabricadas con altura de capa 0,2 mm y relleno sólido (100 %). Esto último se debe a que el objetivo del estudio es caracterizar materiales, y no el comportamiento de la estructura interna [13]. Cabe destacar que la temperatura y velocidad de extrusión, así como la temperatura de la cama, han sido modificadas en base a las recomendaciones del fabricante de cada material impreso. Por otro lado, para poder obtener un buen acabado superficial, la extrusión de material se realizó con boquillas de 0,4 mm. Además, las probetas fueron fabricadas con *raft* para mejorar la adhesión a la cama y eliminar imperfecciones debidas a la misma. Finalmente, aquellos materiales con acabado superficial más rugoso han sido lijados para mejorar su contacto con la sonda del método de medida OECP. Las probetas fabricadas para los diferentes ensayos se pueden observar en la figura 1.

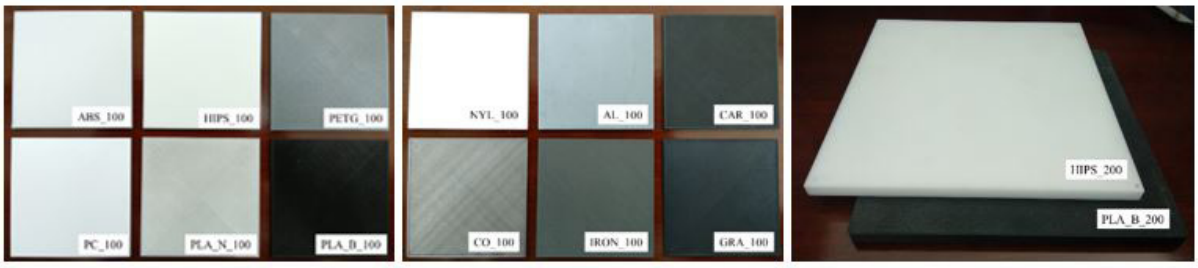


Figura 1. Probetas de dimensiones 100 x 100 x 3 mm para materiales sin cargas (izq.) y materiales con cargas (centro) y probetas de dimensiones 200 x 200 x 10 mm (dcha.).

3. Técnicas de medida

3.1. Open-ended coaxial probe (OECP)

Existen diferentes técnicas de caracterización electromagnética de materiales y la elección de una u otra depende de cada estudio concreto. Para obtener una primera aproximación de las propiedades de

los materiales seleccionados, se llevaron a cabo una serie de medidas empleando una sonda coaxial abierta [10]. El método OECP consiste en una sección transversal de una línea coaxial donde los parámetros dieléctricos del material se obtienen mediante la medida de la energía reflejada. Esta técnica es más adecuada para líquidos o semisólidos homogéneos, ya que la sonda y el material deben estar en contacto en toda la superficie sin dejar burbujas de aire que puedan falsear la medida y porque la sonda considera el medio que está midiendo como infinito. Sin embargo, también es posible medir placas sólidas de material siempre y cuando estas tengan un espesor semi-infinito. Por tanto, para cumplir con estas restricciones asumimos que los materiales a medir son homogéneos y, además, colocamos una placa metálica en la parte posterior del material, de modo que si la medida no se ve alterada cuando colocamos y quitamos esta placa, se puede considerar que el material es semi-infinito y se están cumpliendo las especificaciones de la sonda OECP. La figura 2 muestra como ejemplo la probeta PLA_B_200 medida con el método OECP.

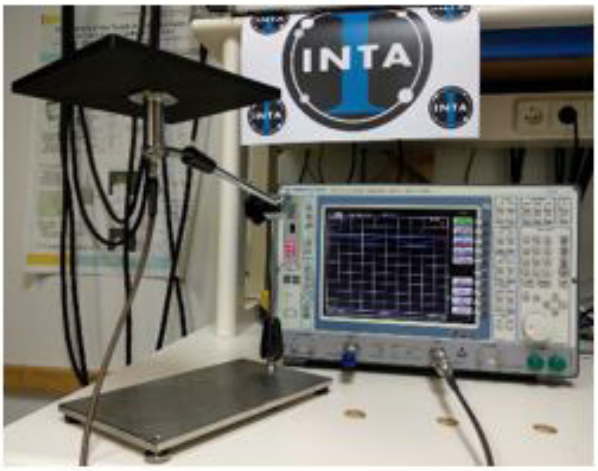


Figura 2. Probeta PLA_B_200 medida con OECP.

3.2. Medidas de coeficiente de transmisión en espacio libre

El INTA posee en las instalaciones del Laboratorio de Detectabilidad una cámara anecoica polivalente denominada BIANCHA (*Bistatic ANechoic CHAmber*) capaz de realizar medidas de transmisión y reflexión en espacio libre. Este tipo de medidas se caracterizan por ser no destructivas y sin contacto, y pueden servir de base para la extracción de las propiedades electromagnéticas de los materiales bajo prueba en un amplio ancho de banda [11]. Cabe destacar que en este tipo de medidas los materiales pueden ser heterogéneos a lo largo de su estructura, lo que es una ventaja a tener en cuenta a la hora de medir muestras obtenidas mediante fabricación aditiva. Esta cámara está formada por una mesa rotatoria de doble eje en acimut y dos brazos elevados, de manera que el conjunto puede establecer un escáner esférico y biestático. En los extremos de ambos brazos se colocan dos sondas de medida, las cuales se podrán situar en cualquier punto de una semiesfera imaginaria, pudiéndose así lograr cualquier combinación de ángulos entre las mismas y el objeto a medir [12]. Aunque BIANCHA es capaz de medir en cualquier combinación biestática de ángulos y en ella se pueden hacer ensayos de extracción de parámetros constitutivos basados en [11], en este caso de estudio es suficiente con medir la energía transmitida a través del material. El procedimiento de medida para la extracción del coeficiente de transmisión se realiza mediante un analizador vectorial de redes o VNA (*Vector Network Analizer*). La figura 3 muestra la probeta PLA_B_200 situada en vertical en el centro de la cámara con ambas antenas enfrentadas.

4. Resultados

4.1. OECP

Los resultados obtenidos con la técnica OECP pueden verse afectados por el acabado superficial. Por ello, se han medido ambas caras de las probetas en todos los casos. Como ejemplo, la figura 4 muestra las medidas de permitividad obtenidas con ABS (ABS_100) para ambas caras de la probeta (F1 y F2). Se ha observado que, la diferencia en los resultados entre caras es de pocas décimas (< 0,1) estando dentro del rango de error de la técnica. Para poder realizar una primera comparación entre los materiales seleccionados, se ha calculado el valor medio de la parte real de la permitividad (ε') entre 500 MHz y 3 GHz. Esto se debe a que los valores a bajas frecuencias no son representativos, ya que no se disponen de esos datos para el material de referencia (teflón). Finalmente, se ha calculado la media entre los valores medios de cada cara.

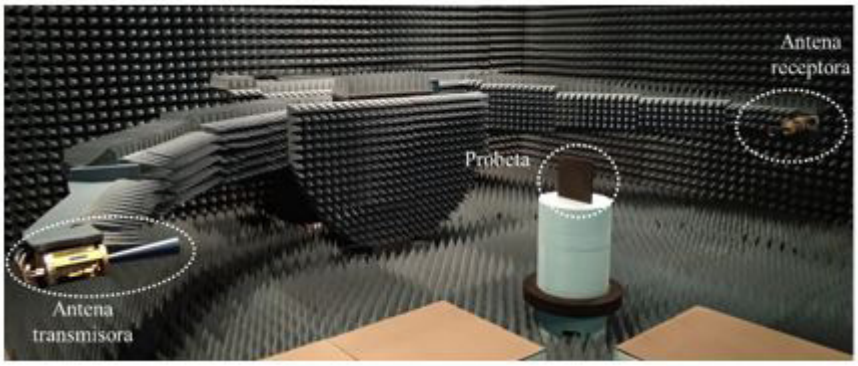


Figura 3. Probeta PLA_B_200 en BIANCHA.

En la figura 5 se ha representado el valor medio de la permitividad y la tangente de pérdidas obtenidos para cada grupo de materiales.

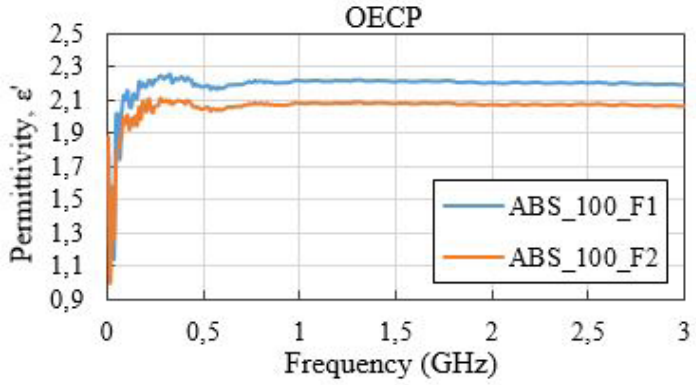


Figura 4. Medidas de permitividad para ambas caras de la muestra ABS_100.

La tabla 2 muestra, en detalle, los valores medios de la permitividad y la tangente de pérdidas obtenidos durante los ensayos. Como se observa, el HIPS (HIPS_100, ε'=2,0), el PLA (PLA_B_100, ε'=2,2), el PLA 3D850 (PLA_N_100, ε'=2,2) y el ABS (ABS_100, ε'=2,1) presentan los valores más bajos de permitividad, siendo interesantes para la fabricación de estructuras transparentes en RF.

Los valores más altos de la permitividad se corresponden con el PLA con cargas de fibra de carbono (CAR_100, ε'=6,2) y con cargas de grafeno (GRA_100, ε'=17,0), siendo el valor de este último similar al obtenido en otros trabajos [14]. Estos materiales podrán ser tenidos en cuenta para posibles aplicaciones de apantallamiento electromagnético o fabricación de estructuras radiantes como las FSS (*Frequency Selective Surfaces*). Finalmente, es interesante comentar que el PLA con cargas de cobre (CO_100, ε'=2,1) tiene un comportamiento muy similar al PLA, esto puede deberse a que la cantidad de partículas de cobre es muy reducida y, por tanto, insuficiente para modificar las propiedades del material.

Código probeta	ε'	tan δ	Código probeta	ε'	tan δ
ABS_100	2,1	0,0050	NYL_100	2,5	0,012
HIPS_100	2,0	0,0053	ALU_100	3,6	0,0054
PETG_100	2,4	0,0110	CO_100	2,1	0,0068
PC_100	2,4	0,0110	IRON_100	2,9	0,0061
PLA_N_100	2,2	0,0053	CAR_100	6,2	0,0050
PLA_B_100	2,2	0,0070	GRA_100	17,0	0,077

Tabla 2. Valores medios de permitividad y tangente de perdidas medidos con OECP

Una vez realizada esta caracterización preliminar, se realizó una segunda fase de ensayos con el objetivo de obtener información más precisa de los materiales que presentaban valores más bajos de permitividad y tangente de perdidas (HIPS, ABS, PLA y PLA 3D850). Finalmente, se decidió fabricar probetas de 200 x 200 x 10 mm de PLA, por su amplia utilización en la técnica FDM, y de HIPS por ser el material que presenta mejor comportamiento dieléctrico. La figura 5 muestra los valores de permitividad y tangente de pérdidas obtenidos durante los ensayos de OECP para un rango de frecuencias entre 0,2 a 20 GHz. En ellas se puede observar un comportamiento estable a lo largo del amplísimo rango de frecuencias estudiado. Las variaciones que presenta el PLA pueden asumirse como despreciables, ya que entran dentro del intervalo de error de medida de la sonda.

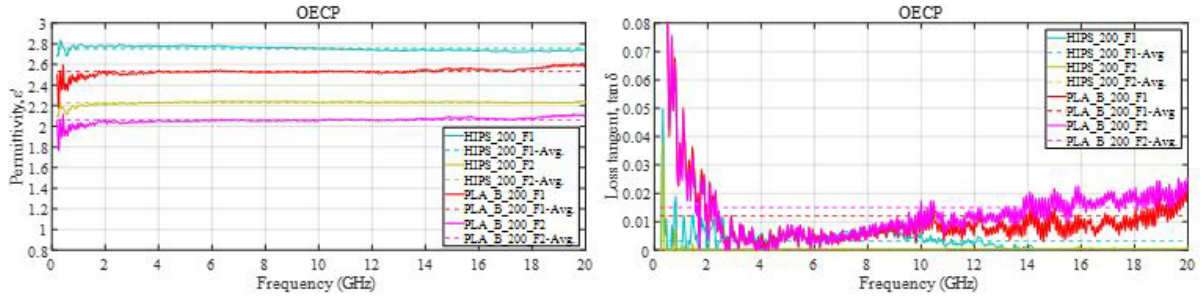


Figura 5. OECP: medidas de permitividad y tangente de pérdidas en probetas de 200 x 200 mm.

En la figura 6 se ha representado una estimación del coeficiente de transmisión [15] a partir de las medidas obtenidas con la técnica OECP para las muestras de PLA y HIPS. Los valores obtenidos a partir de las medidas realizadas con la técnica OECP indican valores de transmisión inferiores a -1,2 dB en el rango de frecuencia medido (de 0,2 a 20 GHz), lo que significa que estos materiales son atractivos para la fabricación de estructuras transparentes.

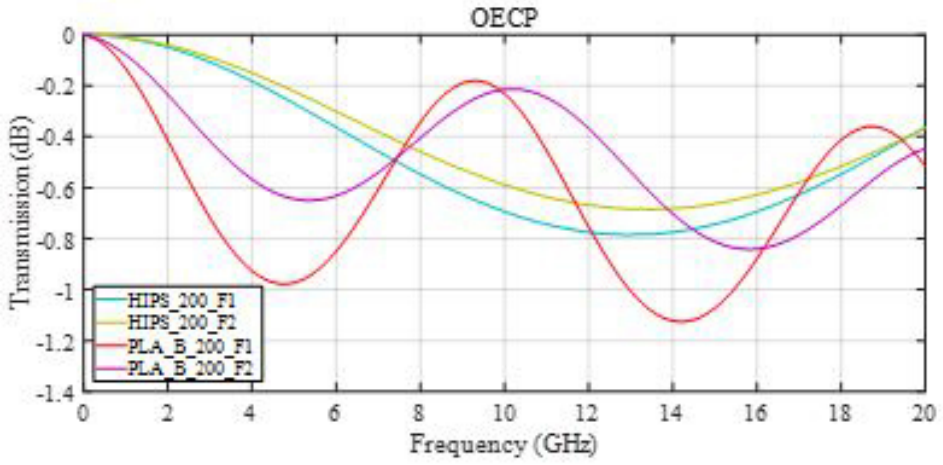


Figura 6. OECP: estimación del coeficiente de transmisión en probetas de 200 x 200 mm.

4.2. Medidas de coeficiente de transmisión en espacio libre

Para contrastar los resultados de transmisión teóricos obtenidos y validar el proceso de extracción de permitividad empleado, se ha medido el coeficiente de transmisión de varias probetas de distintos materiales en BIANCHA (figura 7). En este caso el rango de frecuencias analizado está comprendido entre 1,5 GHz y 9 GHz por disponibilidad de sondas de medida. Los resultados obtenidos en BIANCHA muestran valores del coeficiente de transmisión dentro del error de medida de la instalación (<1 dB) en todo el rango de frecuencia analizado, coincidiendo con los valores obtenidos por el método OECP. En cuanto a la polarización, ninguna muestra se ve afectada por las polarizaciones VV y HH. Por tanto, se puede concluir que el material presenta un comportamiento homogéneo electromagnéticamente hablando y no se ve afectado por la direccionalidad de la extrusión durante la fabricación para esta aplicación concreta.

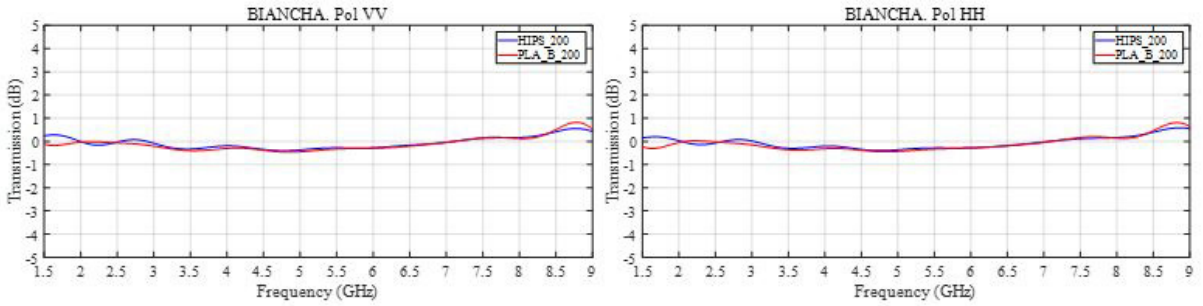


Figura 7. BIANCHA: medidas del coeficiente de transmisión.

5. Conclusiones

En esta comunicación se ha presentado un estudio experimental para el análisis del comportamiento electromagnético de diferentes materiales empleados en fabricación FDM. Este estudio se ha llevado a cabo debido al interés de fabricar estructuras multi-material de aplicación en RF. Los materiales ensayados se han dividido en dos grupos en función de la presencia, o no, de partículas de distinta naturaleza. La metodología incluye una primera fase de medición con la técnica OECP para obtener la permitividad y la tangente de pérdidas de los materiales, donde se observó que el HIPS, el ABS, el PLA y el PLA 3D850 presentaban los valores más bajos de permitividad. Para el caso de materiales cargados, se observó que el PLA con fibra de carbono y con grafeno, presentaban los valores más altos de permitividad. El interés por fabricar estructuras transparentes en RF dio lugar al desarrollo de la segunda fase de ensayos. En esta fase se realizó un estudio más profundo del comportamiento del PLA, por su amplia utilización en FDM, y del HIPS por ser el material que presenta mejor comportamiento dieléctrico. Los coeficientes de transmisión obtenidos para estos materiales demostraron la viabilidad para la fabricación de estructuras transparentes en RF. Los ensayos realizados abren una línea interesante para futuras investigaciones con diferentes aplicaciones en RF. Teniendo en cuenta la heterogeneidad de los materiales durante su fabricación sería conveniente el estudio de su comportamiento analizando diferentes patrones de relleno, permitiendo así ahorro de material y reducción de peso. Por otro lado, la investigación del comportamiento de materiales que incluyen cargas podría permitir el desarrollo de aplicaciones de apantallamiento electromagnético o fabricación de estructuras radiantes como las FSS (*Frequency Selective Surfaces*).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (MEIC) bajo el marco del proyecto UAVE3 (TEC2016-79214-C3-1-R) y MAP MARS (ESP2015-70184-R).

Referencias

1. *Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering.*
2. *Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing-An Overview. Materials Today: Proceedings, 5(2), 3873-3882.*
3. *Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. Advances in Manufacturing, 3(1), 42-53.*
4. *Viskadourakis, Z., Vasilopoulos, K. C., Economou, E. N., Soukoulis, C. M., & Kenanakis, G. (2017). Electromagnetic shielding effectiveness of 3D printed polymer composites. Applied Physics A, 123(12), 736.*
5. *Flowers, P. F., Reyes, C., Ye, S., Kim, M. J., & Wiley, B. J. (2017). 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament. Additive Manufacturing, 18, 156-163.*
6. *Mirzaee, M., & Noghanian, S. (2017, July). 3D printed antenna using biocompatible dielectric material and graphene. In Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017 IEEE International Symposium on (pp. 2543-2544). IEEE.*
7. *Sanz-Izquierdo, B., & Parker, E. A. (2015, May). Frequency selective surfaces formed by partially metalising 3D printed shapes. In Antennas and Propagation (EuCAP), 2015 9th European Conference on (pp. 1-4). IEEE.*
8. *Pa, P., Larimore, Z., Parsons, P., & Mirotznik, M. (2015). Multi-material additive manufacturing of embedded low-profile antennas. Electronics Letters, 51(20), 1561-1562.*
9. *DAK-3.5/12 from Schmid & Partner Engineering AG (SPEAG). (acceso el 1 de Agosto 2018). Disponible online: https://speag.swiss/products/dak/dielectric-measurements/*
10. *De Langhe, P., Martens, L., & De Zutter, D. (1994). Design rules for an experimental setup using an open-ended coaxial probe based on theoretical modelling. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 43(6), 810-817.*
11. *Ghodgaonkar, D. K., Varadan, V. V., & Varadan, V. K. (1989). A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies. IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 38(3), 789-793.*
12. *Escot, D., Poyatos, D., Aguilar, J. A., Montiel, I., González, I., & De Adana, F. S. (2010). Indoor 3D full polarimetric bistatic spherical facility for electromagnetic tests. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 52(4), 112-118.*
13. *Massoni, E., Silvestri, L., Bozzi, M., Perregrini, L., Alaimo, G., Marconi, S., & Auricchio, F. (2016, July). Characterization of 3D-printed dielectric substrates with different infill for microwave applications. In Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), 2016 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on (pp. 1-4). IEEE.*
14. *Xie, Y., Ye, S., Reyes, C., Sithikong, P., Popa, B. I., Wiley, B. J., & Cummer, S. A. (2017). Microwave metamaterials made by fused deposition 3D printing of a highly conductive copper-based filament. Applied Physics Letters, 110(18), 181903.*
15. *Kozakoff, D. J. (2010). Analysis of radome-enclosed antennas. Artech House.*

Proyecto I+D CMB «protección balística: cálculo y aplicación de nuevos materiales en buques»

Torti Blanes, Francisco[1,*], García Sanchéz, Esther[2], teniente coronel López Martínez, José Luís[3], comandante Martínez Thomas, Luis[4], subteniente Paredes Sancho, Oscar Jesús[5], subteniente Contreras Martín, Javier Manuel[6].

[1] Navantia-Dirección de Operaciones y Negocios. Astillero Bahía de Cádiz, San Fernando. Ingeniería. Estructura. ftorti@navantia.es (FT).

[2] Navantia-Dirección de Ingeniería y Desarrollo de Producto y Procesos. Madrid. Ingeniería conceptual. Arquitectura naval. Estructura. egarciasa@navantia.es (EG).

[3] INTA- SDG. Sistemas Terrestres. Campus la Marañosa área de Ensayos Balísticos y Medioambientales. Departamento de sistemas de Armas y Balística. lopezmajl@inta.es (JL).

[4] INTA- SDG. Sistemas terrestres. Campus la Marañosa área de Modelado y Simulación. Departamento de sistemas de Armas y Balística. martineztl@inta.es (LM).

[5] INTA- SDG. Sistemas Terrestres. Campus la Marañosa área de Ensayos Balísticos y Medioambientales. Departamento de sistemas de Armas y Balística. paredessoj@inta.es (OP).

[6] INTA- SDG. Sistemas Terrestres. Campus la Marañosa área de Modelado y Simulación. Departamento de sistemas de Armas y Balística. contrerasmjm@inta.es (JC).

* Autor principal y responsable del trabajo

Resumen

NAVANTIA trabaja en un proyecto interno I+D llamado «Protección balística. Cálculo y aplicación de nuevos materiales en buques desde hace 3 años». El reto tecnológico principal al que hace frente este proyecto es el de crear un procedimiento actual de cálculo de la protección balística, orientado a los nuevos tipos de amenazas y reglamentaciones actuales. Por otro lado, adquirir conocimiento y la tecnología para la aplicación de distintos materiales para la protección de espacios sensibles. El proyecto se ha dividido en diez paquetes de trabajo y estos en tareas, con el objetivo de poder realizar una mejor gestión del I+D, los paquetes claves son los que están relaciones con las pruebas y sus resultados, ya que una vez se tengan resultados fiables se podrán implantar en buques de nuevas construcciones o ya existentes. El equipo técnico está formado por integrantes de distintos departamentos de NAVANTIA, realizando estudios con socios tecnólogos.

Palabras clave

Balística, munición, fragmentos, materiales.

1. Introducción

El Proyecto CMB («Protección balística. Cálculo y aplicación de nuevos materiales en buques») es un proyecto de I+D interno de NAVANTIA que comenzó en 2015 y se encuentra en pleno desarrollo.

Los objetivos principales del proyecto son:

1. Definir/optimizar soluciones metálicas/no metálicas y mixtas de protección balística y de fragmentos para buques militares considerando amenazas actuales.
2. Especificar el procedimiento de cálculo de la protección balística para los buques de superficies de acuerdo con las amenazas y reglamentaciones actuales.
3. Disponer de una alternativa fiable y actualizada a los procedimientos de cálculo actuales, de manera que podamos especificar formulaciones con los materiales en el mercado (aceros balísticos, materiales cerámicos, polietilenos, kevlar…) y con las amenazas actuales.

El objetivo de la ponencia es describir con carácter general las actividades realizadas hasta la fecha dentro del I+D junto con los modelos de colaboración establecidos con el INTA-SDG. Sistemas Terrestres «La Marañosa», lo que ha permitido desarrollar los objetivos del programa de una forma mucho más eficiente.

2. Desarrollo

El desarrollo del proyecto incluye las siguientes áreas:

1. Revisión de estándares y requisitos.
2. Análisis de la amenaza.
3. Elección de materiales.
4. Desarrollo de las especificaciones necesarias para la realización de pruebas balísticas.
5. Pruebas. Materiales metálicos, no metálicos y mixtos.
   Iniciadas en las instalaciones (INTA-SDG. Sistemas Terrestres «La Marañosa»).
6. Análisis de resultados. Materiales metálicos, no metálicos y mixtos.
7. Conclusiones de las pruebas balísticas realizadas.
8. Selección definitiva de los materiales metálicos y no metálicos. Sistema de fijación.
9. Análisis de sistemas de unión de materiales e integración en la estructura del buque.
10. Emisión de los procedimientos de trabajos.

3. Resultado y discusión

El proyecto se encuentra actualmente en desarrollo. Hasta la fecha se han cubierto parcialmente las actividades descritas en los puntos 1 a 7.

Concretamente, durante este año se han realizado las primeras pruebas en las instalaciones INTA-SDG. Sistemas Terrestres para soluciones de materiales metálicos, lo que nos ha permitido obtener las primeras conclusiones del estudio.

Las conclusiones definitivas del proyecto se determinarán en base a los resultados de las diferentes pruebas balísticas a desarrollar durante los próximos dos años. Estas pruebas cubrirán soluciones metálicas y no metálicas permitiendo validar los primeros resultados obtenidos y explorar nuevas soluciones.

Los resultados obtenidos se están recogiendo en diferentes informes, que tiene difusión limitada, por lo que no pueden incluirse en este documento. Se comentarán dichos resultados de forma general sin entrar en la definición de soluciones concretas.

Figura 1. Momento de impacto.

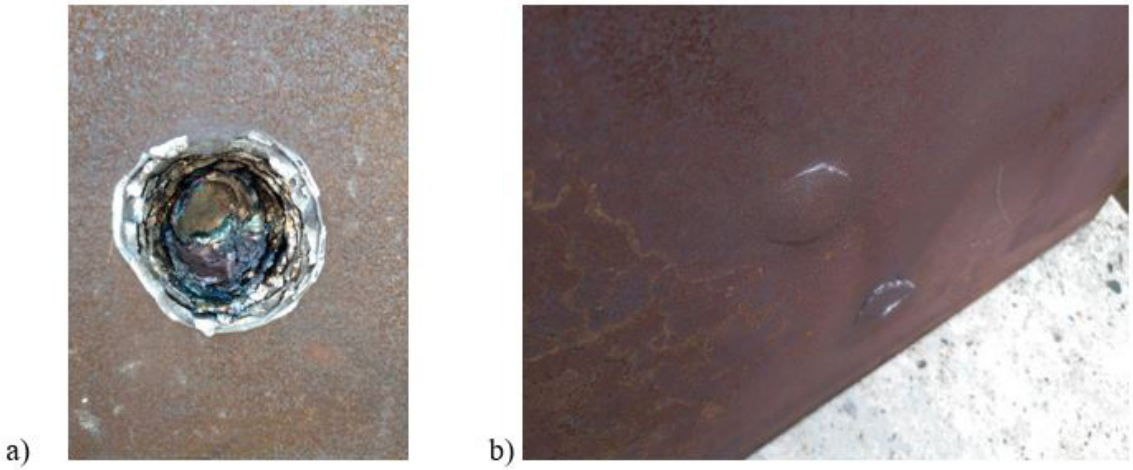


Figura 2. Planchas de metal tras la realización de pruebas balísticas con fragmentos.

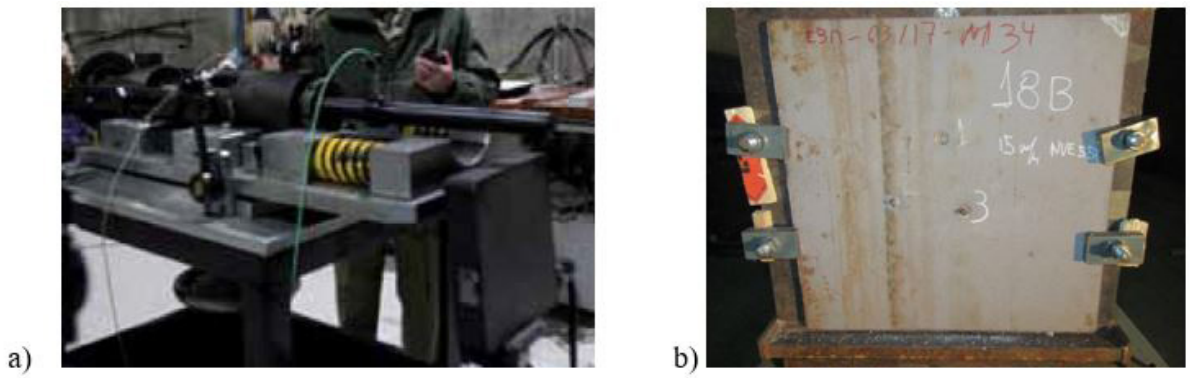


Figura 3. Planchas de metal tras la realización de pruebas balísticas con munición.

4. Conclusiones

El I+D en desarrollo por NAVANTIA en colaboración con el INTA-SDG. Sistemas Terrestres «La Marañosa» permitirá definir/optimizar soluciones metálicas/no metálicas y mixtas de protección balística y de fragmentos en buques militares considerando amenazas actuales.

Agradecimientos

Agradecer al personal del INTA-SDG. SISTEMAS TERRESTRES su esfuerzo y trabajo durante este proceso.

Referencias

1. *STANAG 4569.*
2. *MIL-STD-662 F.*

Aplicaciones de grafeno en defensa

Bustero, Izaskun[1,*], Obieta, Isabel[1], Bilbao, Leire[1] y Gaztelumendi, Idoia[1]

[1] Tecnalia. Parque Tecnológico de San Sebastián, Mikeletegi Pasalekua, 2. E-20009 Donostia-San Sebastián - Gipuzkoa (Spain).

Email: Izaskun.bustero@tecnalia.com (IB).

Email: Isabel.Obieta@tecnalia.com (IO).

Email: Leire.bilbao@tecnalia.com (LB).

Email: Idoia.Gaztelumendi@tecnalia.com (IG).

* Email:Izaskun.bustero@tecnalia.com: (IB).

Resumen

El grafeno es un material con una enorme potencialidad en aplicaciones para defensa. Tecnalia ha sido seleccionado por la Agencia de Defensa Europea para realizar un estudio sobre el impacto de grafeno en defensa y uso dual. Una revisión y análisis de la bibliografía científica, patentes y proyectos más relevantes sobre el uso de grafeno para defensa ha sido realizado inicialmente para conocer el estado del arte y realizar un *roadmap* de grafeno.

Por otro lado, Tecnalia está evaluando materiales grafénicos actualmente disponibles comercialmente y/o en desarrollo con el objetivo de encontrar los materiales apropiados que cumplan los requerimientos necesarios para las aplicaciones seleccionadas. En este trabajo se presentarán los resultados de la evaluación de los materiales de grafeno con respecto a las siguientes variables físicas y los requerimientos objetivo:

- Conductividad eléctrica vs transparencia (recubrimientos superficiales de grafeno). Objetivo: T ≥80% y Rs≤10Ω/sq.
- Conductividad eléctrica (láminas de grafeno incorporadas en composites). Objetivo: Rs:100 Ω/sq - 1000Ω/sq con una tolerancia de ±5 %.
- Propiedades térmicas/mecánicas (adhesivos dopados con grafeno). Ensayos de conductividad térmica y resistencia de adhesión a la tracción a cizalla.

Palabras clave

Material, aplicaciones de grafeno, caracterización propiedades de grafeno, plataformas.

1. Introducción

El grafeno es un material con una enorme potencialidad en aplicaciones para defensa. Tecnalia ha sido seleccionado por la Agencia de Defensa Europea para realizar un estudio sobre el impacto de grafeno en defensa y uso dual. Una revisión y análisis de la bibliografía científica, patentes y proyectos más relevantes sobre el uso de grafeno para defensa ha sido realizado inicialmente para conocer el estado del arte y realizar un *roadmap* de grafeno.

Las principales aplicaciones del grafeno en defensa están relacionadas con propiedades como su alta resistencia mecánica, alta elasticidad y baja densidad. Materiales ligeros resistentes al impacto en combinación con multifuncionalidad (resistencia a la corrosión, disipación térmica…) tienen especial interés en plataformas:

- Protección frente a impactos balísticos y explosiones (blindajes pasivos).
- Reducción de la detectabilidad (camuflaje, superficies de absorción de radar…).
- Aligeramiento estructural (reducción del peso de las plataformas).

Otras aplicaciones están específicamente relacionadas con la alta conductividad eléctrica, transparencia óptica y flexibilidad intrínseca del grafeno (dispositivos electrónicos y optoelectrónicos: cámaras, antenas, sensores) y su alta superficie específica y fuerte influencia en las propiedades electrónicas de su alrededor (baterías, condensadores).

En este trabajo se presenta el análisis del estudio realizado, así como los resultados de la evaluación de materiales grafénicos actualmente disponibles comercialmente y/o en desarrollo con respecto a las siguientes variables físicas y los requerimientos objetivo:

- Conductividad eléctrica vs transparencia (recubrimientos superficiales de grafeno). Objetivo: T ≥80% y Rs≤10Ω/sq.
- Conductividad eléctrica (láminas de grafeno incorporadas en composites).
- Objetivo: Rs:100 Ω/sq - 1000Ω/sq con una tolerancia de ±5 %.
- Propiedades térmicas/mecánicas (adhesivos dopados con grafeno). Ensayos de conductividad térmica.

2. Desarrollo

2.1 Estado del arte: aplicaciones de grafeno en defensa

El estudio sobre el impacto de grafeno en defensa y uso dual realizado para la Agencia de Defensa Europea se ha llevado a cabo revisando y analizando la bibliografía científica, patentes y proyectos más relevantes en las siguientes áreas de aplicación (KA):

KA1: Dispositivos electrónicos y optoelectrónicos.

KA2: Sistemas flexibles: pantallas táctiles, antenas flexibles, textiles inteligentes, *wearables*.

KA3: energía: baterías, celdas fotovoltaicas, condensadores.

KA4: reducción de peso en sistemas de protección y balística: composites.

KA5: camuflaje: superficies de absorción radar, recubrimientos ópticos.

KA6: filtros/membranas (filtración de agua, separación de gases, desalinización, envases de comida y farmacéuticos).

KA7: aplicaciones biomédicas: grafeno como plataforma para liberación de fármacos y biosensores).

KA8: sensores: aplicaciones militares para detección de agentes químicos y explosivos.

2.2 Evaluación de materiales grafénicos

Tecnalia está evaluando materiales grafénicos actualmente disponibles comercialmente y/o en desarrollo con el objetivo de encontrar los materiales apropiados que cumplan los requerimientos necesarios para las aplicaciones seleccionadas. Diferentes materiales comerciales han sido seleccionados dependiendo de las propiedades a caracterizar:

Dispersiones de nanoplateles de grafeno (GNPs). Dispersiones de GNP facilitadas por Thomas Swan han sido depositadas mediante *spin-coating* sobre sustratos de vidrio. El efecto del número de capas depositadas sobre el sustrato en los valores de transmitancia y resistencia ha sido estudiado.

Láminas de grafeno no soportadas sobre sustratos. Láminas de óxido de grafeno (GO film Graphenea); láminas de GNP (Nanografi), *buckypapers* de nanotubos de carbono (CNT BP) fabricados en Tecnalia. La conductividad eléctrica y la compatibilidad con estructuras de composite han sido estudiadas.

Adhesivo dopado con grafeno. La resina epoxy bicomponente (Eccobond 55) ha sido dopada con GNP de las empresas Thomas Swan, Avanzare entre otras, con el objetivo de analizar el efecto de grafeno en la conductividad térmica de la resina y en las propiedades mecánicas.

Composites de grafeno. Las láminas de grafeno han sido integradas en una resina epoxi aplicando 2 capas de resina líquida sobre los mismos. Las muestras han sido curadas en un horno con el siguiente ciclo de curado 90 min@90ºC + 120 min@120ºC.

Las metodologías utilizadas para las medidas de conductividad y transmitancia han sido establecidas en Tecnalia:

- La resistividad de la lámina se ha medido mediante el método de 4-puntas Van der Pauw (Keithley 2410).
- La transmisión de luz se ha medido con el espectrofotómetro UV-vis-NIR modelo Jasco V670.
- Propiedades térmicas/mecánicas (adhesivos dopados con grafeno). La conductividad térmica de las muestras curadas se ha medido con el quipo Hot Disk Analyser TPS 2500 S. Las propiedades mecánicas de las uniones han sido caracterizadas mediante el ensayo de resistencia de adhesión a la tracción a cizalla, siguiendo la norma ISO 4587 en una máquina de ensayo Instron 5500R Universal a velocidad de 1,3 mm/min.

3. Resultados y discusión

3.1. Estado del arte y aplicaciones en defensa

El siguiente gráfico muestra la evolución de las publicaciones científicas de aplicaciones de grafeno en defensa.

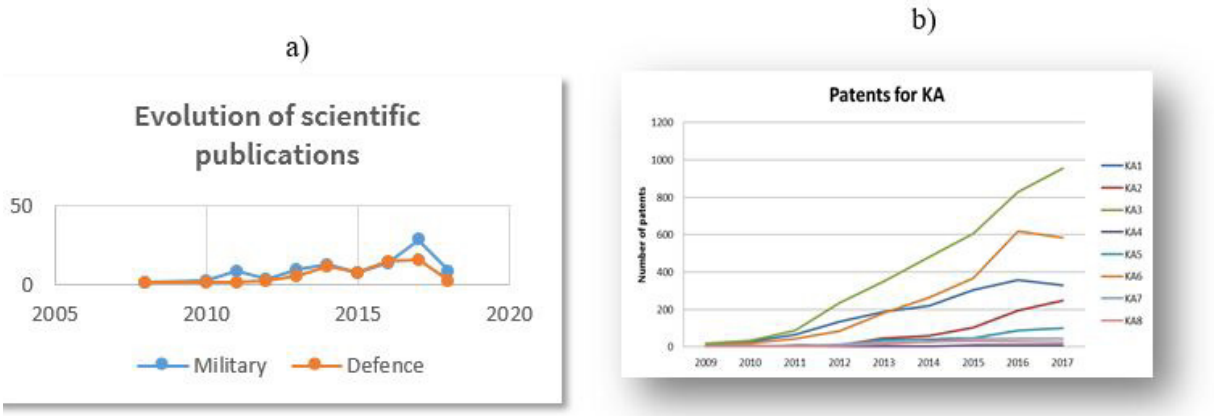


Figura 1. a) Evolución de las publicaciones científicas de aplicaciones de grafeno en defensa; b) Evolución de las patentes por cada área de aplicación (KA).

Algunos de los resultados relevantes del estudio:

- Han sido analizadas **8.800 patentes**: China (74 %), Korea (10 %) y US (8 %). En Europa el porcentaje encontrado es muy bajo (<1 %). Ninguna de ellas dedicada específicamente a aplicaciones militares.
- El mayor número de patentes ha sido encontrado en el **área de energía**, en particular, en aplicaciones de baterías. El grafeno en baterías y condensadores ya está en el mercado.
- No son fáciles de encontrar artículos específicos de aplicaciones militares, aunque se observa un aumento progresivo con los años, (la bajada en el 2018 se debe a que la búsqueda fue realizada durante el mes de marzo).
- Pocos **proyectos** específicamente orientados al uso de grafeno para defensa y subsistemas son públicos en Europa, US o China. Se pueden encontrar títulos e ideas en general, pero muchos de los resultados son confidenciales.
- **Comercialización:** cerca del 70 % del total de la capacidad de producción reside en China. Los precios también son, en general, más bajos en China. A pesar de la supremacía de China, Europa tiene suficientes proveedores para abastecer las necesidades actuales, por lo tanto, no hay un problema de dependencia estratégica.
- **Estandarización**: la falta de estándares internacionales bien establecidos ralentiza la comercialización de grafeno.

3.2. Evaluación de materiales grafénicos

3.2.1. Medidas de conductividad eléctrica vs transparencia (recubrimientos superficiales de grafeno)

Los valores objetivo que se buscan en este estudio para los materiales de grafeno depositados sobre sustratos son: T ≥80 % y Rs≤10Ω/sq. Hasta 50 capas de una dispersión de GNP han sido depositadas mediante *spin-coating* sobre un sustrato de vidrio, obteniéndose valores de resistencia en el rango de MΩ y valores de transmitancia que disminuyen de 88 % para 1capa a 63 % para 50 capas. Un análisis mediante microscopía óptica indica la presencia de aglomerados sobre la superficie del vidrio, lo que impide la formación de una capa homogénea de grafeno y por lo tanto, con buena continuidad entre los platelets. Para lograr estos valores tan exigentes, es necesario utilizar otras técnicas de deposición de grafeno, como *Chemical Vapor Deposition*. Tecnalia está estudiando en colaboración con Graphenea, la conductividad y transparencia de capas de grafeno depositadas mediante CVD.

3.2.2. Medidas de conductividad eléctrica y compatibilidad con composites (láminas de grafeno no soportadas)

Las muestras comerciales de Nanografi, los *buckypaper* fabricados en Tecnalia (CNT BP) y las muestras de GO film de Graphenea han sido perforados para facilitar la posterior impregnación con la resina. Los valores de porosidad de las láminas de Nanografi y Graphenea son bajos (13 % y 21 % respectivamente) frente al 45 % de los CNT BP.

Se ha medido la conductividad de 3 muestras (45 mmx 45mm) perforadas y 3 no-perforadas mediante el método de 4-puntas Van der Pauw.

Se han probado diferentes configuraciones de perforación para las muestras de Nanografi (3 muestras de cada tipo 45 mm x 45 mm) para seleccionar las mejores propiedades eléctricas manteniendo el nivel de perforación más alto que asegure una buena impregnación en la resina.

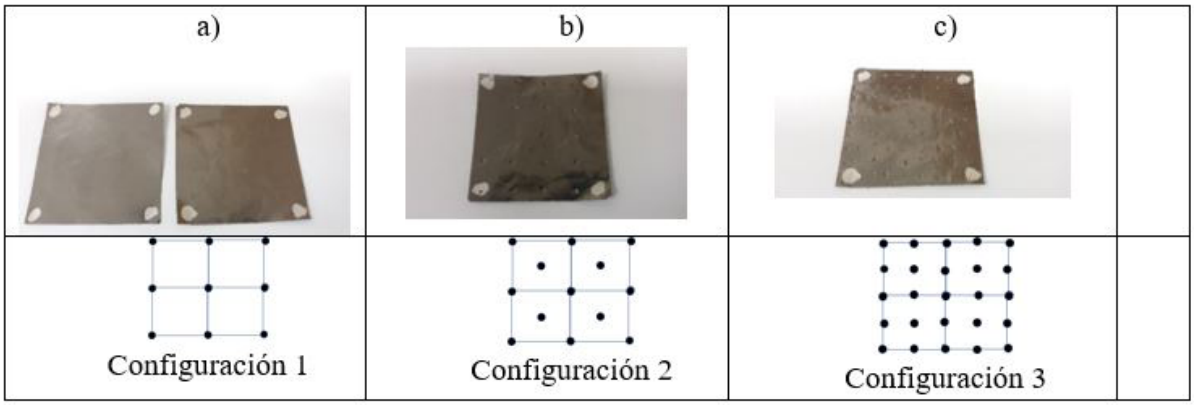


Figura 2. Muestras de Nanografi con diferentes configuraciones de perforación: a) configuración 1 espaciado de 10 mm; b) configuración 2; c) configuración 3.

Los valores de resistencia eléctrica de las muestras de Nanografi sin perforar varían entre 5,99E-2 y 6,50E-2 Ohm/sq y perforadas entre 6,46E-2 y 7,46E-2 Ohm/sq. Los valores de BP sin perforar varían entre 2,22 y 2,75 Ohm/sq y perforadas entre 2,30 y 2,62 Ohm/sq. Por último, los valores de las muestras de GO film de Graphenea se mueven entre valores de 87,0 y 116 Ohm/sq sin perforar y 93,0 y 163 Ohm/sq perforadas.

Por lo tanto, la perforación de las muestras no afecta significativamente a la resistencia eléctrica. En algunos casos se aprecia un ligero aumento de la resistencia, pero en general los valores se mantienen en el mismo rango con y sin perforación.

3.2.3. Integración de las láminas de grafeno en resinas

Los tres materiales grafénicos perforados Nanografi Sheet, (45 mm x 45 mm), CNT BP (70 mm x 70 mm) and GO film TT200ºC 18h (45 mm x 45 mm) se han integrado en una resina epoxi liquida (Resoltech 1800/1805).

3.2.3.1. Conductividad eléctrica

El valor de resistencia eléctrica obtenido con la muestra de composite de CNT BP en la resina 1800 es de **8,87 Ohm /sq**. Sin embargo, las muestras basadas en las láminas de Nanografi y las muestras de GO film de Graphenea presentan un valor de resistencia eléctrica muy alta.

3.2.3.2. SEM

Las muestras de composite de CNT BP en la resina 1800 fueron caracterizadas mediante microscopio electrónico de barrido (SEM). Las siguientes imágenes muestran un área detallada de un corte en sección de una muestra seca de CNT BP (a) donde se aprecia claramente la morfología del BP formada por

CNT interconectados aleatoriamente formando una red. En el caso de las láminas de Nanografi (b) se pueden observar los nanoplatelets de grafeno compactados.

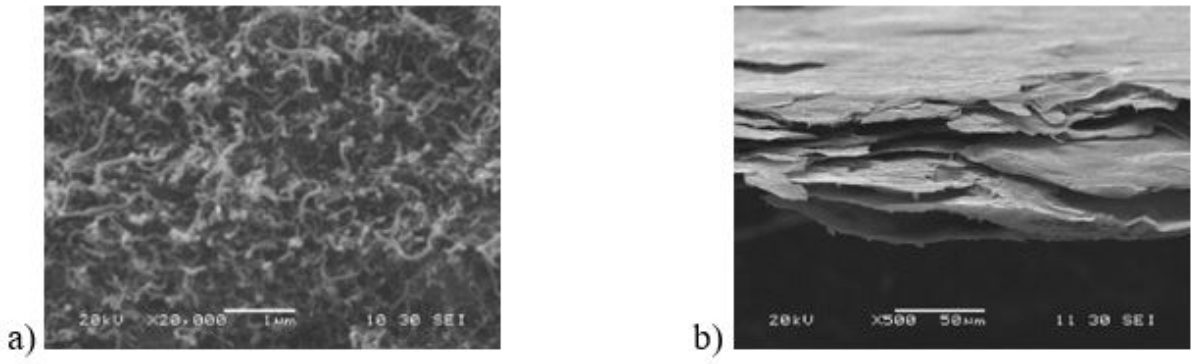


Figura 3. Muestra de CNT BP (a); Muestra de láminas de Nanografi (b).

La muestra CNT BP integrada en resina epoxy 1800/1805 presenta una buena impregnación tal como se observa en la sección de la muestra (figura 4).

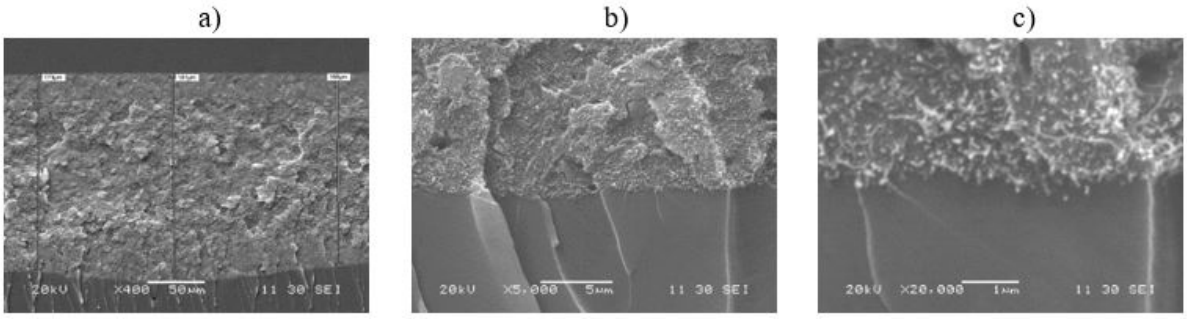


Figura 4. Muestra CNT BP integrada en resina epoxy 1800/1805.

Comparando estas imágenes con las de la muestra de BP de partida, se puede concluir que, en general, los BP están completamente impregnados por la resina epoxi. Los espacios entre los CNT en los BP (figura 3a) han sido ocupados por la resina.

Sin embargo, las láminas de Nanografi no han sido impregnadas por la resina tal como puede observarse en las siguientes figuras:

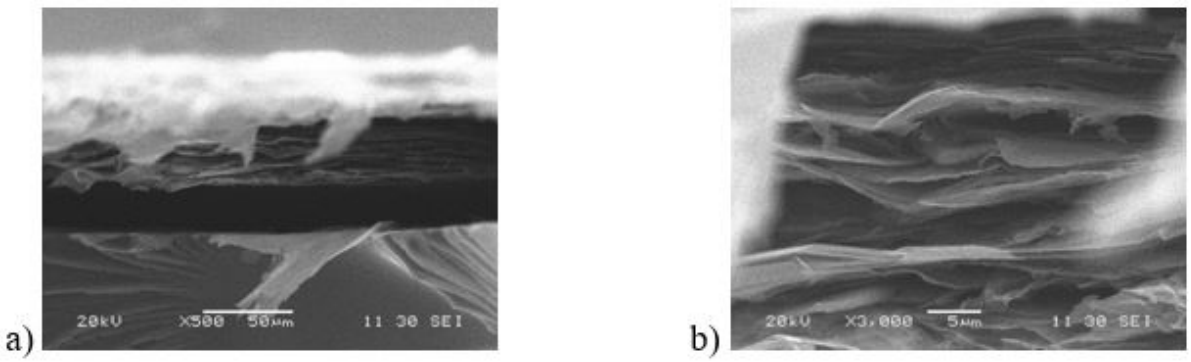


Figura 5. Muestra de láminas de Nanografi integrada en resina epoxy 1800/1805.

Las muestras de la figura 5 presentan un aspecto muy parecido al de la muestra de la lámina de Nanografi antes de impregnarla (fig. 3-b). La estructura tan compactada de las láminas de grafeno impide

la infiltración de resina entre ellas, por lo que la muestra no queda impregnada, sino que queda encapsulada en resina.

En el caso de la integración del GO film perforado en resina epoxy 1800/1805, la resina tampoco ha llegado a impregnar la lámina. Tal y como se observa en la siguiente figura, la resina no se ha introducido entre las capas de grafeno.

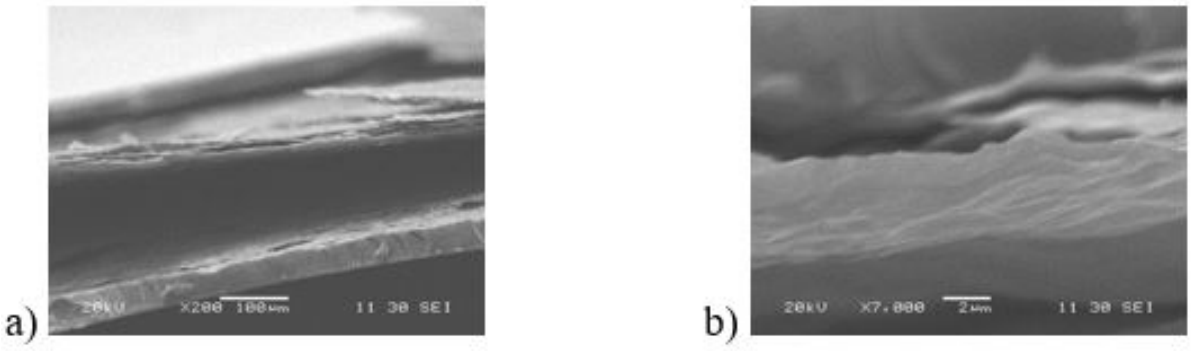


Figura 6. Muestra de láminas de GO de Graphenea integrada en resina epoxy 1800/1805.

3.2.4. Propiedades térmicas/mecánicas (adhesivo dopado con grafeno). Ensayos de conductividad térmica

La conductividad térmica del adhesivo comercial Eccobond 55 dopado con diferentes materiales grafénicos ha sido medida mediante Hot Disk Analyser. Los nanomateriales empleados han sido oxido de grafeno reducido rGO, GNPs de diferentes proveedores y grafeno modificado con grupos amina. El valor de referencia del adhesivo sin carga es 0,21K/Wm.

Referencia nanocarga	% peso	K (W/m·K)
rGO_G	7	0,42± 0,01
rGO_G	11	0,39± 0,00
GNP_T	7	0,45± 0,07
GNP_A	7	1,00± 0,07
GNP_A	11	1,25± 0,01
Graphene-NH_2	11	0,50 ± 0,01
Graphite_SA	7	0,45± 0,01
Graphite-SA	11	0,70± 0,03

Tabla 1. Valores de conductividad térmica de muestras de adhesivo Eccobond dopado con diferentes materiales grafénicos

Los resultados muestran cómo afecta tanto el tipo de nanomaterial como el porcentaje introducido en la resina. Así, para un mismo porcentaje de GNP (7 %) procedentes de distintos proveedores se han obtenido valores de conductividad diferentes. Los mejores resultados se han conseguido con un 11 % de GNP_A.

Para la realización de ensayos mecánicos se ha depositado el adhesivo (espesor 2 mm) sobre un sustrato de aluminio. Las probetas con la conformación de solape simple han sido curadas en horno (120ºC, 1 hour) y se han realizado los test mecánicos. Los resultados han sido comparados con el adhesivo comercial conductor Eccobond 285 que contiene una carga de alúmina del 50 %

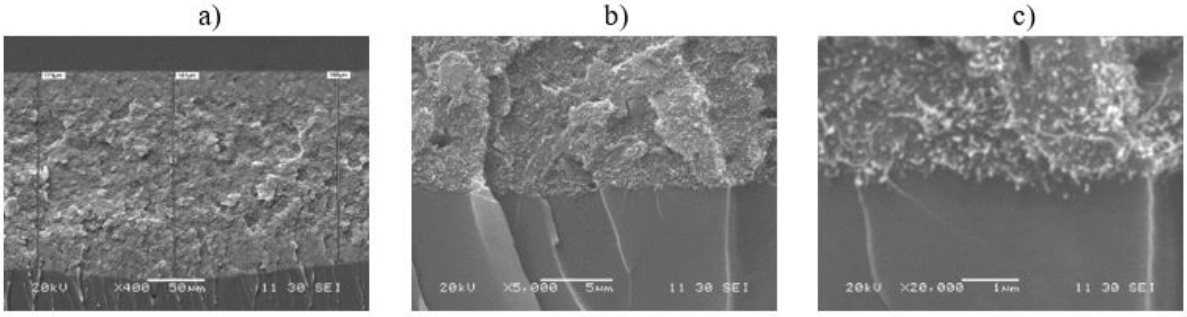


Figura 7. Muestra CNT BP integrada en resina epoxy 1800/1805.

La mejora lograda en resistencia y extensión con respecto al adhesivo comercial Eccobond 285 es pequeña, pero con la ventaja de que el porcentaje de nanocarga utilizada es del 11 % frente a un 50 % que contiene el adhesivo comercial. Además, se ha obtenido un resultado muy interesante respecto al modo de fallo, el adhesivo dopado con grafeno es cohesivo en lugar de adhesivo.

4. Conclusiones

El estudio del estado del arte de aplicaciones de grafeno en defensa muestra un predominio de los desarrollos de grafeno para uso dual frente a las aplicaciones propiamente de defensa. Entre las aplicaciones con mayor potencial se encuentran las de energía, baterías y condensadores. La reducción de peso en unidades de almacenamiento de energía es un factor clave en aplicaciones militares. El porcentaje total de patentes encontrado en Europa es muy bajo (<1 %) frente al 74 % de China.

Valores de T ≥80 % y Rs≤10Ω/sq para recubrimientos superficiales de grafeno tan exigentes no es posible obtenerlos a partir de dispersiones de GNP.

Para lograr una buena impregnación de láminas de grafeno en resina es preciso disminuir el grado de compactación de los nanoplatelets de grafeno y aumentar el grado de porosidad. A pesar de perforar las láminas para facilitar la impregnación de la resina, las láminas de Nanografi y de Graphenea han quedado encapsuladas en la resina en lugar de impregnadas. Los valores objetivo de resistencia 100 Ω/sq - 1000Ω/sq han sido ampliamente superados con los composites de CNT BP.

El adhesivo Eccobond 55 dopado con un 11 % de GNP_A ha incrementado el valor de conductividad térmica de 0,21 a 1,25K/Wm. Las propiedades mecánicas del adhesivo son ligeramente mejores con un porcentaje de nanocarga de GNP del 11 % frente a un 50 % de alúmina que contiene el adhesivo comercial. Además, el modo de fallo del adhesivo dopado con grafeno es cohesivo.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por la Agencia Defensa Europea EDA. Study on the Impact of Graphene on Defence Applications 17.ESI.OP.066.

Referencias

1 *Graphene batteries: introduction and market status http://www.graphene-info.com/graphene-batteries*

2 *Ojibabu P, Jagannatham M, PrathapHaridoss, Janaki Ram GD, Abhijit PD,Srinivasa RB., Effect of different carbon nano-fillers on rheological properties and lap shear strength of epoxy adhesive joints. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2016; 82:53–64.*

3C. Bases e instalaciones

Proyecto de adecuación y modernización de la BAE Gabriel de Castilla

Tte. Ing. Carreño Sanz, José Mª. Arquitecto. Ingeniero de Construcción y Electricidad.

Email: jmcsanz@gmail.com

Resumen:

El presente artículo forma parte del trabajo Fin de Máster del curso de obtención del título de Ingeniero de Construcción y Electricidad del MINISDEF, impartido en la Escuela Politécnica Superior del Ejército, durante los cursos 2016-2018.

Se trata de un proyecto de modernización de la actual BAE Gabriel de Castilla del E.T. en la isla Decepción, Antártida.

El proyecto completo de arquitectura, instalaciones y estructura se ha diseñado usando la metodología BIM (*Building Information Modeling*), siguiendo los cánones actuales de eficiencia energética y las exigencias que marca el Tratado Antártico, entre otros.

Palabras clave

Antártida, construcción, energía, BIM.

1. Introducción

1.1. Tratado Antártico (1)

Desde su entrada en vigor, el 23 de junio de 1961, 50 países lo han firmado, de los cuales 29 son partes consultivas (miembro de pleno derecho con voz y voto) y 21 son partes no consultivas (no participan en la toma de decisiones). España se adhirió al Tratado Antártico en 1982 y fue admitida como parte consultiva en 1988.

El Tratado es la base de varios acuerdos conexos que, junto con las medidas adoptadas en el marco del Tratado Antártico, forman lo que se denomina Sistema del Tratado Antártico.

1.2. Campaña Antártica (2)

La Campaña Antártica se desarrolla anualmente en la Base Antártica Española del Ejército de Tierra «Gabriel de Castilla» (BAE. Gdc.), situada en la isla Decepción (archipiélago de las islas Shetland del Sur) y en aquellos otros lugares del territorio antártico que se determinen, dentro del marco del apoyo del ET. Al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (MINECO) y al Comité Polar Español (CPE.) Para el desarrollo de la investigación antártica.

1.2.1. Enclave

La isla Decepción tiene forma de herradura con una apertura hacia el sudeste llamada «fuelles de Neptuno». Además, es un volcán activo, cuyas erupciones en los años 70 destruyeron dos bases antárticas, una chilena y otra británica.

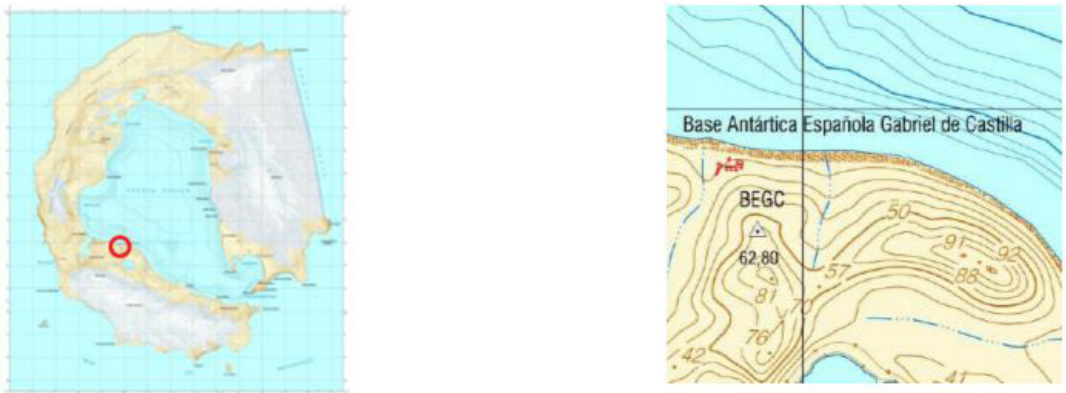


Figura 1. Situación BAE GdC, Isla Decepción, Antártida.

1.2.2. Condicionantes climáticos

La Antártida es el continente más frío. La temperatura más baja del mundo, -88,3°C, fue registrada el 24 de agosto de 1960, en la estación Vostok. Además, fuertes vientos azotan el continente. En el interior

se han registrado vientos de hasta 320 km/h. Estos vientos soplan en pendiente desde el interior hacia la costa y, combinados con las bajas temperaturas, crean peligrosas ráfagas de viento helado.

1.2.3. Vientos catabáticos

Un viento catabático es un viento que cae en el seno de una atmósfera estable, sea cual sea la causa que lo hace partir de un nivel más elevado. Estos vientos, particularmente cuando afectan a grandes regiones, se llaman vientos de otoño. Pueden soplar a más de 100 km/h.

1.3. BAE Gabriel de Castilla

La disposición de la actual base atiende a un modelo disgregado, acorde a la época en que se instaló. Los condicionantes actuales de exigencias de eficiencia energética imponen un replanteamiento del conjunto y aglutinar las zonas habitables mediante un modelo de base compacto y eficiente.

Figura 2. Vista General BAE GdC.

2. Propuesta arquitectónica

2.1. Diseño arquitectónico

El diseño de la nueva base propone una distribución radial de tres alas: *zona de vida*, *zona de trabajo* y *zona de instalaciones*. Todo ello articulado mediante un núcleo de comunicaciones de tres alturas que hace además de *zona común* y esparcimiento.

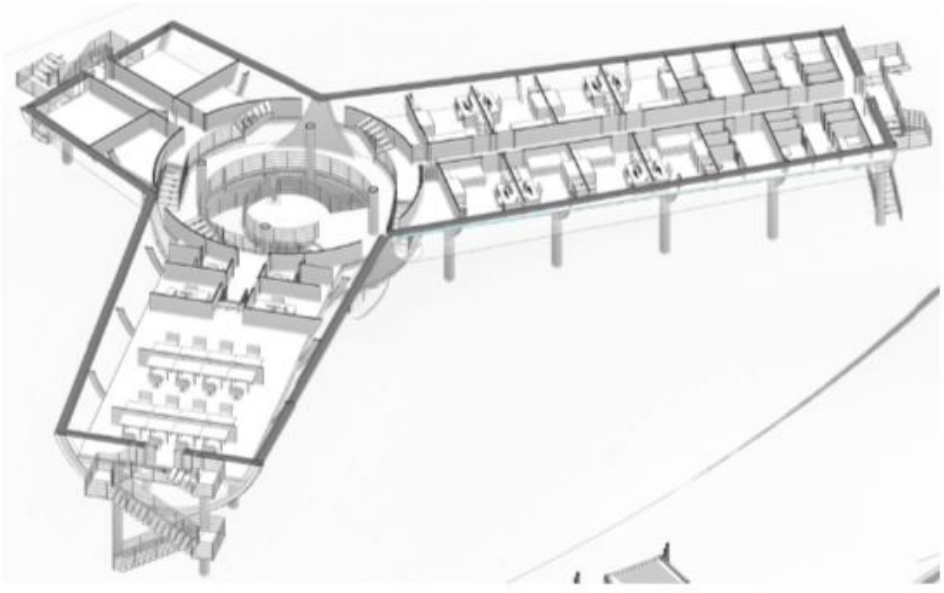


Figura 3. Nueva BAE GdC: planta baja.

Las características principales de la nueva base concuerdan con las de otras bases internacionales de reciente construcción: arquitectura elevada, envolvente hermética de perfil aerodinámico, sistemas constructivos industrializados y análisis exhaustivo del rendimiento energético.

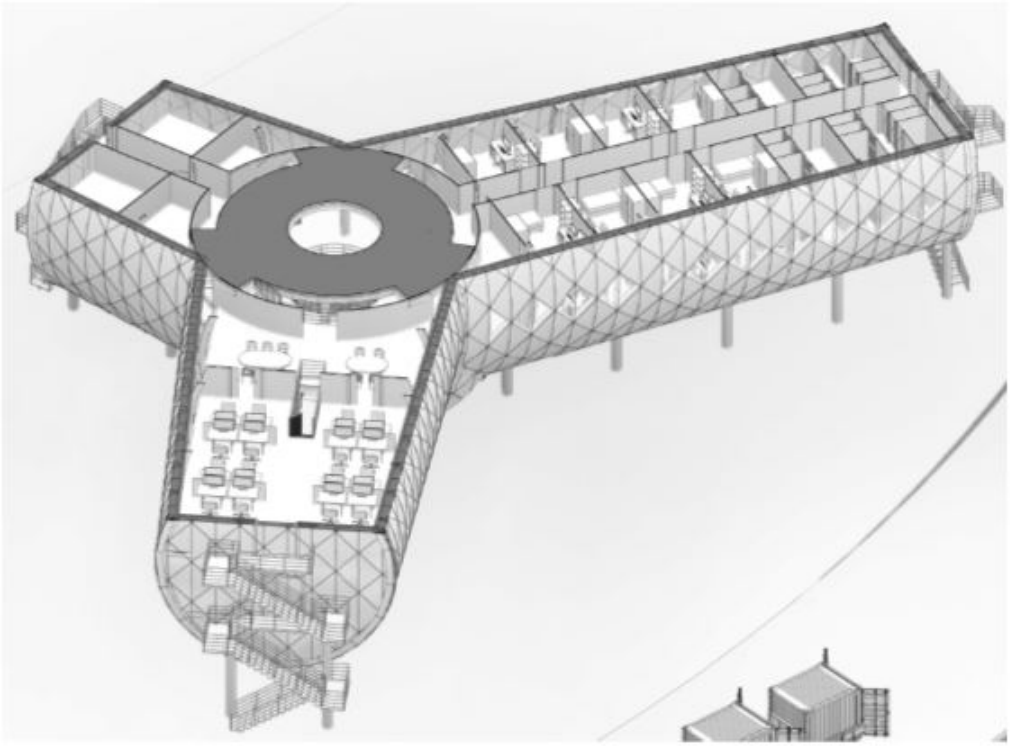


Figura 4. Nueva Bae GdC: planta primera.

Las alas se distribuyen en dos alturas, mientras que el núcleo de comunicaciones lo hace en tres. Esta disposición atiende a la necesaria adaptación de la edificación al terreno. La diferencia de cota entre el núcleo y las alas es de media altura de manera que el acceso principal a la base se ajusta al perfil del terreno, descendente este de sur a norte.

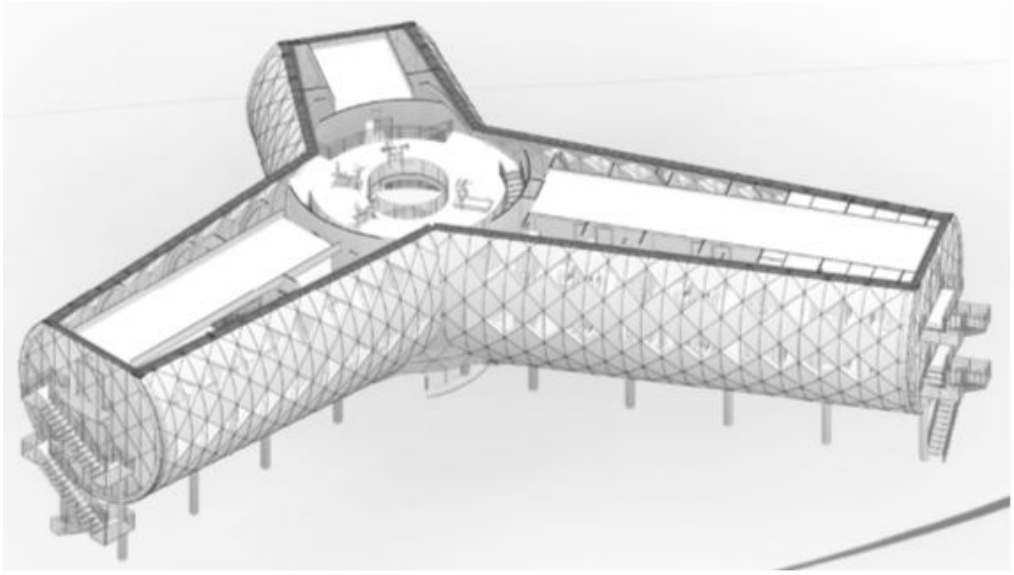


Figura 5. Nueva BAE GdC: planta segunda.

Núcleo de comunicaciones: este cuerpo consta de un acceso principal al edificio mediante una rampa. Desembarca en un hall-distribuidor desde el cual se puede acceder a las distintas alas así como subir a la zona de esparcimiento proyectada en la planta superior. Este espacio se proyecta de dimensiones adecuadas para favorecer la circulación y el encuentro distendido del personal destacado en la BAE.

Figura 6. Zona central; vista general (a) y sección (b).

Ala de zona trabajo: consta de dos plantas, dotadas de acceso independiente y a la vez comunicadas entre sí mediante escalera interior. En la parte superior se proyecta el módulo de transmisiones actualmente separado en módulo independiente. En la planta inferior los laboratorios. Las dos estancias pueden ser compartimentadas y climatizadas independientemente.

Figura 7. Zona de trabajo; sección (a) y vista planta primera (b).

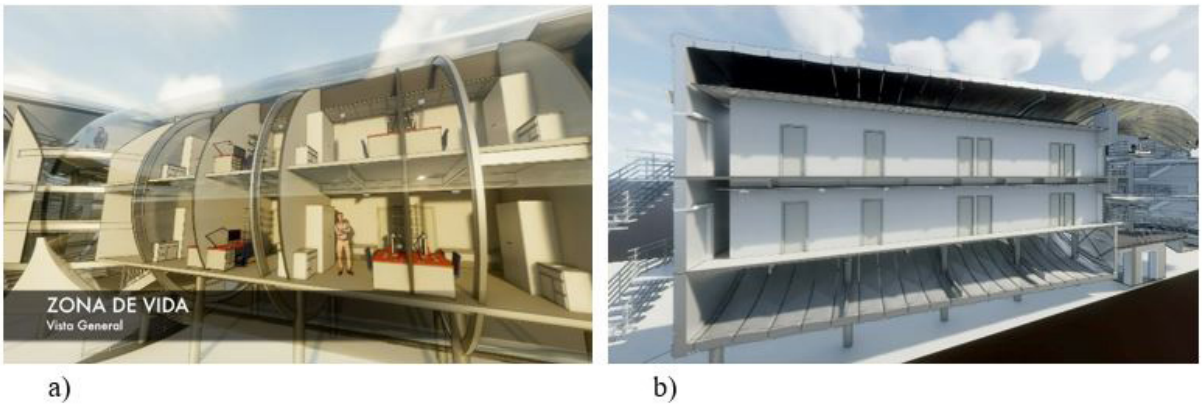
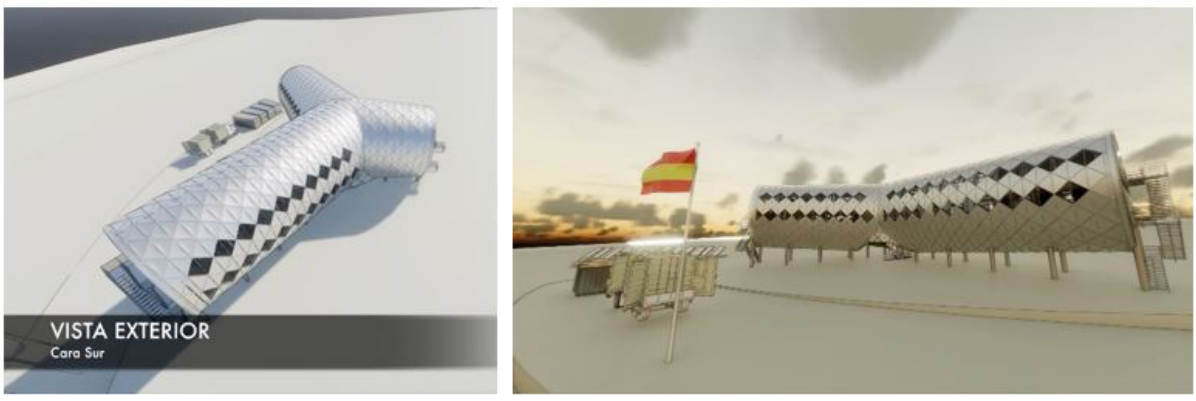


Figura 8. Zona de vida; vista (a) y sección (b).

Ala de zona de vida: dotada con capacidad para 16 usuarios distribuidos en dos plantas. Las camaretas están dotadas de cama de uso individual, estantería, escritorio y lavabo. Dispone de duchas, urinarios e inodoros de uso colectivo distinguido por sexo al final de la planta.

Figura 9. Sección por módulo de instalaciones y zona central.

Ala de zona de instalaciones: en este cuerpo se encuentran el conjunto de las instalaciones principales; sala de baterías, calderas, depósitos, grupos de bombas y electrógenos.



a) b)

Figura 10. Vista general; cara sur (a) y cara norte (b).

2.2. Envolvente

La envolvente se realiza a base de paneles totalmente prefabricados. Al ser el edificio de perfil circular, los paneles, de curvatura constante, son iguales facilitando y reduciendo el material de repuesto. Son paneles multicapa compuestos por doble barrera de vapor, doble capa de aislamiento y panel de madera hidrófugo interior y acabado en aluminio exterior.

Los paneles transparentes están compuestos por cuádruple acristalamiento acústico de baja emisividad.

Se ha comprobado la envolvente mediante simulación ante condicionantes adversos (-2ºc, 80 % humedad) garantizando la inexistencia de condensaciones tanto interiores como intersticiales.

Gracias al estudio detallado de la envolvente y comportamiento térmico del edificio, la demanda de energía según CTE con respecto a edificio de referencia según norma, es inferior al 70 %, cumpliendo por tanto con los objetivos marcados de edificio energía cero, o *net-zero energy building* (NZEB).

2.3. Análisis de viento

Gracias a la tecnología BIM mediante la cual se ha realizado el presente proyecto, se ha realizado utilizando un *software* especializado, el análisis de resistencia al viento. Se puede apreciar claramente cómo el edificio proyectado ofrece mucha menos resistencia, mejorando por tanto el rendimiento de los materiales, reduciendo las pérdidas por transferencia de calor y reduciendo al mínimo las zonas de remanso susceptibles de acumulación de nieve.

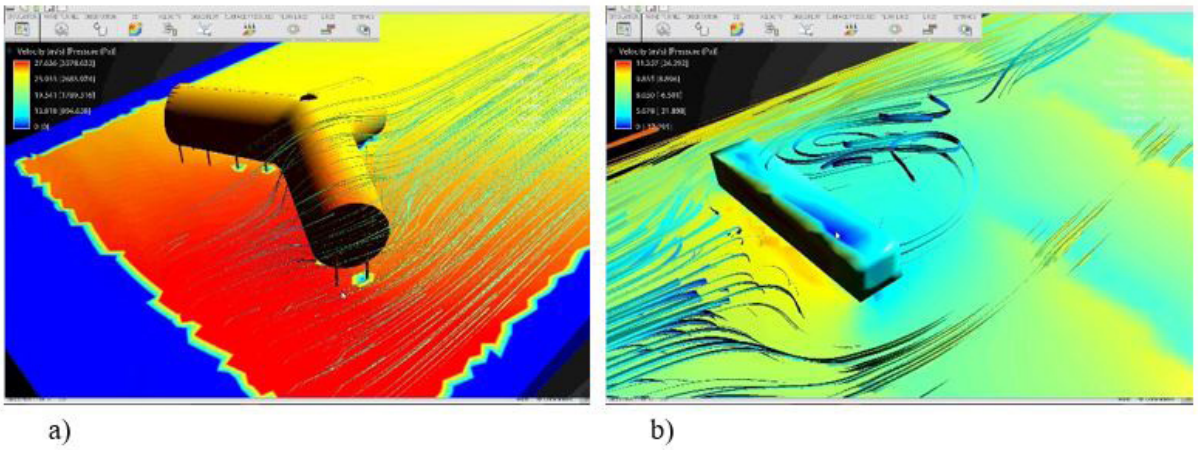


Figura 11. Túnel de viento; modelo aerdinámico(a) vs. modelo tradicional (b).

Puede apreciarse cómo con respecto a un edificio tradicional en forma de paralelepípedo, este ofrece una gran resistencia mediante «efecto vela». Este inconveniente implica un refuerzo de la cimentación mediante la instalación de vientos, además de acarrear perjuicios al usuario como ruidos y vibraciones.

2.4. Estructuras

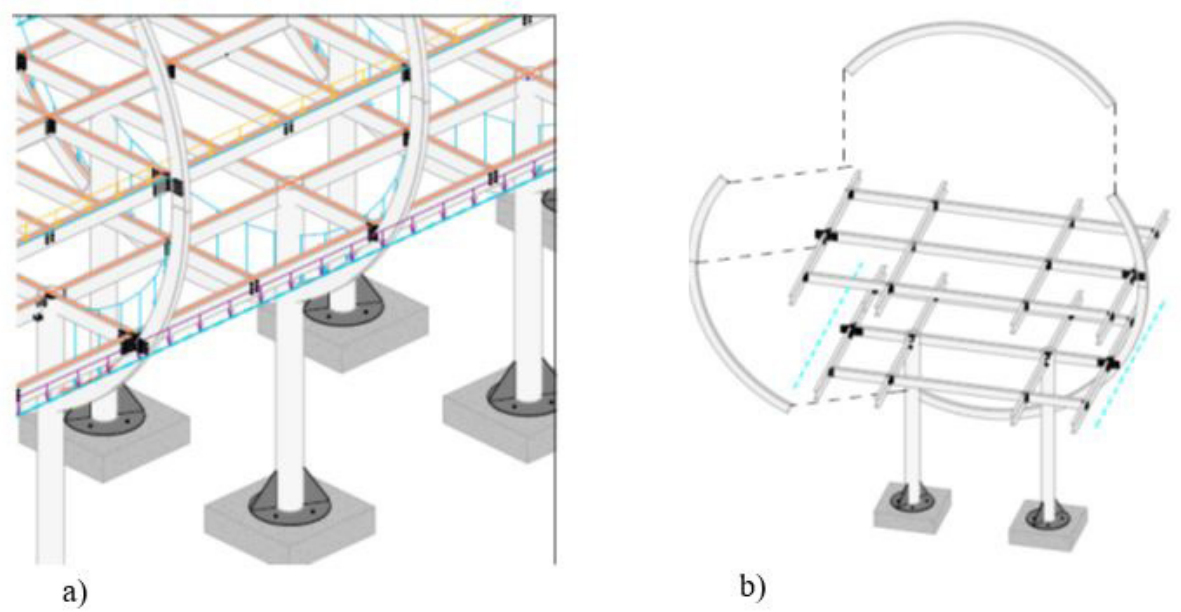


Figura 12. Modelo estructural; análisis de cargas (a) y pórtico «semilla» (b).

La estructura de la nueva BAE se articula en dos tipos diferenciados; estructura principal y estructura secundaria. La estructura principal la compone el armazón estructural de acero galvanizado mediante la repetición modular de un pórtico tipo o «semilla».

El pórtico «semilla» a partir del cual se configura todo el armazón es un conjunto de dos soportes y vigas, siendo las externas de forma curva (circular) dispuestas perimetralmente a modo de «cuadernas» adaptándose al perfil del edificio, dejando el interior diáfano. Por otro lado, el forjado está compuesto por vigas y el entrevigado por tablero autoportante a base de paneles de madera hidrófuga reforzada con resinas epoxi y núcleo de fibra de vidrio y EPS de alta densidad.

Figura 13. Estructura secundaria tipo «frame».

Para facilitar la puesta en obra y ejecución, se han simplificado al máximo el tipo de perfil igualando perfiles (IPE 280) y mediante uniones atornilladas. Además esta simplificación conlleva la ventaja añadida de disminución de piezas de repuesto.

La estructura secundaria es la concerniente a la envolvente. Se trata de una estructura de aluminio tipo *frame*. Esta estructura ligera, totalmente industrializada y prefabricada es la encargada de transmitir todas las cargas de nieve o viento a la estructura principal. Además recibe los paneles que conforman la envolvente de forma hermética asegurando el control térmico y de eficiencia del edificio. Se ha elegido el aluminio como material óptimo para intemperie, ligero y duradero.

2.5. Instalaciones

El proyecto de instalaciones de la nueva BAE ha supuesto un gran reto en la medida en que se ha perseguido la reducción al máximo de los desarrollos de las conducciones, así como del aprovechamiento del calor y la energía.

Las fuentes de energía provienen tanto de un conjunto de 6 turbinas eólicas de eje vertical como de una instalación de aprovechamiento fotovoltaico anexo. Se plantea para siguientes etapas la integración arquitectónica de ambos elementos.

Las fuentes de energía y gestión completa de las instalaciones se hacen a través de una *Smart Grid*, red inteligente que monitoriza y gestiona el estado energético de la BAE. Otorga prioridades en función de la demanda, controla la carga de las baterías o distribuye en función de los aportes energéticos depen-

diendo de los rendimientos de las instalaciones tanto eólicas como fotovoltaicas. En caso de necesidad se dispone de grupo electrógeno de apoyo.

Como criterio novedoso, se han incluido dentro de la envolvente todos los componentes que aportan inercia o calor al edificio. Mediante el paso de conductos por el interior, se evita por ejemplo que se congelen tuberías o equipos.

3. Conclusión

El presente proyecto supone una propuesta de actualización integral de la BAE Gabriel de Castilla, adaptándola a las exigencias actuales por parte del Tratado Polar Antártico, mediante soluciones constructivas tecnológicas y energéticamente eficientes.

Agradecimientos

Al departamento de construcción de la Escuela Politécnica Superior del Ejército (ESPOL) y al laboratorio de ingenieros (LABINGE), por su apoyo y dedicación.

Referencias

1. *Campaña Antártica. (s.f.). Obtenido de http://www.ejercito.mde.es/unidades/Antartica/antartica/*
2. *Secretaría del Tratado Polar Antártico. (s.f.). Obtenido de http://www.ats.aq/s/ats.htm*

Interdependencia entre infraestructuras energéticas: evaluación de la robustez de las redes de gas y electricidad ante amenazas deliberadas

Yusta, Jose M.[1,*], Beyza, Jesús[1] y Cristóbal, Iván R.[2]

[1] Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Eléctrica, C/María de Luna 3, 50018 Zaragoza. Correo electrónico: jmyusta@unizar.es, jbbcia4@hotmail.com

[2] Centro Universitario de la Defensa, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090 Zaragoza. Correo electrónico: icristob@unizar.es

* Autor principal y responsable del trabajo: jmyusta@unizar.es

Resumen

Las redes de transporte de electricidad y gas natural están comprendidas en España entre las infraestructuras críticas cuyo funcionamiento es indispensable, por lo que su perturbación tendría un grave impacto económico y social. Estos sistemas son susceptibles de sufrir interrupciones graves debido a desastres naturales, fallos técnicos, ciberataques, etc. Ambas redes se analizan principalmente de manera aislada, pero dado el incremento de generación de electricidad mediante centrales de gas natural, es preciso abordar el problema de la interdependencia entre ambas infraestructuras. En esta investigación se propone una metodología novedosa para analizar fallos en cascada en las redes españolas de electricidad de 400 kV y de gas natural de 80 bar, aplicando la teoría de grafos en redes complejas. Primero se estudia la vulnerabilidad de las redes separadas y posteriormente se evalúa la vulnerabilidad de la red conjunta. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de gas natural es menos robusto que el sistema eléctrico. Además, un ataque dirigido al 1 % de los activos con mayor conectividad en la red acoplada conjunta sería suficiente para producir un fallo total del suministro, evidenciando la vulnerabilidad de estas infraestructuras.

Palabras clave

Infraestructuras críticas, redes eléctricas, gasoductos, ataques deliberados.

1. Introducción

La Ley 8/2011, de 28 de abril [1], establece medidas para la protección de las infraestructuras críticas en España, adoptando los principios de la Directiva europea 2008/114/CE, del Consejo, de 8 de diciembre [2], sobre la identificación y designación de infraestructuras críticas europeas y la evaluación de la necesidad de mejorar su protección.

Entre las infraestructuras que la Ley 8/2011 considera críticas se encuentran los principales sistemas de transporte de energía de ámbito nacional, que incluyen las redes de transporte de gas y electricidad. La citada ley considera estas instalaciones como críticas dado que su funcionamiento es indispensable y no permite soluciones alternativas, por lo que su perturbación o destrucción tendría un grave impacto sobre los servicios esenciales.

Las amenazas a estas infraestructuras pueden ser de distinta naturaleza, entre otras intencionadas como ciberataques, etc. Según los datos del Instituto Nacional de Ciberseguridad (Incibe), las ofensivas a través de las redes informáticas contra los operadores de estas instalaciones se multiplicaron por siete entre 2014 y 2016, y siguen creciendo exponencialmente. Por otro lado, el Centro Nacional de Protección de Infraestructuras Críticas español (CNPIC) informó recientemente que el sector energético sufre uno de cada tres ataques cibernéticos en el mundo. En julio de 2018, funcionarios estadounidenses informaron al Wall Street Journal de que piratas informáticos rusos habían conseguido acceder a los centros de control de distintas empresas eléctricas norteamericanas, con capacidad para abrir o cerrar interruptores de la red eléctrica de transporte de alta tensión e interrumpir el flujo de determinadas líneas eléctricas, con el riesgo de producir importantes perturbaciones del suministro eléctrico. Ya en diciembre 2015 Ucrania sufrió graves interrupciones del suministro eléctrico tras la introducción del *malware* BlackEnergy, y en enero de 2016 la red eléctrica israelí fue afectada por un ciberataque masivo que dejó inoperativos sus sistemas.

En los últimos años se ha incrementado la preocupación por la creciente dependencia que presentan las infraestructuras de gas natural y electricidad. En apenas diez años se han construido en España 67 grupos generadores que utilizan gas natural canalizado como combustible, sumando más de 26 gigavatios de potencia. Esto supone que más del 25 % del parque de generación eléctrica español dependa actualmente del suministro de gas natural. Y así como la red eléctrica española se ha ido expandiendo progresivamente hasta adoptar una estructura topológica relativamente mallada y con elevada fiabilidad, la red de transporte de gas natural se ha desarrollado más recientemente y aún no dispone de una topología tan interconectada (ver figura 1).

Además, la introducción masiva de las energías renovables requerirá de la construcción de nuevos ciclos combinados de gas natural que proporcionen respaldo suficiente para garantizar la seguridad de suministro. Se estima que serán necesarios hasta 10 gigavatios de capacidad adicional en 2030 que, junto a la potencia ya instalada, constituirían el 58 % del total de la capacidad firme del sistema eléctrico.

Así que en la actualidad no se puede considerar que las redes de transporte de gas y electricidad se encuentren aisladas, ya que un evento en una infraestructura puede tener consecuencias en la otra [3].

Las centrales eléctricas de ciclo combinado requieren de un suministro fiable de gas natural y, por otro lado, muchas de las estaciones de compresión de la red de gas natural demandan energía eléctrica para su funcionamiento. Por tanto, es preciso abordar el problema de la interdependencia entre ambas infraestructuras.

Figura 1. Mapas de las redes de transporte de electricidad y gas natural en España.

Además de los esfuerzos realizados por los operadores de las infraestructuras energéticas, en cumplimiento de la Ley 8/2001 y los decretos que la desarrollan, para implementar planes de protección de sus activos, los investigadores también han contribuido con la propuesta de metodologías que permitan el análisis de la vulnerabilidad de los sistemas de transporte de energía, especialmente de electricidad. Entre ellas, mediante la utilización de técnicas clásicas de análisis de contingencias con flujos de cargas para simular fallos en cascada, pero también mediante la aplicación de nuevas técnicas emergentes de análisis de vulnerabilidad estructural de las redes basadas en la teoría de redes complejas.

La etapa de evaluación de riesgos debe ser lo más objetiva posible, para lo cual es preciso contar con herramientas cuantitativas que permitan valorar riesgos con más probabilidad de afectar a las operaciones de la red, que abarcan tanto posibles interrupciones del suministro por condiciones climáticas severas o fallos técnicos como ataques intencionados a las infraestructuras. Estos riesgos pueden causar problemas en uno o más componentes de una infraestructura, por lo que será preciso estimar la debilidad del sistema con respecto a una secuencia de eventos en cascada, de manera que se analice la vulnerabilidad del sistema de energía [4].

Un modelo de simulación más realista permitirá tener una representación más cercana del sistema en estudio y permitirá representar mejor el sistema bajo condiciones extremas. Sin embargo, mayor realismo también implica mayor complejidad en la elaboración de estos modelos [5]. Alternativamente, un modelo más abstracto, aunque más sencillo, permitirá sentar las bases para construir modelos de mayor nivel de detalle. En ese sentido, los modelos construidos sobre teoría de grafos proporcionan una nueva visión para pensar en los sistemas de infraestructura crítica.

Hay una gran cantidad de infraestructuras críticas que se pueden representar mediante una red de nodos interconectados a través de enlaces. La teoría de grafos o de las redes complejas [6,7] facilita el análisis y la visualización de los comportamientos físicos, entre otras, de redes de energía. Por ejemplo, la evaluación de fallos en cascada mediante el estudio de la topología del sistema, la evaluación de los impactos debidos a la eliminación de componentes específicos en un sistema y sus consecuencias en la congestión de los flujos de potencia.

La modelización de los sistemas de energía como redes complejas ha centrado importantes esfuerzos investigadores en los últimos años. La definición de redes de libre escala propuesta inicialmente por Barabási y Albert [6] fue seguida por la aplicación de nuevos conceptos de medidas estadísticas, análisis de vulnerabilidad y estimación de resiliencia, con aplicaciones en redes de transporte eléctrico, redes informáticas y otros problemas de ingeniería. Motter y Lai [8] formularon el problema de los fallos en

cascada en redes libres de escala mediante el modelado de una estrategia de eliminación de nodos de una red basada en el grado nodal, que constituye la base para desarrollar la evaluación de la vulnerabilidad de redes de energía eléctrica [9].

Por otra parte, Holmgren [10] justificó que las medidas estadísticas de la teoría de grafos (*clustering*, grado de conexión, distancia geodésica, distribución nodal) son adecuadas para llevar a cabo la evaluación de la vulnerabilidad de un sistema de energía y en particular para el análisis de fallos en cascada. Otros investigadores han utilizado métricas alternativas para modelos de redes complejas, por ejemplo Chen [11], que sugiere el uso de indicadores de eficiencia geodésica para analizar fallos en cascada. Otro enfoque para evaluar la resiliencia de la red eléctrica es el formulado por Johansson [12] y por Wang [13] que proponen medir el *betweeness* entre los nodos del grafo.

En los últimos años algunos trabajos de investigación se han centrado en el modelado de sistemas de infraestructuras interdependientes, utilizando la teoría de redes complejas, métodos basados en agentes y otros [14]. Entre otras infraestructuras, ha sido objeto de atención el análisis de la planificación y operación de sistemas de transporte de energía eléctrica y gas [15, 16]. También en estas aplicaciones la teoría de redes complejas ha demostrado su utilidad para caracterizar el acoplamiento de la topología de distintas infraestructuras para un análisis conjunto [17]. Este método permite evaluar la vulnerabilidad de los sistemas tomando en cuenta sus propiedades topológicas a través de índices o medidas de centralidad.

En este trabajo se propone una metodología novedosa para analizar fallos en cascada en sistemas reales de transmisión de electricidad y gas natural acoplados, aplicando la teoría de grafos en redes complejas. Se toma como caso de estudio las redes reales de transporte electricidad de 400 kV y de transporte de gas natural de 80 bar de España. Esta investigación constituye una contribución original en el estudio de vulnerabilidad de redes interdependientes de energía.

2. Modelo de grafo conjunto de los sistemas de transporte de gas y electricidad

La figura 2 a) muestra la representación de la infraestructura eléctrica de 400 kV de España utilizando solo los datos de su topología [18]. El grafo resultante está compuesto por un total de 611 nodos y 672 enlaces. En esta representación se han considerado todos los activos principales, es decir líneas eléctricas, subestaciones, transformadores, cargas, generadores, etc.

La figura 2 b) muestra la representación de la infraestructura de gas natural de alta presión de España. La topología de la red de gas natural de alta presión se obtiene según [19]. Para representar adecuadamente todos los activos se consideran 6 regasificadoras, 19 estaciones de compresión, 3 almacenamientos subterráneos, 2 yacimientos, 6 conexiones internacionales, 32 puntos de conexión de líneas directas, 57 puntos de conexión transporte-transporte y 294 puntos de conexión transporte- distribución. El grafo resultante está compuesto de 1.380 nodos y 1.402 enlaces.

Las centrales eléctricas de ciclo combinado de gas natural y los compresores eléctricos actúan como acoplamiento entre ambas redes:

- Por un lado, en el caso de España el 25 % de la potencia eléctrica instalada está compuesta por plantas de energía de gas. La infraestructura contiene gran número de este tipo de instalaciones conectadas a subestaciones con diferentes niveles de tensión. En este trabajo, se consideran 26 centrales eléctricas de ciclo combinado conectadas a subestaciones eléctricas de 400 kV.
- Por otro lado, la infraestructura de gas natural dispone de 14 estaciones de compresión que precisan de suministro eléctrico. Estos activos se consideran conectados a las subestaciones eléctricas más cercanas.

La figura 2 c) representa la red conjunta de electricidad y gas natural de España. El grafo resultante está compuesto por 2.031 nodos y 2.154 enlaces.

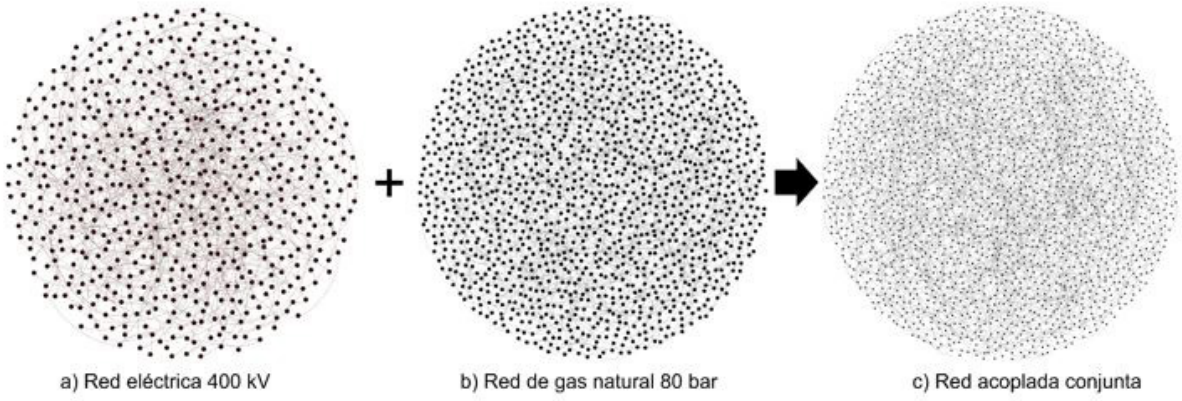


Figura 2. Grafos de las redes de electricidad y gas natural de España.

3. Metodología de evaluación de vulnerabilidad de las redes

Los pasos para evaluar la desintegración de un sistema que sufriera un fallo en cascada se indican a continuación:

Paso 1. *Inicio*: creación del grafo equivalente de la red, ver figura 2.

Paso 2. *Ataque a los activos*: se eliminarán iterativamente uno a uno todos los nodos del grafo y los enlaces conectados, en orden descendente de grado nodal, excepto los nodos que representan al generador eléctrico de referencia, su acoplamiento y el nodo de gas acoplado.

Paso 3. *Identificación de islas*: el proceso de desintegración genera subgrafos en la red acoplada. En esos casos es necesario considerar que el siguiente nodo a eliminar debe encontrarse en el conjunto de mayor tamaño que permanezca conectado al generador eléctrico de referencia.

Paso 4. *Cálculo de la métrica de vulnerabilidad*: en cada paso de desintegración de la red se calcula el índice de vulnerabilidad geodésica para el componente de mayor tamaño. Este índice es función de la cantidad de nodos que quedan aislados . El proceso iterativo finaliza una vez que no sea posible eliminar más nodos del grafo, o bien ambas redes se encuentren desacopladas. Si aún existen nodos en la red, se regresa al paso 2.

Entre los índices propuestos en la literatura científica, las métricas basadas en eficiencia geodésica han demostrado mayor correlación con el funcionamiento real de las redes de transmisión de energía para el análisis de contingencias n-*k* [20, 21]. Entre estas métricas, el índice de vulnerabilidad geodésica es una de las más innovadoras.

El índice de vulnerabilidad geodésica mide el funcionamiento de una red frente a contingencias, normalizando la eficiencia geodésica respecto de su caso base. En trabajos previos de investigación se ha validado que este índice tiene relación directa con la carga desconectada en la red ante un proceso de fallos en cascada según se indica en [21]. El índice de vulnerabilidad geodésica varía entre cero y uno, cuanto mayor es el valor de este índice, mayor es el impacto en la red:

$$\langle \bar{v} \rangle = \mathbf{1} - \frac{\sum_{i \neq j} \left(\frac{1}{d_{ij}^{LC}} \right)}{\sum_{i \neq j} \left(\frac{1}{d_{ij}^{BC}} \right)} \qquad (1)$$

Donde:

d_{ij}^{LC}: distancia geodésica entre los pares de nodos del grafo, después de cada iteración de eliminación de un nodo.

d_{ij}^{BC} distancia geodésica entre los pares de nodos del grafo, para el caso base.

La distancia geodésica es la menor distancia directa entre dos nodos mediante el conteo del número mínimo de enlaces que deben recorrerse para unirlos.

4. Resultados

La vulnerabilidad estructural de la red de electricidad y gas natural de España se ha evaluado considerando, por un lado, los sistemas separados, y por otro lado, el sistema acoplado conjunto.

En la figura 3 se muestran los resultados de simulación de fallos en cascada ante ataques deliberados para las redes de electricidad y gas natural, y para la red acoplada conjunta, eliminando los nodos más fuertemente conectados en orden descendente de grado nodal. Las gráficas representan el valor de vulnerabilidad geodésica en función de la fracción de nodos eliminados . Cuando todos los nodos de la red están inicialmente conectados, la vulnerabilidad geodésica toma un valor igual a 0. Según la red se va descomponiendo como consecuencia de la desintegración en cascada, el valor de la vulnerabilidad geodésica va aumentando, hasta tomar un valor igual a 1 cuando se ha interrumpido el suministro de energía a todos los nodos del sistema.

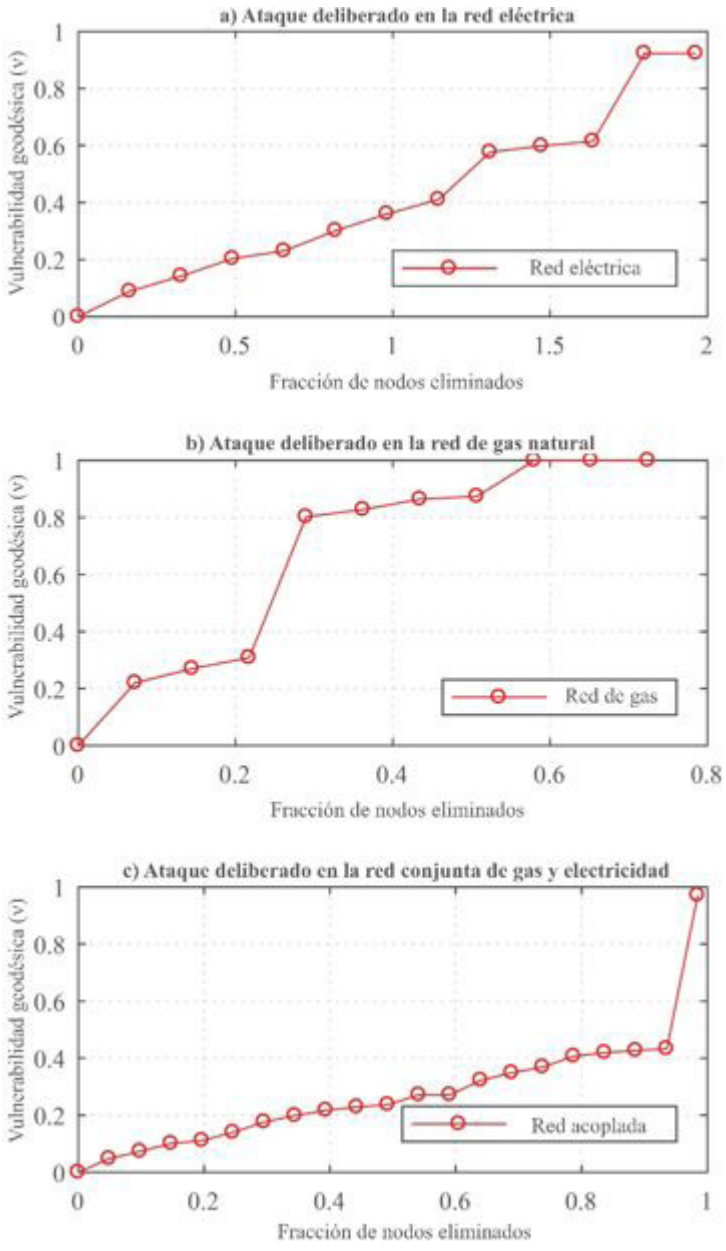


Figura 3. Vulnerabilidad geodésica ante fallos en cascada por ataques deliberados a las redes.

La curva de vulnerabilidad de la figura 3 a) evidencia muestra que la eliminación de menos del 2 % de los nodos es suficiente para el colapso de la red eléctrica. Esto demuestra que ataques dirigidos sobre nodos con alta conectividad representan una táctica efectiva para desintegrar redes con mayor rapidez.

Por otro lado, la figura 3 b) permite observar que la eliminación del 0,7 % de los nodos ocasiona la desintegración de la red, es decir, la red de gas natural es menos robusta que la red eléctrica. Esto se explica por la diferente estructura de ambas redes, ya que el sistema de gas natural presenta una topología menos mallada que el sistema eléctrico.

Analizando ahora las dos redes de manera acoplada, en la figura 3 c) se observa cómo el ataque al 1 % de los nodos es suficiente para colapsar completamente la red. Aquí se ha considerado la combinación de los grados nodales de las redes independientes, utilizando en primer lugar la secuencia de nodos atacados en la red eléctrica y a continuación los atacados en la red de gas natural.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología de análisis de fallos en cascada para sistemas acoplados de gas natural y electricidad interdependientes, utilizando la teoría de redes complejas. Se ha aplicado como caso de estudio a las redes reales de transporte de electricidad y gas natural de España. Los resultados muestran que, ante ataques deliberados, el sistema de gas natural es menos robusto que el sistema eléctrico, debido al menor mallado de su topología. Además, la red acoplada conjunta es más vulnerable que la red eléctrica. Por otro lado, un ataque coordinado y dirigido al 1 % de los nodos más conectados de la red conjunta de gas y electricidad resultaría suficiente para producir un fallo total del suministro, lo que muestra la vulnerabilidad de nuestras modernas infraestructuras de energía.

Agradecimientos

Esta investigación está financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad de España mediante el proyecto ENE2016-77172-R.

Referencias

1. *Ley 8/2011, de 28 de abril, por la que se establecen medidas para la protección de las infraestructuras críticas. BOE de 29 de abril. 2011;102:43370-43380.*
2. *Consejo de la Unión Europea. On the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection. Directiva CE/114. 2008.*
3. *Ouyang M, Hong L, Mao ZJ, Yu MH, Qi F. A methodological approach to analyze vulnerability of interdependent infrastructures. Simulation Modelling Practice and Theory 2009;17(5): 817–828.*
4. *Baldick R, Chowdhury B, Dobson I et al. Vulnerability assessment for cascading failures in electric power systems. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition 2009:1–9.*
5. *Brown T. Multiple Modeling Approaches and Insights for Critical Infrastructure Protection. IOS Press, NATO Series for Peace and Security Services 2007;13:23–35.*
6. *Barabási AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science 1999;286:509–12.*
7. *Newman MEJ. The structure and function of complex networks. SIAM Rev 2003;45:167–256.*
8. *Motter A, Lai Y. Cascade-based attacks on complex networks. Phys Rev E 2002;66:065102.*
9. *Crucitti P, Latora V, Marchiori M, Rapisarda A. Error and attack tolerance of complex networks. Phys A: Stat Mech Appl 2004;340:388–94.*
10. *Holmgren ÅJ. Using graph models to analyze the vulnerability of electric power networks. Risk Anal 2006;26:955–69.*
11. *Chen G, Dong ZY, Hill DJ, Zhang GH. An improved model for structural vulnerability analysis of power networks. Physica A 2009;388:4259–66.*
12. *Johansson J. Risk and vulnerability analysis of interdependent technical infrastructures. En: Doctoral thesis in industrial automation. Lund (Sweden): University of Lund; 2010.*
13. *Wang K, Zhang B, Zhang Z, Yin X, Wang B. An electrical betweenness approach for vulnerability assessment of power grids considering the capacity of generators and load. Physica A 2011;390:4692–701.*
14. *Ouyang M. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. Reliability Engineering and System Safety 2014;121:43–60.*
15. *Urbina M, Li Z. Modeling and Analyzing the Impact of Interdependency between Natural Gas and Electricity Infrastructures. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2008.*
16. *Cakir B. et al. An integrated simulation model for analysing electricity and gas systems, Electrical Power and Energy Systems 2014;61:410–420.*

17. *Wang S. et al. Analysis of interdependent infrastructure systems under edge attack strategies. Safety Science 2013;51:328–337.*
18. *Red Eléctrica de España. El sistema eléctrico español. 2018 [Online]. Available: http://www.ree.es/es/actividades/gestor-de-la-red-y-transportista*
19. *Enagas. Red de Transporte. 2018 [Online]. Available: http://enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/Red_de_transporte*
20. *Su H, Zio E, Zhang J, and Li X. A systematic framework of vulnerability analysis of a natural gas pipeline network. Reliability Engineering & System Safety 2018;175:79–91.*
21. *Correa GJ and Yusta JM. Grid vulnerability analysis based on scale-free graphs versus power flow models. Electric Power Systems Research 2013;101:71–79.*

Auscultación de procesos activos sobre la ladera y la costa acantilada del entorno próximo a la Base Antártica española Gabriel de Castilla

Ropero Azañón, Miguel Ángel[1,*], Paredes Bartolomé, Carlos[2,*]; Romero Martín, José[1]; Martínez Almajano, Santiago[3]; Garrido Simón, Jerónimo[3]; Castedo Ruiz, Ricardo[2]; de la Vega Panizo, Rogelio[2]; Llorente Isidro, Miguel[4]; de Pablo Hernández, Miguel Ángel[5]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «*Esteban Terradas*», Laboratorio de Ingenieros del Ejército «*General Marvá*». C/ Princesa 36-38, CP. 28008 Madrid, España, roperoama@inta.es (MARA) - romeromj@inta.es (JRM).

[2] E.T.S.I. de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid. C/Ríos Rosas Núm. 21, C.P. 28003 Madrid, España, carlos.paredes@upm.es (CPB)- ricardo.castedo@upm.es (RCR) - rogelio.delavega@upm.es (RVP).

[3] Escuela Politécnica Superior del Ejército. C/ Joaquín Costa, 6. 28002 Madrid, España, smalmajano@et.mde.es (SMA) - jgarsi1@oc.mde.es (JGS).

[4] Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas, 23, C.P. 28003 Madrid, España, m.llorente@igme.es (MLI).

[5] Facultad de Ciencias, Universidad de Alcalá, Ctra. A-II Km 33,6. 28805 Alcalá de Henares, Madrid, España, miguelangel.depablo@uah.es (MAPH).

[*] Autores principales y responsables del trabajo: roperoama@inta.es (MARA) y carlos.paredes@upm.es (CPB).

Resumen

La Base Antártica Gabriel de Castilla (BGdC) se ve afectada por diferentes fenómenos acoplados entre sí: posibles deslizamientos de ladera, erosión costera y acarcavamientos. Estas afecciones morfológicas se traducen en un peligro latente que condicionan seriamente el futuro de la integridad de la instalación científica, viéndose acelerado además por el cambio climático, afectando directamente a la distribución del *permafrost* y a la estabilidad de la ladera sobre la que se asienta la Base. El objetivo de este proyecto es monitorizar los procesos que se están produciendo y delimitar los posibles efectos de esta situación.

Palabras clave

Recesión costera, erosión, deslizamiento ladera, movimiento periglaciar, *permafrost*.

1. Introducción

A lo largo de la vida de la Base Gabriel de Castilla (BGdC), la cual se asienta en el pie de una ladera de material volcánico, se ha ido observando en la evolución geomorfológica de su entorno tres fenómenos que parece han acelerado su comportamiento, pudiendo afectar a la estabilidad estructural de la Base. Una manifiesta recesión del acantilado que separa la planicie sobre la que se asienta la BGdC del nivel de la playa. Se ha constatado que esta recesión es manifiesta, especialmente tras temporales marinos y tormentas, provocando la sucesiva pérdida de terreno frente a la base, el cual, o bien se repone mecánicamente, o bien se protege mediante gaviones, perturbando el paisaje y la dinámica de playa propia de la zona.

Tierra adentro, sobre la ladera colindante con la base, se han reconocido dos tipos de procesos. Uno habitual de las regiones con presencia de *permafrost* en el que se constata un movimiento de la superficie del terreno de tipo lento, que origina una erosión periglacial que puede ser fuertemente acelerada por efecto del cambio climático. Entre las diferentes formas en las que puede darse esta erosión, los movimientos en masa de materiales altamente saturados en agua, fruto del deshielo, en forma de coladas de barro, cuya movilidad aumenta al tener una mayor masa movilizada, pueden llegar a alcanzar partes de la Base provocando graves deterioros como acarvavamientos.

Figura 1. Imagen de la BGdC e inmediaciones objeto del proyecto (fuente propia F. P.).

Por último, sobre la cartografía disponible de la zona, y teniendo en cuenta su geomorfología, se ha delimitado el perímetro y la grieta de cabecera de lo que podría ser un deslizamiento de ladera del que se desconoce, en caso de confirmarse, su actividad. Es preciso confirmar que este movimiento del terreno es inactivo para asegurar la supervivencia de la Base en lo que se refiere a la posibilidad de acciones externas que la perturben. La monitorización del problema que se está realizando abarca el complejo efecto acoplado de todos estos fenómenos.

2. Localización geográfica de la zona de estudio

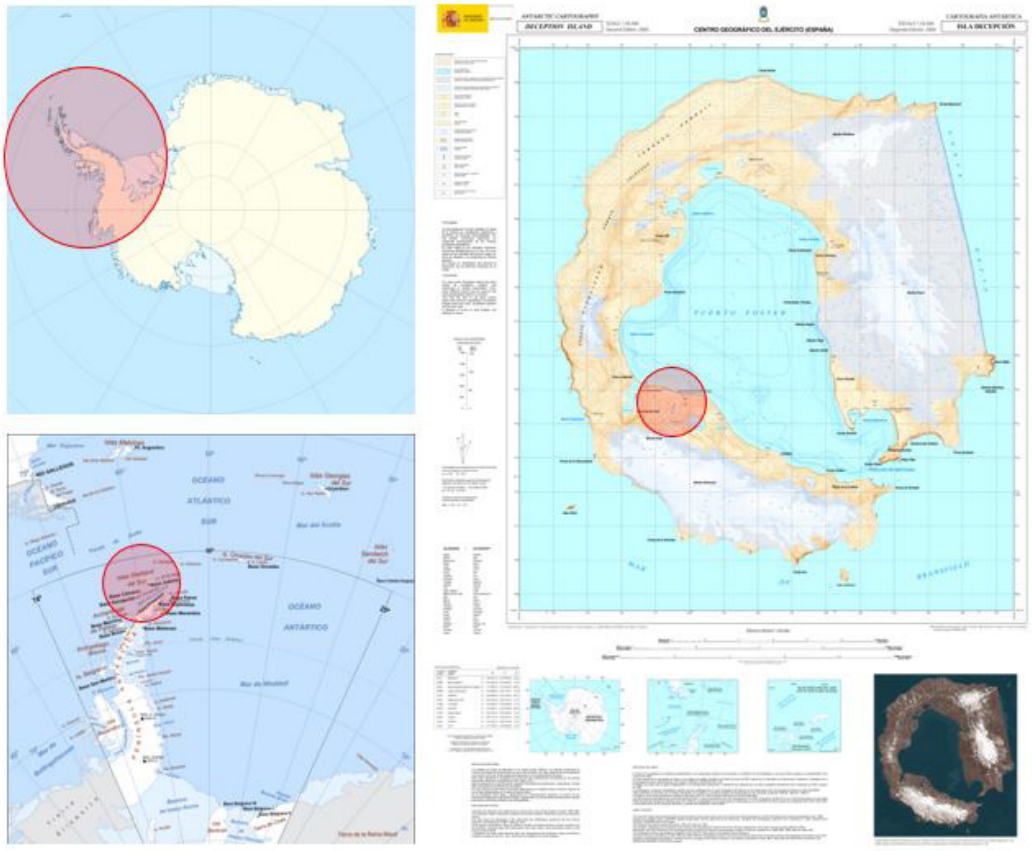


Figura 2. Mapas localización (Centro Geográfico del Ejército).

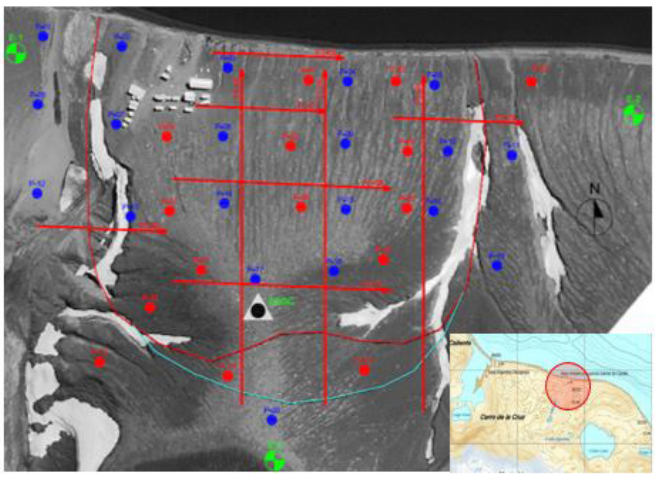


Figura 3. Campañas programadas: Prospección ERT - Topografía apoyo DGPS (Google Earth – F.P. y Centro Geográfico del Ejército).

3. Planteamiento del problema

La auscultación es una tarea fundamental en el estudio de los movimientos de ladera y de recesión sobre acantilado para plantear las diferentes hipótesis de trabajo, ya que estos se encuentran acoplados, siendo necesario:

- Determinar los mecanismos involucrados en el movimiento (deslizamiento, flujo, desprendimiento o reptación), así como su progresión, rotura y post-rotura de los materiales y su estratigrafía, mediante la modelización y simulación de los procesos involucrados.
- Determinar la presencia, profundidad, potencia (espesor) y homogeneidad del *permafrost* para el modelo mecánico e hídrico de la ladera y la costa, mediante métodos tomográficos.
- Determinar los movimientos diferenciales que se producen tanto en la ladera como en la costa para predecir la recesión y el colapso del terreno futuros, mediante métodos topográficos y batimétricos y métodos de simulación numérica.

Figura 4. Esquema de rotura de cuña del terreno por deslizamiento.

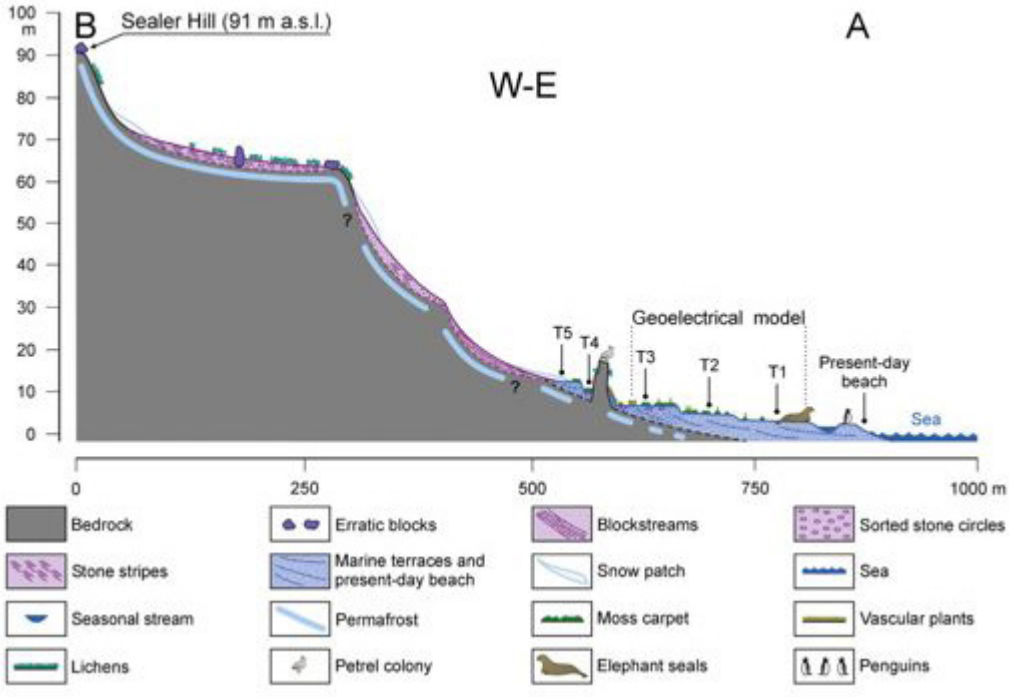


Figura 5. Esquema geológico isla Livingstone (Correia et al., 2016).

4. Métodos tomográficos: ERT

La aplicación de métodos de tomografía eléctrica resistiva (ERT) para delimitar la distribución del *permafrost* y la estratigrafía del suelo, es una valiosa herramienta de mínimo impacto que habitualmente se utiliza. En la campaña programada se malló la ladera con diferentes perfiles (figura 6) para recopilar información de toda ella. Por condicionantes meteorológicos y técnicos se ejecutó con dos protocolos (figura 6), siendo análogos los resultados obtenidos para ambos. Los perfiles arrojaron una distribución similar a la esperada (figura **7**). En las zonas cercanas al mar la distribución de *permafrost* es discontinua, irregular, y puntual siendo terrenos de elevada permeabilidad y alto contenido de humedad. En la ladera, de permeabilidad media, donde las lluvias son escasas es donde se encuentran capas de *permafrost* más uniforme, pudiendo encontrarlo a menos de 1 m de profundidad.

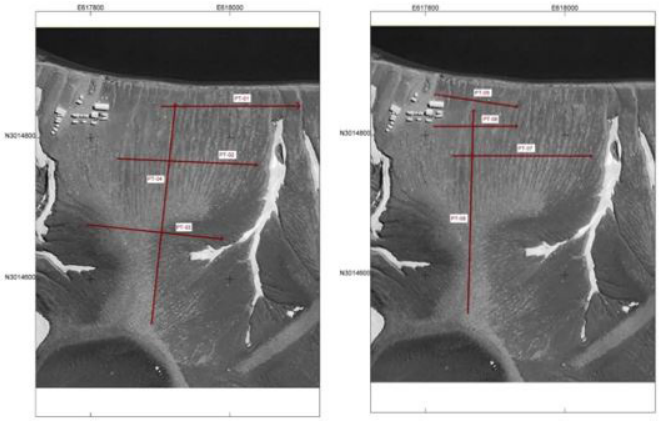


Figura 6. Campañas de ERT ejecutadas: Wenner 32SX (izq.) – Dipolo-Dipolo (der.) (Google Earth – F. P.).

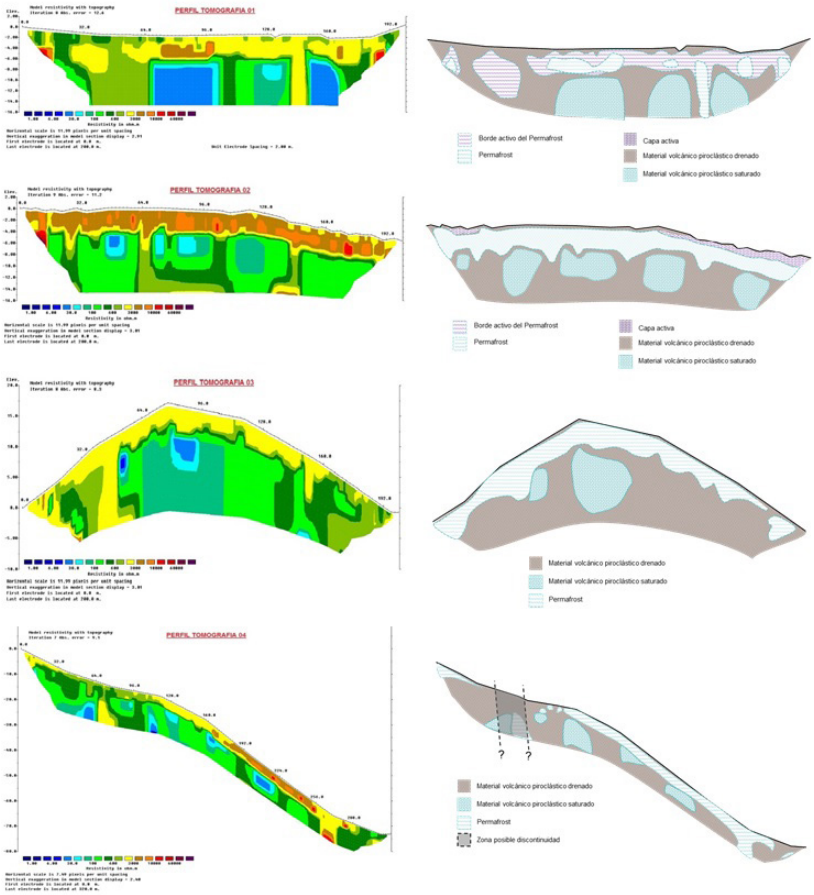


Figura 7. Perfiles tomográficos con protocolo Wenner 32SX (F. P.).

5. Métodos topográficos y batimétricos

Para el estudio de la ladera se ha procedido a monitorizar la orografía del terreno campaña tras campaña, para realizar el seguimiento de los posibles movimientos diferenciales mediante técnicas de DGPS, con la ayuda de una estación total y de un RPAS. Se ha generado un modelo topográfico 3D de seguimiento. En la figura 2 se refleja el posicionamiento inicial de las 36 balizas y de las estaciones fijas.

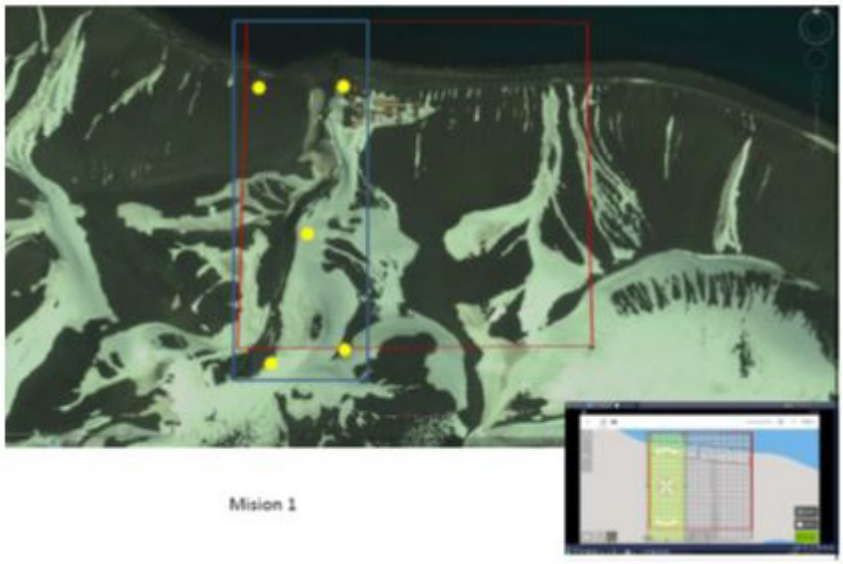


Figura 8. Plan de vuelo RPAS PHANTOM IV – Misión 1 (F. P.).

Se realizaron varias misiones con el RPAS para recopilar imágenes de las balizas que tuvieran un elevado ratio de solapamiento y georreferenciadas para alimentar el modelo 3D mediante restitución fotogramétrica.

Figura 9. Imágenes georreferenciadas del vuelo programado con el RPAS (F. P.).

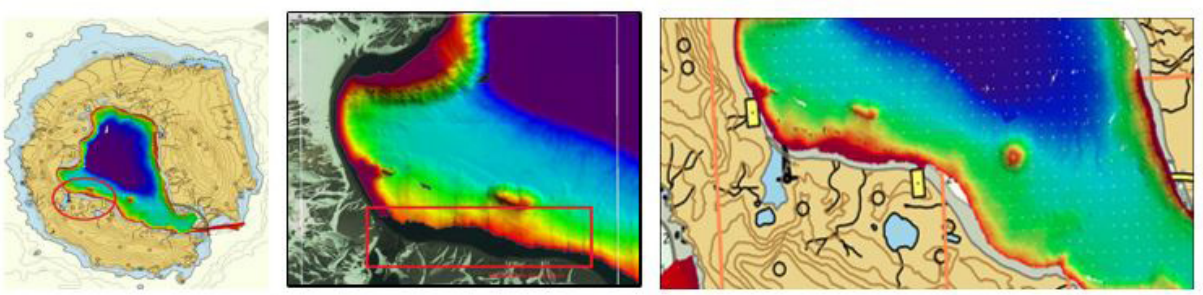


Figura 10. Batimetrías con solape monohaz EA400: 2018 y años anteriores (IHM).

El Instituto Hidrográfico de la Marina ha realizado las batimetrías en detalle de la zona afectada para disponer del modelo orográfico sumergido a incorporar en la modelización geomecánica 3D de la ladera y en las simulaciones de la recesión costera con modelos de proceso de respuesta.

6. Análisis de resultados

Los perfiles ERT han constatado la **presencia** uniforme en la ladera de ***permafrost***, ofreciendo resistividades elevadas. Sus discontinuidades aparecen en las proximidades de la costa, donde se disgrega, apareciendo acumulaciones de hielo inmersas entre material parcialmente saturado. En cotas altas, los fuertes vientos no permiten el depósito de granulometrías finas ni precipitaciones, lo que impidió la formación de *permafrost* hasta las proximidades de la cresta.

La ladera, presenta suelos ordenados, con evidentes procesos de escorrentía, recibiendo su aporte de agua de las ***escasas lluvias***, de la fusión de la nieve y de la capa activa en el estío debido a la acción de los vientos cálidos y de la radiación solar directa. La elevada pendiente donde se desarrollan, la presencia de *permafrost* en profundidad y el desarrollo de la capa activa, no permiten que el agua se infiltre, favoreciendo su movimiento superficial.

Las aguas superficiales y subterráneas fluyen gracias al gradiente hidráulico hacia la línea de costa, arrastrando materiales y agua como reflejan los valores mínimos de resistividad junto a la costa. Una vez alcanzan cotas bajas, se encuentran con ***glacis*** de dunas piroclásticas y ***superficies lag*** de pequeña inclinación, de elevada permeabilidad que facilitarían el colapso del terreno en forma de cuñas posiblemente debido a la existencia de un pequeño *criokarst*, como se observa que aflora en el alud del acantilado y algunas laderas de la isla.

7. Conclusiones

El problema que se está estudiando abarca diferentes procesos que actúan de forma acoplada a diferentes escalas espaciales y temporales: recesión costera, dinámica heterogénea de la capa activa, perigaciarismo de ladera y un posible deslizamiento relicto; todos ellos causantes de efectos perjudiciales sobre las estructuras de la BGdC. Hasta el momento, los resultados obtenidos tras la primera campaña y el primer año de proyecto han permitido elaborar las siguientes conclusiones:

- El modelo topográfico y la batimetría son determinantes para conocer la evolución tanto de la costa como de los posibles movimientos, periglaciares y deslizamientos de la ladera tanto en superficie como sumergido.
- La ERT ha mostrado la distribución y potencia del *permafrost* en la zona estudiada, siendo determinante su ausencia en las inmediaciones de la costa para la estabilidad de la ladera al tratarse de un terreno muy permeable, disgregado y sin cohesión, fuertemente meteorizable que permite su degradación.
- La simulación del modelo de recesión costera está anticipando un límite temporal superior que está ayudando a tomar las medidas correctivas correspondientes para mitigar los efectos del mar en futuras campañas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado dentro del *Proyecto de auscultación de procesos activos sobre la ladera y la costa acantilada del entorno próximo de la Base Antártica Española Gabriel de Castilla* del INTA – Ejército de Tierra financiado por el Ministerio de Defensa. Los autores agradecen el apoyo recibido de la dotación de la BGdC, de la Oficina de la Campaña Antártica y de la División de Logística del Estado Mayor del Ejército de Tierra, al Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y a la Universidad de Cádiz que han colaborado en la realización del Proyecto.

Auscultación y cuantificación de la recesión y erosión en la costa acantilada del entorno próximo a la Base Antártica española Gabriel de Castilla

Paredes Bartolomé, Carlos[1,*], Ropero Azañón, Miguel Ángel[2*], Romero Martín, José[2], Martínez Almajano, Santiago[3], Garrido Simón, Jerónimo[3], Castedo Ruiz, Ricardo[1], de La Vega Panizo, Rogelio[1], Llorente Isidro, Miguel[4] y de Pablo Hernández, Miguel Ángel[5]

[1] E.T.S.I. de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid. C/Ríos Rosas Núm. 21, C.P. 28003 Madrid, España, carlos.paredes@upm.es (CPB)- ricardo.castedo@upm.es (RCR) - rogelio.delavega@upm.es (RVP).

[2] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «*Esteban Terradas*», Laboratorio de Ingenieros del Ejército «*General Marvá*». C/ Princesa 36-38, CP. 28008 Madrid, España, roperoama@inta.es (MARA) - romeromj@inta.es (JRM).

[3] Escuela Politécnica Superior del Ejército. C/Joaquín Costa, 6. 28002 Madrid, España, smalmajano@et.mde.es (SMA) - jgarsi1@oc.mde.es (JGS).

[4] Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas, 23, C.P. 28003 Madrid, España, m.llorente@igme.es (MLI).

[5] Facultad de Ciencias, Universidad de Alcalá, Ctra. A-II Km 33,6. 28805 Alcalá de Henares, Madrid, España, miguelangel.depablo@uah.es (MAPH).

[*] Autores principales y responsables del trabajo: carlos.paredes@upm.es (CPB) y roperoama@inta.es (MARA).

Resumen

La pérdida del territorio por acciones de erosión costera tiene un impacto económico determinante en las infraestructuras y la biodiversidad de las zonas afectadas. El seguimiento, análisis y mitigación de este proceso es un problema particularmente grave en las regiones polares. El efecto del cambio climático y la consecuente variación del *permafrost* influyen en la tasa de retroceso en sus costas, además afectadas por la disminución de la capa de hielo marino, los ciclos de hielo/deshielo estacional, y el aumento del nivel del mar que erosiona la costa. Desafortunadamente, la mayoría del conocimiento actual sobre la evolución del paisaje costero acantilado se refiere a áreas con climas templados y materiales poco o medio competentes. Por ello, la recesión de los acantilados es muy compleja implicando procesos marinos y subaéreos que interactúan acopladamente, siendo especialmente significativo en isla Decepción frente a la Base Antártica Española Gabriel de Castilla (BGdC). Para la cuantificación y análisis de este proceso en sus inmediaciones se han identificado las sucesivas posiciones de la cresta del acantilado a lo largo del tiempo, su ubicación y error mediante técnicas geomáticas de análisis y sobre las ortoimágenes restituidas mediante *Structure from Motion* (SfM), lo que ha permitido ajustar las tasas de recesión recientes. Estas tasas están condicionadas por la pérdida del *permafrost*, reduciendo la cohesión de los materiales expuestos por las variaciones en la su capa activa, tanto a lo largo de la costa como transversalmente, lo cual se ha constatado por el importante acarcavamiento, resultando en superficie del colapso del terreno en el frente del acantilado, y en la prospección con perfiles ERT realizados en la zona. El acoplamiento de estos fenómenos mayora los efectos de erosión costera hacia el interior. Las tasas obtenidas se han incorporado en un modelo estadístico desarrollado sobre técnicas de ajuste por mínimos cuadrados ponderados para pronosticar estadísticamente la distribución costera de la tasa de recesión promedio y con el que simular estocásticamente la evolución de la recesión costera del acantilado frente a la BGdC a corto plazo y analizar su sensibilidad a incertidumbres.

Palabras clave

Antártida, isla Decepción, retroceso acantilado, imagen satélite, modelo estadístico, simulación estocástica.

1. Introducción

En la isla Decepción (islas Shetland del Sur, Península Antártica, Antártida) se encuentra la Base Antártica Española del Ejército de Tierra «Gabriel de Castilla» (BGdC). La singularidad de su ubicación responde al especial interés científico que despierta desde las múltiples facetas del conocimiento. A saber, gracias a su particular enclave geográfico, características bio-geológicas y su escasa perturbación antrópica, despiertan especial atención e interés los estudios biológicos, medioambientales, glaciológicos, geomorfológicos sismo-volcano-tectónicos, marinos, entre otras líneas que allí se desarrollan con un carácter multidisciplinar. Por otra parte, el hecho de que el hombre haya establecido un asentamiento en la isla, de uso temporal, y su interacción con el entorno natural, abre la posibilidad de que surjan otros problemas de interés tanto científico como ingenieril, o incluso logístico, de particular relevancia ya que sus conclusiones y recomendaciones suscitan la reflexión sobre la forma más conveniente en la que se debe desarrollar de forma mantenida la actividad humana en estas latitudes afrontando estos problemas muchas veces en condiciones polares.

Concretamente, además de los posibles peligros geológicos que intervienen sobre la isla, debidos a la sismicidad y al vulcanismo propio de la zona, existen otros procesos geodinámicos externos que también pueden afectar al desarrollo de la actividad actual y futura de la Base: desde el año 2009 se viene observando una acentuación de los procesos erosivos en la ladera sobre la que se asienta la BGdC, así como en el talud costero situado a unos 15-20 m delante del módulo principal de la Base. Se ha observado una recesión continuada, no regular, del acantilado costero, un talud de unos 2,5 a 3,5 m de altura, en cuya base se desarrolla una playa de material tamaño lapilli, parcialmente afectado por la actividad antrópica, especialmente en las inmediaciones del frente a la BGdC. Esta recesión puede ser debida, en gran medida, a la erosión que produce la dinámica del mar interior en la bahía Foster, tanto en su fase líquida (durante el verano austral) como sólida (cuando se forma la banquisa por congelación) y a la posible escorrentía fluvial que ataca los materiales expuestos cuya competencia se encuentra fuertemente afectada por las variaciones térmicas sobre la capa activa del *permafrost*.

Las condiciones climatológicas a las que se encuentra sometida la isla son tremendamente variables, lo que da lugar a la combinación y acoplamiento de un amplio abanico de procesos periglaciares, desde los efectos de compresión sobre el repié del acantilado por la dilatación del hielo de la banquisa pasando por la cizalla provocada por el desplazamiento de los bloques helados arrastrados por las corrientes laterales, hasta la compresión debida al impacto del oleaje sobre el talud. El terreno volcánico, que se ve atacado por estas fuerzas marinas de muy diversa índole además posee unas propiedades de resistencia y cohesión que se modifican, no solo por su deterioro debido a su exposición a la intemperie, sino también con el trascurso de las variaciones térmicas sobre la capa activa superior.

2. Zona de estudio

Los efectos registrados presencialmente por el personal militar y científico a lo largo de las diferentes campañas, y sobre los que se centra este trabajo, se extienden a lo largo de la costa SW de puerto Foster, bahía interior de isla Decepción, desde la playa frente a la Base argentina Decepción hasta la punta de Colatinas, por lo que dada la importancia del fenómeno no solo se limitan al acantilado frente a la

BGdC. Se trata de un tramo de costa de unos 1.650 m cuya dinámica puede afectar a las edificaciones y habitabilidad de las bases que tienen actividad en la actualidad, tanto española como argentina.

De la información geográfica disponible para el proyecto con la que se puede analizar históricamente los efectos: (1) cartográfica (mapa de 1829, 1:25.000 de 1960, 1:23.150 de 1968 y 1:25.000 de 1992 y 2005), (2) aérea (vuelo 1:28.800 de 1956, 1:30.000 de 1968, 1:12.000 de 1979 y 1:30.000 de 1986), (3) satelital (QuickBird 1:3.000 de 2003 y Google Earth Pro de 2001, 2002, 2003, 2005, 2010 y 2013) se ha seleccionado el último catálogo por ser el de mayor detalle para detectar y trazar la localización geográfica de la cresta del acantilado. Las ocho imágenes disponibles han sido descargadas con una resolución espacial de 0,4 m/pixel desde Google Earth Pro, y han sido rectificadas con un polinomio de segundo orden (RMSE ± 0.59 m) y georreferenciadas sobre un SIG tomando la base común de la ortoimagen multiespectral QuickBird de 2003 (resolución de 0,6 m/pixel), apoyándose en referencias en el terreno naturales y edificaciones, lo cual ha permitido mejorar la estimación conjunta de recesiones sobre la misma base geográfica.

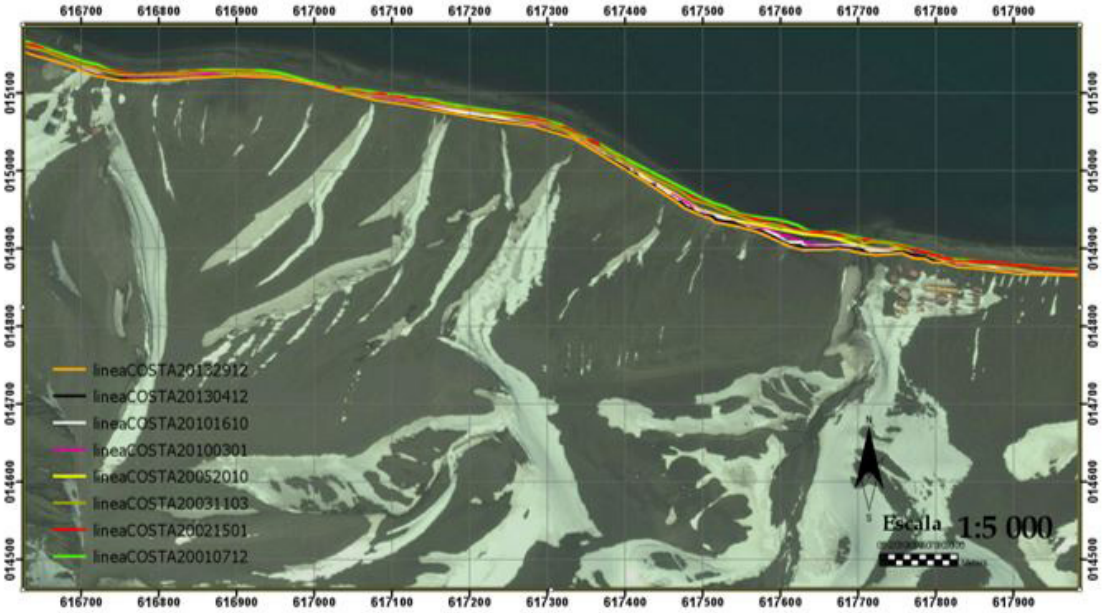


Figura 1. Inventario creado de las líneas de costa digitalizadas en toda la zona de estudio.

Cada imagen ha sido trabajada con un conjunto de filtros de visualización, como una extensión de contraste basada en las estadísticas de la distribución RGB, con los que ha sido posible destacar y digitalizar la cresta del acantilado obteniendo un inventario geográfico temporal (figura 1).

3. Modelo conceptual

A lo largo de la vida de la BGdC, y especialmente desde el año 2009, se ha ido observando en la evolución geomorfológica de su entorno una manifiesta recesión del acantilado, desnivel de pequeña altura, un talud de unos 2,5 a 3,5 m de altura, en cuya base se desarrolla una playa de material tamaño lapilli, parcialmente afectado por la actividad antrópica, particularmente en las inmediaciones del frente a la BGdC, que separa la planicie sobre la que se asienta la base de la playa (figura 2).

Esta recesión se manifiesta especialmente tras temporales marinos y tormentas, provocando la sucesiva pérdida de terreno frente a la base, que se repone mecánicamente, o se protege mediante estructuras, lo cual además perturba el paisaje y la dinámica de playa propia de la zona.

El comportamiento del frente del acantilado se ve a su vez seriamente afectado por las variaciones térmicas, al estar su competencia fuertemente influenciada por el espesor de la capa activa que forma el *permafrost*. En este caso el efecto del cambio climático favorece muy probablemente el incremento de esta recesión al reducir la competencia del material afectado por el ataque del oleaje marino.

La recesión puede ser debida, en gran medida, a la erosión del mar interior de la bahía Foster, tanto en su fase líquida (verano austral) como sólida (banquisa por congelación) y a la escorrentía subterránea (*piping*) sobre los materiales afectados por las variaciones térmicas en la capa activa.

Figura 2. Evento recesivo ocurrido en la campaña 2017/18 y esquema del modelo conceptual.

Las propiedades mecánicas a las que se encuentra sometido el acantilado son tremendamente variables lo que da lugar a la combinación y acoplamiento de un amplio abanico de procesos erosivos, desde los efectos de compresión sobre el repié por la dilatación del hielo de la banquisa, la cizalla por del desplazamiento de los bloques helados arrastrados por las corrientes laterales, y a la compresión debida al impacto del oleaje sobre el talud.

4. Modelo estadístico y simulación estocástica

Entre los diferentes modelos de simulación de la evolución del acantilado costero, los modelos estadísticos, frente a los numéricos de proceso-respuesta, cuando los datos son escasos, permiten caracterizar el comportamiento pasado y pronosticar a corto plazo de la recesión costera a partir de lo ocurrido en un intervalo de tiempo histórico, suponiendo que en el modelo conceptual de recesión:

1. La tasa de recesión *b* o velocidad de cambio de la línea de costa es constante.
2. El cambio *Y* producido en la línea de costa es proporcional al tiempo *X* que ha transcurrido.

4.1. Modelo estadístico

Con las hipótesis y el modelo conceptual anteriores, se formula un modelo prototipo que explique la variabilidad experimental de las medidas de desplazamiento de la costa *Y*, respecto a una línea (*baseline*), en función del tiempo *X*, como un modelo lineal simple: $Y = Xb + e$, donde la variable aleatoria *e* representa el error de medida o en general el efecto de otros factores inciertos.

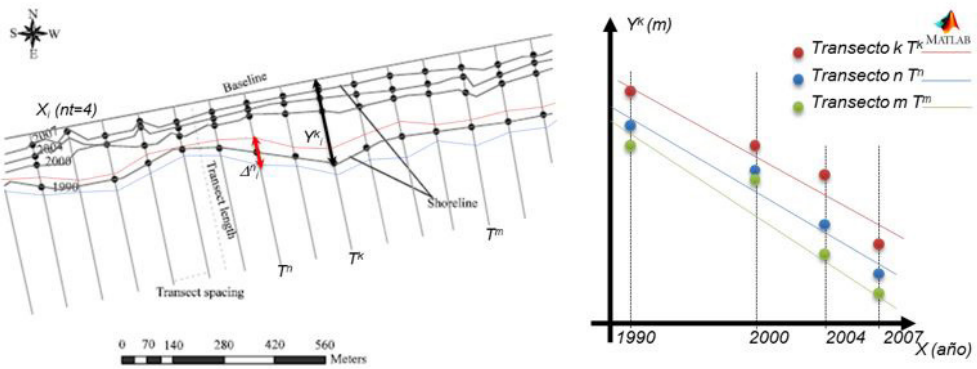


Figura 3. Esquema del proceso de modelización lineal de la tasa de recesión por transectos.

Los parámetros del modelo son estimados localmente (figura 3), subdividiendo la línea de costa en *k* transectos equi-espaciados T^k sobre DSAS-ArcGis y con un método de mínimos cuadrados (MSM) ponderados implementado en Matlab. Los criterios para la elección de este método son: (1) utiliza todos los datos sin discriminación, independientemente de los cambios en la tendencia o la precisión, (2) es computacionalmente simple, y (3) se basa en conceptos estadísticos comprobados. Considerando los valores locales de (X_i, Y_i^k) y la incertidumbre *D* en la localización asociada al trazado de la línea de costa en cada punto la función objetivo del método es:

1) Sin incertidumbres ($w = 1$) en cada transecto para cada instante, entonces *e* es IID gaussiana homocedástica, por lo que se minimiza la funcional:

$$RSS(\beta^k) = \sum_{i=1}^{nt} (Y_i^k - X_i\beta^k)^2 \qquad (1)$$

2) Con incertidumbre $w_i^k = f(D_i^k)$ en cada *k*-ésimo transecto para cada *i*-ésimo momento (año, mes, fecha), entonces *e*es gaussiana heterocedástica, por lo que se minimiza la funcional:

$$wRSS(\beta^k) = \sum_{i=1}^{nt} \omega_i^k (Y_i^k - X_i\beta^k)^2 \qquad (2)$$

En el MSM ponderado, se les da mayor énfasis o peso a los datos más confiables o para los cuales la incertidumbre de la posición es menor, para determinar el modelo de mejor ajuste. El peso (w) se define como una función de la varianza en la incertidumbre de la medición: $w = 1/X^2$, donde *D* = valor de incertidumbre de la línea costera. La calidad en los resultados de la minimización para el ajuste de los parámetros b^k (tasa de recesión en cada transecto) se determina con los estadísticos del error medio cuadrático (*stde*), de la covarianza (*cov*), del coeficiente de correlación (rho) y del coeficiente R^2.

4.2. Simulación estocástica

Para obtener un pronóstico de la evolución y desplazamiento de la línea del acantilado en la zona objeto de estudio se ha llevado a cabo un muestreo aleatorio simple de la función de densidad de probabilidad de la tasa de recesión estimada b^k (m/a) sobre cada transecto, sin considerar (no ponderada) y considerando (si ponderada) los errores en la delineación de la costa, y los estadísticos desviación estándar (*stde*) de b^k y su intervalo de incertidumbre (C.I. al 95 %).

5. Resultados y discusión

La línea de cresta del acantilado ha sido dividida (figura 4) en un total de 164 transectos separados 10 m entre sí. La línea de base, referencia en el cálculo de desplazamientos, es una poligonal tierra a dentro y seudo-paralela a la línea de costa. Cada transecto dispone de 8 puntos, uno por imagen histórica utilizada (figura 2) entre 2001 a 2013, para los que se ajusta el modelo estadístico propuesto.

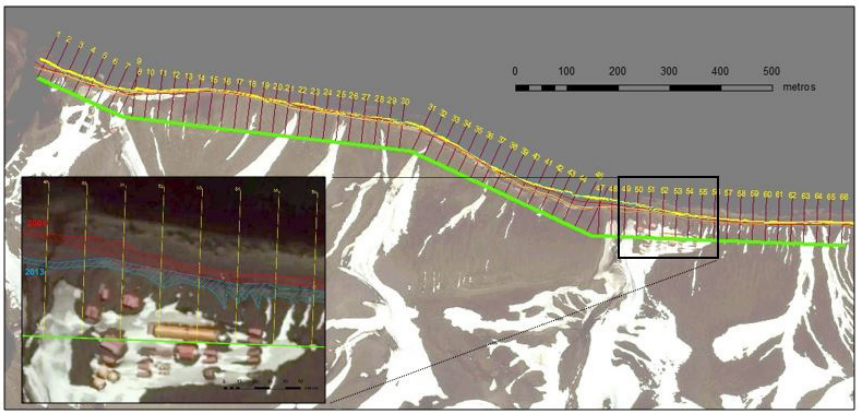


Figura 4. Distribución espacial de los 164 transectos en la zona de estudio. En el recuadro, detalle de la zona frente a la BAGdC y las bandas de error consideradas para 2001 y 2013.

5.1. Análisis descriptivo

La calidad del modelo y la validez estadística de las hipótesis tomadas para su formulación se han evaluado para los casos $w = 1$ y $w = 1/D^2$, con cuatro estadísticos de los parámetros y del modelo de regresión obtenido (figura 5a), entre estos: el error estándar de la estimación para valorar la precisión de los valores pronosticados al compararlos con los valores conocidos de los datos del punto de la costa, y la precisión de la línea de regresión más adecuada para predecir la posición de una costa para un punto dado en el tiempo; el coeficiente de determinación o R^2, o porcentaje de varianza en los datos que se explica por una regresión y mide con qué éxito la línea de mejor ajuste explica la variación en los datos, cuantificando la proporción de la variabilidad en la variable dependiente *Y* que se explica por el modelo de regresión a través de la variable independiente *X*.

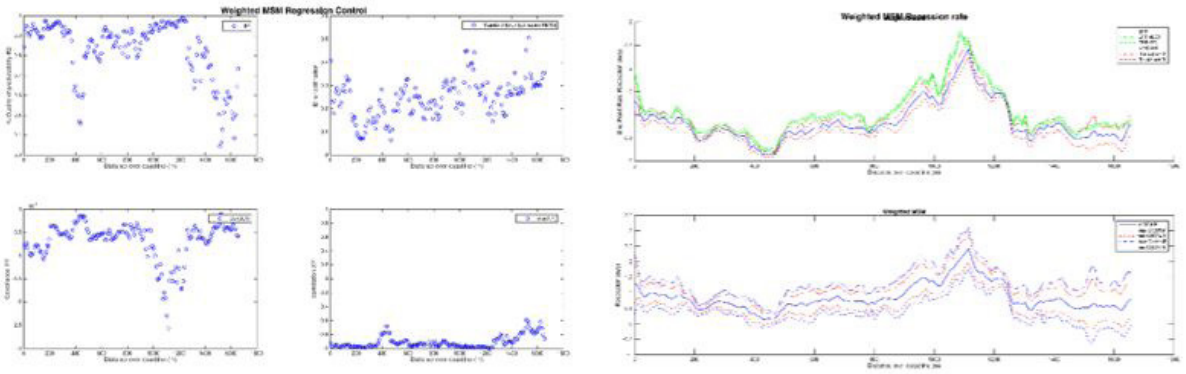


Figura 5. a) Estadísticos de control de calidad para la estimación realizada con MSM ponderada. b) Parámetro tasa de recesión ajustado en el modelo con MSM si ponderado y sus bandas de error en la estimación e intervalos de confianza al 90 % y 95 %.

Además de la tasa de recesión ajustada por MSM y sus estadísticos asociados como el error cuadrático y los intervalos de confianza (figura 5b) de la estimación, se ha calculado la EPR o tasa de puntos extremos finales que es una cota máxima de la tasa de recesión calculada dividiendo la distancia del movimiento de la costa por el tiempo transcurrido entre la línea de costa más antigua y la más reciente. Las principales ventajas del EPR son la facilidad de cálculo y el requisito mínimo de solo dos fechas costeras. La principal desventaja es que, en los casos en que hay más datos disponibles, se ignora la información adicional que estos proporcionan. El método de regresión lineal es susceptible a los efectos atípicos y también tiende a subestimar la tasa de cambio en relación con otras estadísticas.

5.2. Simulación década

La estabilidad del algoritmo numérico estocástico de simulación ha sido mejorada suponiendo que la erosión se realiza de forma continuada a lo largo del año, suprimiendo la estacionalidad del proceso erosivo, mediante la reducción del paso de tiempo de un año a un mes y el re-escalado temporal de m/año a m/mes en la variable aleatoria tasa de recesión. Los resultados de la simulación muestran la ubicación de la cresta del acantilado anualmente desde el 2014 al 2024 (10 años de simulación).

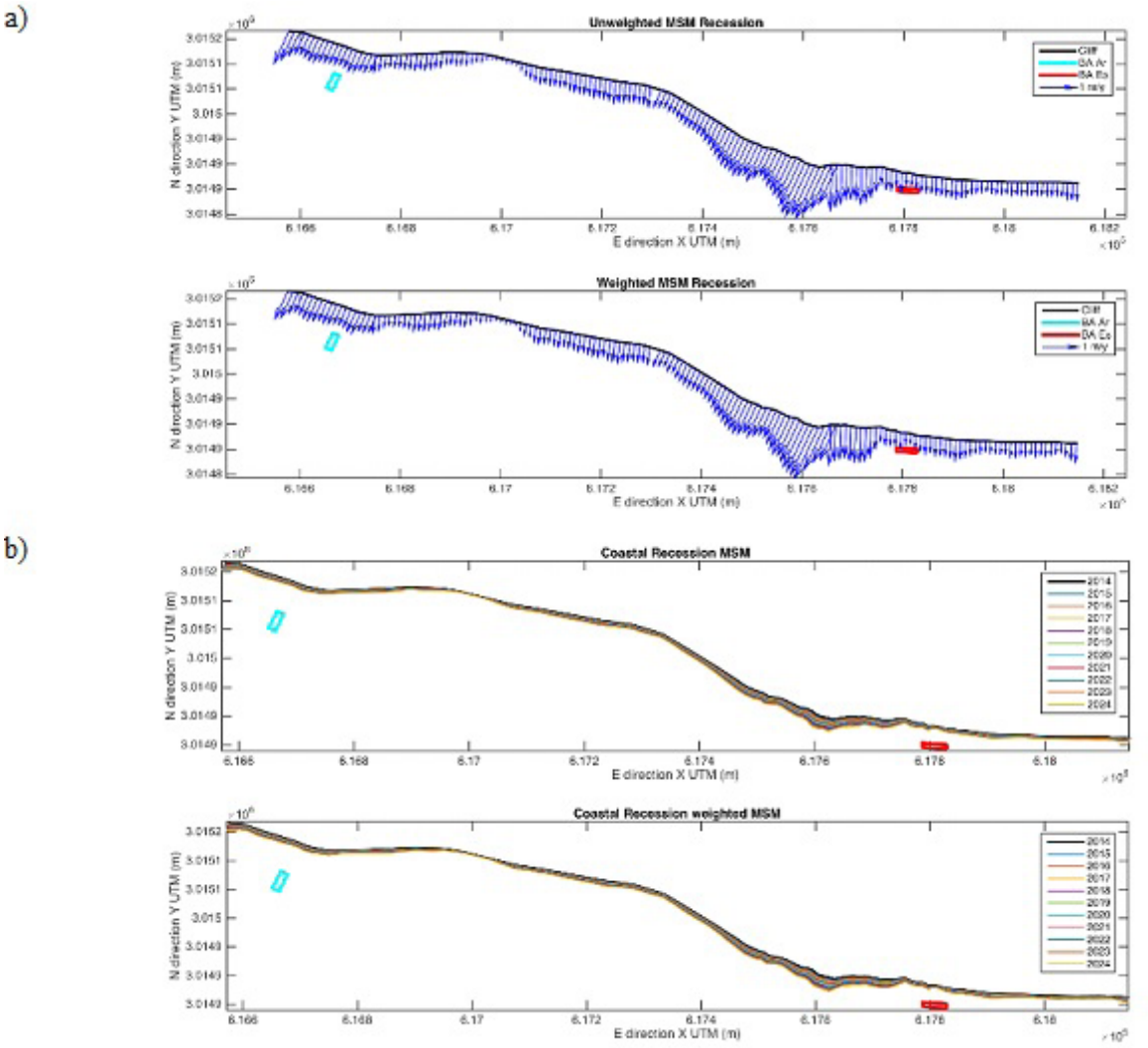


Figura 6 a) Representación vectorial de la tasa de recesión obtenida para el modelo estadístico en cada caso sobre la dirección de cada transecto. b) Simulación numérico-estocástica en 10 años, utilizando las tasas de recesión de a).

6. Conclusiones

En este trabajo se presentan los primeros resultados de análisis, caracterización, modelización, simulación y seguimiento que se están llevando a cabo, habida cuenta del hecho continuado de la pérdida de terreno y consecuente recesión, que se ha constatado en el tramo de acantilado frente a la Base Antártica española Gabriel de Castilla (puerto Foster, isla Decepción).

El estudio iniciado con la fotointerpretación y análisis sobre SIG de la serie histórica de ocho imágenes satelitales catalogadas sobre la plataforma libre Google Earth, entre 2001 y 2013, ha puesto de manifiesto que existe una variación temporal en la localización geográfica de la cresta del acantilado, lo que corrobora las apreciaciones del personal recogidas en las campañas.

Utilizando diferentes filtros sobre el inventario de ocho imágenes se ha trazado digitalmente la línea de la cresta del acantilado, así como las bandas de incertidumbre a su alrededor en la localización geográfica.

Asumiendo que la poligonal digitalizada es la línea de costa y que modifica su posición fruto de la acción marina que erosiona los materiales piroclásticos del terreno en el pie del acantilado, suponiendo que la tasa de recesión o velocidad de cambio de esta línea es constante, que el cambio producido es proporcional al tiempo transcurrido y que el proceso, siendo esporádico y aleatorio en el tiempo y el es-

pacio, puede modelarse mediante su función de distribución de probabilidad se ha propuesto un modelo lineal recesión-tiempo que permita hacer un pronóstico de la evolución de la costa a corto plazo.

Este modelo ha sido obtenido utilizando una técnica de mínimos cuadrados ponderados sobre el conjunto de datos resultante de la discretización espacial de la línea de costa en 164 transectos espaciados 10 m entre sí, en cuyos puntos, para cada fecha, se ha determinado la distancia a una línea de base de referencia y teniendo en cuenta la incertidumbre en su digitalización.

Valores superiores a 0,9 en la mayoría de los transectos del coeficiente de correlación lineal indican que estadísticamente no son descartables las hipótesis formuladas para desarrollar el modelo propuesto, que los errores estándar en la estimación se reducen considerando la incertidumbre en el trazado de la costa y que su capacidad de pronóstico es superior al 80 %.

Las simulaciones numérico estocásticas realizadas con el modelo obtenido se muestran robustas a las incertidumbres, no solo de la información geográfica utilizada en su ajuste sino a la de la función de distribución de los parámetros del modelo.

Los trabajos de ortorestitución fotogramétrica con SfM que se están realizando actualmente sobre los datos de vuelos históricos (1956, 1968, 1979 y 1986) y actuales (con RPAS DGPS) sobre la zona permitirán ampliar el intervalo temporal de calibración del modelo que corrobore las hipótesis, así como calibrar y mejorar la formulación del modelo hacia uno de tipo proceso respuesta que incorpore la física de los procesos geomecánicos, la variabilidad del *permafrost* (ERT), las condiciones batimétricas (IHM) y el régimen dinámico del mar en la zona.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado dentro del Proyecto de auscultación de procesos activos sobre la ladera y la costa acantilada del entorno próximo de la Base Antártica española Gabriel de Castilla del INTA – Ejército de Tierra financiado por el Ministerio de Defensa. Los autores agradecen el apoyo recibido de la dotación de la BGdC, de la Oficina de la Campaña Antártica y de la División de Logística del Estado Mayor del Ejército de Tierra, al Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y a la Universidad de Cádiz que han colaborado en la realización del Proyecto.

Nuevo «concepto contra sistemas aéreos no tripulados (C-UAS)» del JEMAD (2018)

Grueso García, Ernesto[1]

[1] Capitán de fragata, Armada española. Centro Conjunto de Desarrollo de Conceptos (CCDC). CESEDEN. Estado Mayor de la Defensa. Castellana 61, 28046 Madrid.

Email: ernestogrueso@fn.mde.es

Resumen

En el último lustro, hemos sido testigos de un aumento exponencial del número de sistemas aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Systems,* UAS), conocidos popularmente como drones, empleados para fines muy diversos por parte de diferentes actores.

La proliferación casi sin control de los UAS de pequeño tamaño al alcance de cualquier usuario gracias a la gran oferta en el mercado, su bajo coste y la facilidad de manejo, pero que incorporan grandes capacidades, ha ocasionado accidentes y situaciones potencialmente peligrosas debido al uso irresponsable de los mismos.

Asimismo, actores no estatales han sabido aprovechar esta tecnología para emplearla con fines maliciosos, ampliando su uso convencional en misiones de inteligencia, vigilancia, adquisición de blancos y reconocimiento, al empleo como vectores de ataque portando armas.

Estos UAS de pequeño tamaño, que vuelan a baja altura y velocidad (*Low Slow Small,* LSS), son difíciles de detectar, identificar y neutralizar con los medios actuales de defensa aérea. Por lo tanto, suponen una nueva amenaza para la seguridad de nuestras Fuerzas Armadas (FAS), tanto desplegadas en misiones en el exterior como dentro del territorio nacional, así como para el resto de los ciudadanos.

Nos hallamos ante una amenaza creciente para la seguridad, que supone un reto tanto tecnológico como institucional para disponer de sistemas contra UAS (C-UAS), capaces de evolucionar y adaptarse al ritmo que lo hacen las tecnologías y la propia amenaza, que puedan hacerle frente de manera eficaz.

En este contexto, el Centro Conjunto de Desarrollo de Conceptos (CCDC) está liderando los trabajos de un grupo de expertos, tanto del ámbito del MINISDEF como de la industria y la academia, para elaborar un concepto C-UAS que oriente el desarrollo de una capacidad integral para la defensa contra UAS LSS, que garantice la protección y libertad de acción de las FAS en los diferentes escenarios y entornos de actuación.

Palabras clave

Concepto, capacidad, UAS, LSS, defensa, amenaza.

1. Introducción

En el último lustro, hemos sido testigos de un aumento exponencial del número de sistemas aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Systems,* UAS), conocidos popularmente como drones, empleados para fines muy diversos por parte de diferentes actores.

La proliferación casi sin control de los UAS de pequeño tamaño, al alcance de cualquier usuario gracias a la gran oferta en el mercado, su bajo coste y la facilidad de manejo, pero que incorporan grandes capacidades, ha ocasionado accidentes y situaciones potencialmente peligrosas debido al «uso irresponsable» de los mismos.

Asimismo, actores no estatales han sabido aprovechar esta tecnología para emplearla con «fines maliciosos», ampliando su uso convencional en misiones de inteligencia, vigilancia, adquisición de blancos y reconocimiento, al empleo como vectores de ataque portando armas.

Estos UAS de pequeño tamaño, que vuelan a baja altura y velocidad (*Low Slow Small,* LSS), son difíciles de detectar, identificar y neutralizar con los medios actuales de defensa aérea. Por lo tanto, suponen una nueva amenaza para la seguridad de nuestras Fuerzas Armadas (FAS), tanto desplegadas en misiones en el exterior como dentro del territorio nacional, así como para el resto de los ciudadanos.

Nos hallamos ante una «amenaza creciente para la seguridad», que supone un reto tanto tecnológico como institucional para disponer de sistemas contra UAS (C-UAS), capaces de evolucionar y adaptarse al ritmo que lo hacen las tecnologías y la propia amenaza, que puedan hacerle frente de manera eficaz.

A finales de diciembre de 2017, la Célula Nacional Contra Artefactos Explosivos Improvisados (CENCIED) identificó y presentó una propuesta de problema militar operativo (PMO) sobre el empleo de UAS utilizados como dispositivos armados improvisados.

Una vez analizada y validada dicha propuesta, se comprobó que las soluciones disponibles en nuestras FAS mitigaban el problema en parte, pero no lo resolvían de una forma integral, por lo que se consideró necesario desarrollar un concepto operativo que proporcionara el marco conceptual en materia de la defensa C-UAS.

A mediados de marzo de 2018, el jefe de Estado Mayor de la Defensa (JEMAD) asignó al «Centro Conjunto de Desarrollo de Conceptos» (CCDC) la tarea de liderar el desarrollo del concepto «contra sistemas aéreos no tripulados (C-UAS)», para lo que se formó un grupo de trabajo de expertos de todos los organismos involucrados[1], al objeto de alcanzar la solución más eficaz para nuestras FAS.

El nuevo concepto C-UAS orientará la futura capacidad integral que permitirá prevenir, detectar, identificar, decidir y derrotar la «amenaza de UAS LSS empleados de forma hostil» contra unidades desplegadas en operaciones e instalaciones militares, dentro y fuera de territorio nacional.

---

1 CENCIED, Centro de Inteligencia de las FAS, Mando de Operaciones, Estado Mayor Conjunto, Dirección General de Armamento y Material, Ejército de Tierra, Armada, Ejército del Aire, Secretaría de Estado de Seguridad, Instituto Español de Estudios Estratégicos, así como de la industria (ART, CENTUM, EME, IECISA, Indra, Thales España) y del mundo académico (Universidades de Murcia, Navarra y Politécnica de Madrid).

2. Desarrollo

2.1. Metodología

El desarrollo conceptual es una de las herramientas básicas de la innovación en las FAS, por lo que la creatividad y la libertad de pensamiento son elementos clave en la búsqueda de la solución más eficaz al problema.

El proyecto para el desarrollo del concepto C-UAS se basa en la metodología CD&E (*Concept Development & Experimentation*), como la sucesión de actividades enfocadas a la identificación, elaboración, depurado y validación de soluciones a problemas que, mediante la aplicación de pensamiento creativo y una metodología analítica, describen cómo una fuerza empleará nuevas capacidades o capacidades ya existentes para operar en un ambiente dado, existente o previsto[2].

El proyecto incluye las siguientes fases: definición, investigación, descubrimiento y desarrollo, experimentación y consolidación.

Durante la primera fase del proyecto, «definición», se analizó la propuesta de PMO para valorar diferen-

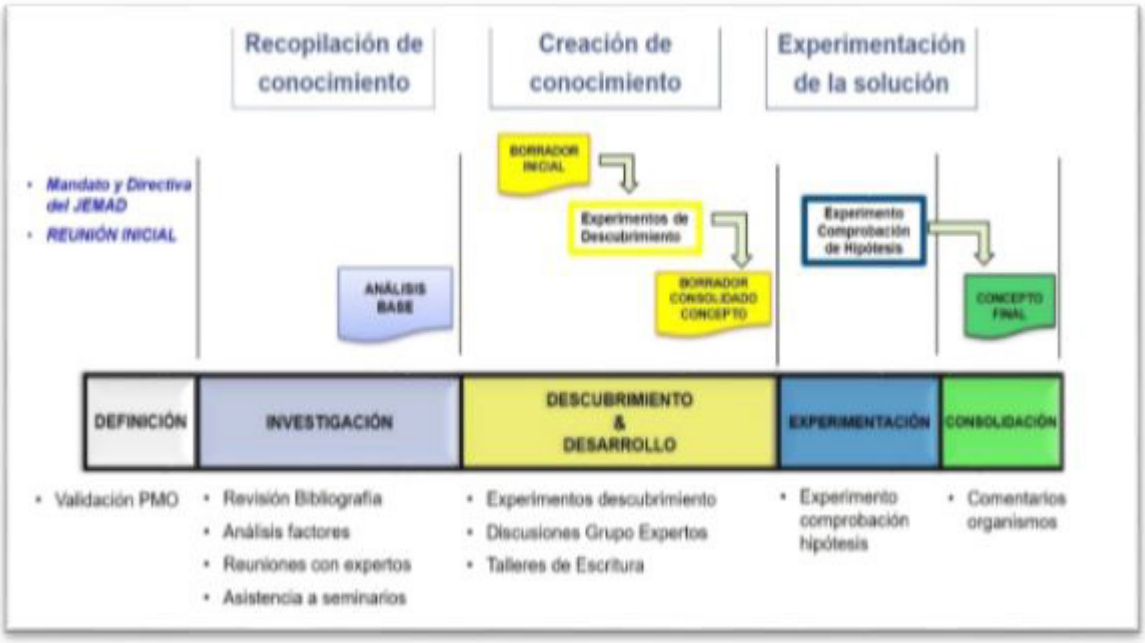


Figura 1. Fases metodología CD&E.

tes aspectos del problema, incluyendo las carencias en operaciones, la identificación de las capacidades actualmente disponibles o en vías de desarrollo y la metodología CD&E para el desarrollo de conceptos.

Asimismo, se refinó la definición del problema que se pretende resolver y se acotaron el conocimiento que era necesario disponer para hacerlo, el entorno en el que se ubica el problema, el espacio de la solución y las partes implicadas.

La fase de definición finalizó con la aprobación de la Directiva de Desarrollo Conceptual del JEMAD, dando paso a la fase de «investigación». El propósito de esta fase fue recabar el conocimiento explícito existente en la organización sobre el problema, la solución actualmente en uso y las posibles soluciones alternativas, así como identificar en qué áreas no existía conocimiento documentado que debiera ser descubierto o desarrollado en el seno del grupo de expertos en las posteriores fases del proyecto.

La fase de investigación finalizó con la publicación del informe «Análisis Base» o «*Baseline Assessment*», realizado mediante la investigación y análisis de la documentación existente sobre el problema

2 JEMAD, PDC-01(A) «Doctrina de empleo de las FAS», 27 de febrero de 2018, párrafo 187.

para mejorar su comprensión y enfocar la tesis de la solución, así como la identificación de las partes de la organización que están en contacto con el problema, quién puede ayudar a resolverlo, y quién está involucrado en la implantación de la solución. El análisis se realizó tanto a nivel nacional como de los principales países del entorno y organizaciones internacionales[3].

Actualmente, el proyecto se encuentra en plena fase de «descubrimiento y desarrollo», durante la que los expertos analizarán los temas de estudio identificados en el análisis base, respondiendo a una serie de preguntas iniciales sobre cada uno de estos temas para obtener el conocimiento que no está documentado, así como orientar el desarrollo de la solución mediante el análisis cualitativo y cuantitativo de las respuestas y el empleo de técnicas creativas como experimentos de descubrimiento.

A lo largo de esta fase se irán elaborando diferentes borradores del concepto C-UAS, que serán realimentados con los resultados de las discusiones de los expertos, hasta llegar a un borrador depurado listo para ser experimentado, o al menos alguna de las hipótesis parciales de la tesis para la posible solución al problema plateado, que se realizará durante la posterior fase de «experimentación».

Finalmente, el borrador del concepto realimentado con los resultados de la experimentación será distribuido a la organización para su revisión y comentarios, fase conocida como de «consolidación», paso previo a la aprobación del mismo por la autoridad que ordenó su desarrollo, es decir, el JEMAD.

2.2. Entorno operativo

El desarrollo exponencial de las tecnologías de ocio y entretenimiento aplicadas al sector de los UAS; la gran oferta en el mercado, facilidad de adquisición, su bajo coste y la sencillez del manejo; las capacidades y eficiencia de los sensores y las plataformas; y el empleo innovador que se realiza, han producido una gran proliferación en el uso de UAS por actores estatales y no estatales, provocando un «cambio en el entorno operativo».

Figura 2. Proliferación del empleo de UAS civiles.

El empleo de UAS en el ámbito civil ha posibilitado la realización de trabajos que ya existían de una forma diferente (como la fotografía, la filmación de vídeo, la inspección de instalaciones, el control explotaciones agrícolas y ganaderas, levantamientos topográficos, etc.) y a la vez ha abierto un abanico de nuevas «oportunidades» para el futuro próximo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que el empleo de UAS no solo ofrece grandes posibilidades, sino que también implica «riesgos y amenazas» debido al peligro que supone tanto el uso irresponsable y negligente, como el empleo intencionado con fines maliciosos y hostiles.

3 Alemania, Estados Unidos, Francia, Italia, Reino Unido, OTAN y UE.

Los «riesgos asociados» a la violación de la intimidad, el uso de UAS con fines terroristas, los vuelos en entornos protegidos por razones de seguridad y la seguridad cibernética deben gestionarse adecuadamente para evitar impactos negativos en la sociedad[4].

En este sentido, la «amenaza más probable» viene dada por el «uso irresponsable y negligente» de los UAS empleados para fines recreativos, la invasión de la privacidad de las personas o el vuelo dentro de zonas restringidas. En general, la mayoría de estas acciones son consecuencia del «desconocimiento de las normas» que regulan la utilización civil de los UAS[5] y de la «falta de concienciación» en los utilizadores, que provocan situaciones de verdadero peligro para las personas y las instalaciones.

Ante esta situación, resulta necesario eliminar o al menos controlar este «peligro» para que no se materialice en daños personales y materiales, mediante el desarrollo de las normas en vigor y la aplicación de medidas eficaces para el control de UAS y operadores, así como mediante soluciones técnicas que permitan la detección de amenazas, identificar a los infractores y evitar los posibles actos ilícitos.

Por el contrario, en los últimos años, las FAS y las FCSE de los principales países han tomado «conciencia» de la amenaza emergente que suponen los UAS LSS «empleados intencionadamente de forma hostil» contra fuerzas e instalaciones militares y civiles, por parte de adversarios[6]. El empleo hostil constituye la «amenaza más peligrosa», ante la carencia de los sistemas de defensa aérea actuales para detectar, identificar y neutralizar los UAS LSS, por lo que al igual que España están desarrollando soluciones para implementar la capacidad C-UAS LSS.

Las «características» propias de los UAS LSS los sitúan fuera de la envolvente de detección, seguimiento, identificación y neutralización de los sistemas actuales de defensa aérea basados en superficie (*Ground Based Air Defence*, GBAD), que no resultan eficaces para combatirlos. Por lo tanto, se excluyen aquellos UAS que por sus dimensiones y cinemática pueden ser neutralizados mediante los sistemas de defensa aérea disponibles en las FAS.

3. Resultados y discusión

3.1. Implicaciones del entorno operativo para las FAS

Nos hallamos ante una «amenaza creciente» para la seguridad, que supone un reto tanto tecnológico como institucional para disponer de sistemas capaces de hacerle frente con eficacia y seguridad en los diferentes escenarios y entornos, y que evolucionen al mismo ritmo que lo hacen los propios UAS.

El estudio de la carencia de capacidad para prevenir, detectar, identificar, decidir y derrotar la amenaza que supone el empleo de UAS LSS de forma hostil contra fuerzas e instalaciones militares, se enmarca en el «entorno operativo actual y futuro», orientado a dos escenarios diferenciados que afectan a nuestras FAS:

- **Unidades e instalaciones militares en operaciones fuera del territorio nacional.** Existe una creciente percepción de amenaza debido a la evolución del empleo hostil de UAS LSS tanto como sensores de vigilancia de la actividad propia, como en su utilización como vector de armamento improvisado.
- **Unidades e instalaciones militares en territorio nacional.** La situación difiere de la anterior en el incremento de la complejidad en el entorno urbano, en el cual hay que tener en cuenta el futuro desarrollo comercial de UAS, la necesidad de coordinación con las FCSE, la normativa que regula la utilización civil de los UAS y los aspectos legales del uso de sistemas C-UAS.

---

4 Ministerio de Fomento. Gobierno de España. «Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de drones en España 2018-2021». Madrid, abril 2018, p. 18.

5 Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea.

6 Adversario es el conjunto de actores de un conflicto a los que se les reconoce como potencial o abiertamente hostiles para los intereses propios o aliados y contra los cuales se puede prever el uso de la fuerza. PDC-01(A). Óp. cit., p. 86.

3.2. ¿Cuál es el problema?

Una vez identificado, validado y refinado el PMO, el enunciado del problema que se pretende resolver es el siguiente: «las FAS no disponen de una "capacidad integral" que permita "prevenir, detectar, identificar, decidir y derrotar" los UAS LSS que operan por fuera de las capacidades de la defensa aérea desde superficie, "empleados de forma hostil" contra las unidades desplegadas en operaciones e instalaciones militares, dentro y fuera de territorio nacional».

3.3. ¿Por qué se produce este problema?

Existen numerosos y variados factores que influyen en la aparición del problema, algunos más relacionados con el «riesgo» que supone el uso irresponsable de los UAS y otros con mayor incidencia en la «amenaza» que representa su empleo hostil o malicioso de forma intencionada.

Entre estos factores se destacan los siguientes: el desarrollo exponencial de las tecnologías de ocio o comercial de los UAS; la gran oferta en el mercado, su bajo coste y la facilidad de manejo; las capacidades de las plataformas y los sensores; las falta de medidas de control de los UAS y operadores para garantizar el cumplimiento de la normativa; la falta de concienciación de los operadores; la disponibilidad y posibilidades de empleo innovador por actores estatales y no estatales.

3.4. ¿Cómo lo estamos abordando?

Hasta el momento, se ha adoptado una «solución interina» materializada en un sistema C-UAS portátil (*Drone Defender*) y dos fijos (*AUDS* y *Drone Hunter*), que si bien proporcionan defensa de forma aislada contra la amenaza actual en su aproximación final y como defensa de punto, no pueden considerarse como una solución integral de defensa C-UAS LSS.

Recientemente la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) ha lanzado el **proyecto «**CONDOR»[7] (CONtra DROne), para el análisis y posterior adquisición de sistemas capaces de detectar, identificar y neutralizar RPAS, enfocado, sobre todo, a las empresas españolas. El proyecto está dividido en tres fases, la primera dirigida a la evaluación operativa de sistemas C-UAS portátiles y fijos durante este año 2018; la segunda prevista para el próximo año, para desarrollos I+D que completar y ajustar requisitos; y por último, una tercera fase durante el año 2020, en la que se conocerá el concurso público para la obtención de estas soluciones.

Por otra parte, desde abril de 2015 existe un grupo de trabajo «Drones» que trabaja a nivel interministerial liderado por la Secretaría de Estado de Seguridad, para solucionar el problema desde una doble perspectiva: la regulación normativa y el desarrollo de un proyecto tecnológico.

3.5. Temas de estudio

La evolución de la amenaza a largo plazo hace pensar que los sistemas de defensa existentes quedarán obsoletos en un breve periodo de tiempo, por lo que es necesario desarrollar una capacidad que además de neutralizar la amenaza actual, sea lo suficientemente flexible para poder adaptarse con agilidad a la evolución tecnológica de la amenaza a medio y largo plazo.

La búsqueda de la solución integral presenta una serie de dificultades que se traducen en interrogantes, y que han sido agrupados por temas de estudio. Las respuestas a estas cuestiones orientarán las claves para el desarrollo de la capacidad contra UAS LSS. Los temas de estudio identificados en el análisis base son los siguientes:

- Entorno internacional.
- Terminología.
- Categorización de la amenaza.

7 DGAM. SDG PLATIN. Documento de necesidad funcional «Proyecto CONDOR». Enero 2018.

- Materiales.
- Infraestructura.
- Gestión y control del espacio aéreo.
- Recursos humanos.
- Formación y adiestramiento.
- Concienciación.
- Fundamentos doctrinales.
- Regulación normativa.
- Organización.
- Coordinación entre FAS y FCSE.
- Aspectos legales y éticos.

Durante la fase de descubrimiento y desarrollo del proyecto se están analizado todos los temas de estudio por parte del grupo de expertos que participan en el proyecto concepto, de manera que se obtengan las recomendaciones de cada uno de los «factores MIRADO»[8] que orienten el desarrollo de la futura capacidad C-UAS LSS.

4. Conclusiones

«Sumar esfuerzos para multiplicar los resultados». El concepto C-UAS orientará el desarrollo de una capacidad integral en respuesta a la amenaza creciente para la seguridad, que supone el empleo malicioso o irresponsable de UAS de pequeño tamaño.

Nos encontramos ante un reto tanto tecnológico como institucional para disponer de sistemas C-UAS capaces de evolucionar y adaptarse al ritmo que lo hacen las tecnologías y la propia amenaza.

Los sistemas C-UAS se emplearán de forma coordinada con los sistemas de defensa aérea y de protección de la fuerza existentes, operando con distintos grados de integración dependiendo del escenario, entorno y tipo de protección.

Referencias

1. *JEMAD, Directiva de Desarrollo Conceptual (DDC 01/2018), Concepto Contra-UAS, Madrid, 09 de marzo de 2018.*
2. *JEMAD, PDC-01(A) «Doctrina de empleo de las FAS», 27 de febrero de 2018.*
3. *Ministerio de Fomento. Gobierno de España. «Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de drones en España 2018-2021». Madrid, abril 2018.*
4. *Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea.*
5. *DGAM. SDG PLATIN. Documento de necesidad funcional «Proyecto CONDOR». Enero 2018.*

8 Material, Infraestructura, Recursos humanos, Adiestramiento, Doctrina, Organización.

Construcción de un puerto de circunstancias en Djibouti (Cuerno de África)

Pasión Jiménez, Laura y Martínez Almajano, Santiago

Email: lpasji1@mde.es, smalmajano@et.mde.es

Resumen

Dentro del contexto de los conflictos internacionales y de las operaciones de mantenimiento de paz, España puede presumir de ser uno de los países más efectivos en el ámbito internacional. Acorde con estas pautas, el presente artículo se basa en el estudio y desarrollo de un puerto de circunstancias en Djibouti (Cuerno de África), con el objeto de facilitar y reforzar las maniobras y actuaciones del destacamento Orión, actualmente desplegado en la zona y encuadrado en la Operación EUNAVFOR-Atalanta, donde España lleva participando desde el año 2008. Su excepcional situación geográfica, unido a la necesidad de integración regional africana como estrategia de desarrollo, son factores claves para que España pueda incrementar su influencia diplomática, económica y política en este pequeño y estratégico país africano. El presente proyecto académico abarca un análisis de las variables y condicionantes incidentes más relevantes, la caracterización de la zona, el estudio del clima marítimo, así como el cálculo y diseño de las diferentes obras de abrigo y defensa (dique en talud, muelle de gravedad, instalaciones portuarias…), siguiendo los criterios de las ROM y de las normas americanas UFC. Todo ello con el objetivo de mejorar notablemente los servicios y habitabilidad de la zona, dinamizar la economía local, y sentar los cimientos para albergar una futura base naval española en la zona. Hoy en día y ante la evolución de la ingeniería, se hace necesario que personal de alto nivel científico y técnico colabore muy estrechamente con los mandos operativos en las necesidades futuras de tecnología y de sistemas avanzados. Y el marco de las operaciones internacionales en las que participa España es ideal para materializar y poner en práctica que la ingeniería militar tiene un brillante porvenir, dentro de la política de defensa, seguridad y cooperación dentro de la OTAN.

Palabras clave

Conflictos internacionales, puerto de circunstancias, estrategia de desarrollo, ROM, UFC, ingeniería militar.

1. Introducción

Hoy en día y, ante la evolución de la ingeniería, se hace necesario que personal de alto nivel científico y técnico colabore muy estrechamente con los mandos operativos en las necesidades futuras de tecnología y de sistemas avanzados. El marco de las operaciones internacionales en las que participa España es ideal para materializar y poner en práctica que la ingeniería militar tiene un brillante porvenir dentro de la política de defensa y cooperación internacional.

Dentro del contexto de los conflictos internacionales y de las operaciones de mantenimiento de paz, España puede presumir de ser uno de los países con más efectivos en el ámbito internacional. Acorde con estas pautas, el presente artículo se basa en el estudio y desarrollo de un puerto de circunstancias en Djibouti (Cuerno de África), con el objeto de facilitar y reforzar las maniobras y actuaciones del destacamento Orión, actualmente desplegado en la zona y encuadrado en la Operación EUNAVFOR-Atalanta, donde España lleva participando desde el año 2008.

2. Desarrollo

2.1. Una situación estratégica

Djibouti se encuentra en el este de África, bordeando el golfo de Adén y el mar Rojo, entre Eritrea, Etiopía y Somalia (figura 1). Es un enclave estratégicamente ubicado, en el cruce de una de las rutas marítimas más transitadas del mundo, que unen Europa, el Lejano Oriente, el Cuerno de África y el Golfo Pérsico, y atractivo para los principales potenciales militares del mundo que hayan decidido establecer allí bases militares.

Figura 1. Localización del proyecto.

Su excepcional situación geográfica, unido a la necesidad de integración regional africana como estrategia de desarrollo, son factores claves para que España pueda incrementar su influencia diplomática, económica y política en este pequeño y estratégico país africano.

2.2. Condicionantes del proyecto

Se han analizado las posibles variables que pueden influir en la construcción del presente puerto, lo que permiten el conocimiento y caracterización de la zona objeto de estudio. Para el presente estudio, se han considerado los siguientes aspectos:

1. Sitio y costos de implementación: se ha escogido la ubicación más ventajosa y las técnicas de construcción más viables económicamente.
2. Minimizar los impactos: ya que el valor medioambiental es bastante alto, debido a la protección de la biodiversidad del mar Rojo.
3. Interacción con otras bases militares: la convivencia y seguridad podrían suponer una amenaza.
4. Escasez de recursos: se ha estudiado la posibilidad de obtener los materiales de construcción necesarios de canteras cercanas.

2.3. Descripción de los trabajos

Una vez analizados los antecedentes y objetivos de estudio, el trabajo se ha dividido en una serie de apartados:

2.3.1. Estudios previos

Previo al diseño de las obras, se estudia el estado y las características de la zona en relación a topografía y batimetría, geología, climatología, así como la vegetación y especies protegidas.

2.3.2. Análisis del clima marítimo

La importancia del estudio del clima marítimo radica en que permite determinar los parámetros del oleaje (altura de ola, periodo de retorno y dirección del oleaje) necesarios para el diseño de las obras marítimas.

Dado que Djibouti no cuenta con una ley de puertos como tal, los criterios seleccionados para el dimensionamiento de las obras se basan en las recomendaciones de obras marítimas (ROM) de puertos del Estado y en los criterios de instalaciones unificadas (UFC) del Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

A continuación, se recoge una síntesis de los datos obtenidos (tabla 1) según los procedimientos definidos en las ROM[1], en función de las tres direcciones más dominantes, en los que vienen indicados: alturas de ola en profundidades indefinidas y a pie de dique, coeficientes direccionales, periodos de pico y significantes.

Dirección	Hs)o[2]	Kr[3]*Ks[4]	αi[5]	Hs)po	Tp	Ts	Nivel de Marea (PMVE)
NE	7,24m	----	---	---	12,2s	11,59s	0,40m
E	6,45m	0,78	56°	5,03m	11,7s	11,12s	0,40m
SE	5,74m	0,93	15°	5,34m	11,2s	10,64s	0,40m

Tabla 1. Clima marítimo en puntos objetivos

2.3.3. Estudio y comparativa de alternativas

Se realiza un análisis multicriterio (tabla 2) en base a tres propuestas distintas, para poder establecer una comparación cualitativa y seleccionar la más apropiada.

---

1 Recomendaciones de Obras Marítimas. Puertos del Estado. España.
2 Altura de ola significante en profundidades indefinidas.
3 Coeficiente de refracción. Método de Snell.
4 Coeficiente de Shoaling. Fórmula de Blunt.
5 Ángulo de líneas batimétricas. Ábaco de Shore Protection Manual Goda.

Factores de proyecto	Pesos	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Valor (V)	Producto (P)	V	P	V	P
Estructura	2	3	6	2	4	1	2
Funcionalidad	3	3	9	2	6	1	3
Construcción	3	3	9	2	6	1	3
Ocupación lecho marino	1	3	3	2	2	1	1
Impacto Ambiental	2	2	4	3	6	1	2
Alarma Social	3	2	6	3	9	1	3
Elasticidad de la solución	1	3	3	2	2	1	1
Plazos y Fases	3	3	9	2	6	2	6
Puestos de trabajos	2	3	6	3	6	3	6
SUMA DE LAS CALIFICACIONES		**55**		**47**		**27**	

Tabla 2. Matriz de ponderación (análisis multicriterio)

2.3.4. Diseño y cálculos estructurales

En cuanto a las obras de defensa, la tipología elegida es la de dique en talud o rompeolas, debido al calado máximo. Se ha empleado la fórmula de Hudson (1) para calcular el peso de los elementos del manto principal.

$$W = \frac{\gamma \cdot H_d^3}{K_D \cdot \cot \alpha \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_\omega} - 1\right)^3} \quad (1)$$

En el caso de las obras de atraque, se ha optado por un muelle de gravedad, debido al tipo de terreno y por la facilidad de construcción. Se trata de una estructura que actúa mediante su propio peso, la cual consiste en una serie de bloques prefabricados que se colocan bajo el agua hasta una cota que permita el hormigonado *in situ* de la superestructura. Las fórmulas (2) y (3) se han empleado en los cálculos de verificación de la estabilidad del muro de dicho muelle.

$$FS_{des} = \frac{\mu * \sum F_v}{\sum F_h} = \mu * \frac{W - F_s + F_{sc_v}}{F_{p1} + F_{p2} + F_{sc_h} + F_B} \quad (2)$$

$$FS_v \frac{\sum M_{est}}{\sum M_{volc}} = \frac{M_w + M_{sc_v}}{M_s + M_{p1} + M_{p2} + M_{sc_h} + M_B} \quad (3)$$

Cabe destacar que, con el fin de mejorar las prestaciones, los bloques de escollera adoptados son del tipo tronco-piramidal, más comúnmente conocidos como cubípodos (figura 2). Son unos elementos prefabricados de hormigón en masa, cuya forma es idónea para evitar torsiones en los impactos durante su construcción y presenta una elevada estabilidad hidráulica.

Figura 2. Dique en talud con cubípodos.

A continuación, se muestran algunas de las secciones tipo de la solución definitiva (figura 3), así como diferentes secuencias del proceso constructivo (figura 4).

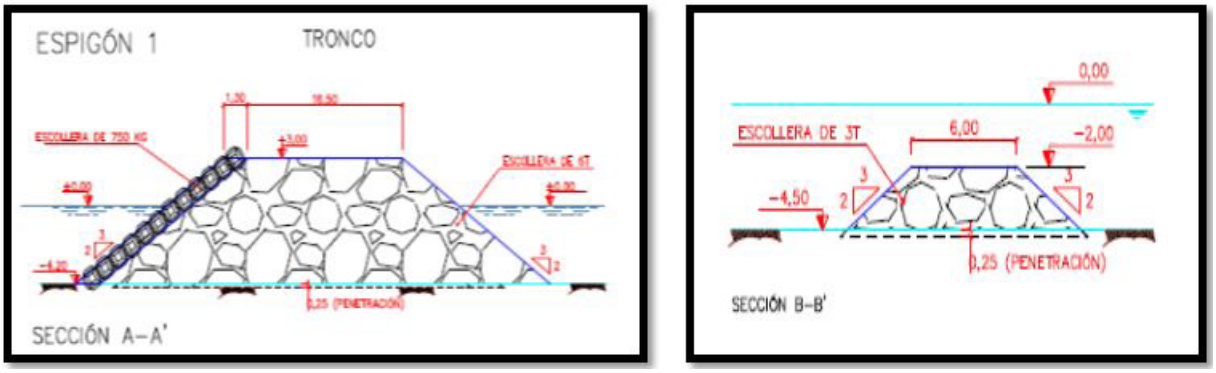


Figura 3. Secciones tipo del dique en talud.

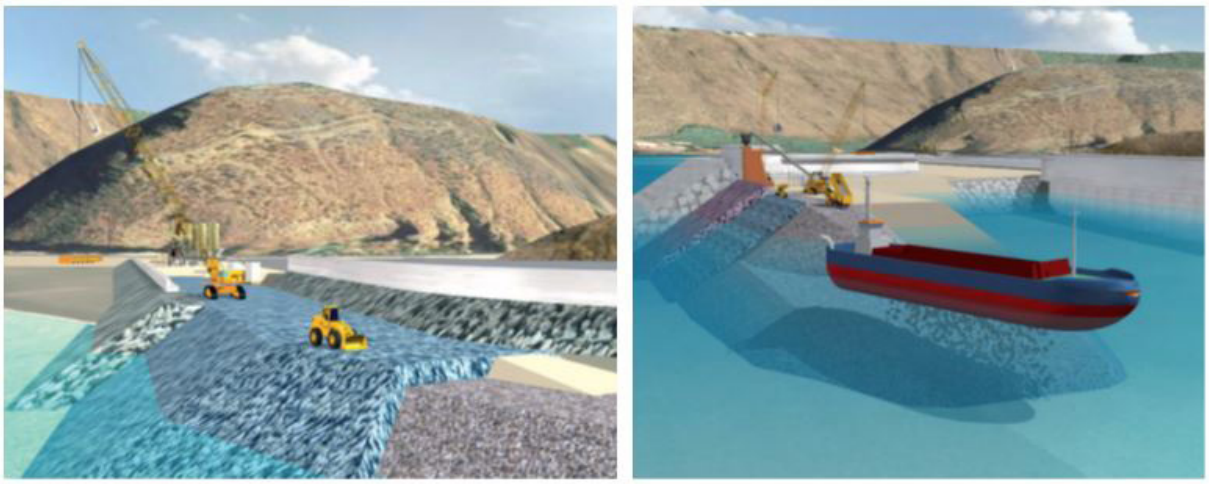


Figura 4. Detalles del proceso constructivo.

2.3.5. Estimación de la duración del proyecto

Para analizar la planificación de la obra, se ha empleado la metodología de la estructura de desglose del trabajo (EDT), cuyo objetivo es reducir el proyecto a tareas que permitan mostrar gráficamente el alcance de los trabajos. De esta forma, los trabajos se han estructurado hasta tres niveles, con un total de nueve capítulos o tareas principales:

1. A: Trabajos previos.
2. B: Preparación de los trabajos.
3. C: Obra civil.
4. D: Instalaciones.
5. E: Acabados.
6. F: Control de calidad.
7. G: Medidas ambientales.
8. H: Gestión de residuos.
9. I: Seguridad y salud.

En el siguiente diagrama de Gantt (figura 5) se plasman las duraciones de cada una de dichas actividades y las holguras que disponen las mismas, resultando una duración total de 126 días hábiles, lo que supondría algo más de cuatro meses efectivos.

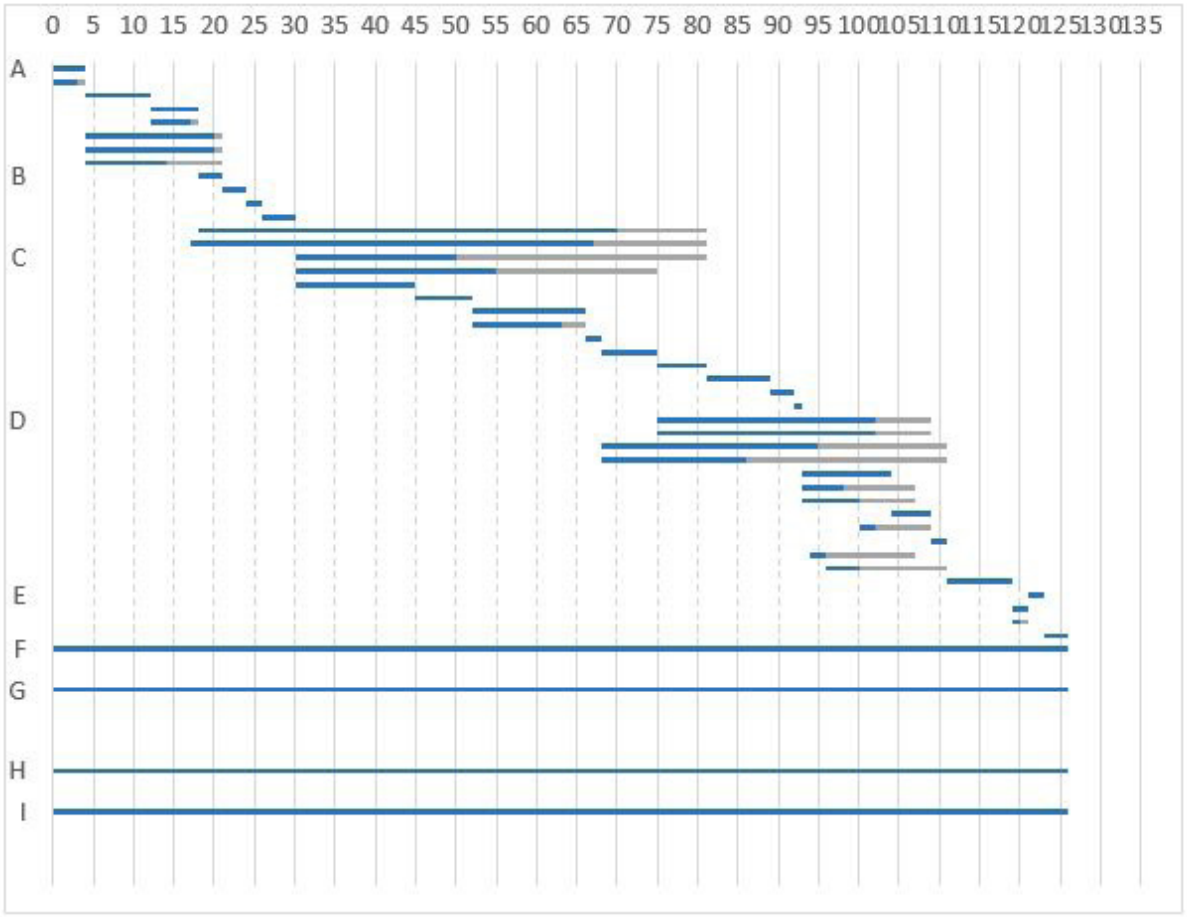


Figura 5. Diagrama de Gantt.

2.3.6. Estimación del presupuesto

Al igual que en el caso de los tiempos, los costos se han estimado según la opinión de expertos y la experiencia previa en proyectos similares anteriores. Para ello, se ha dividido la obra por capítulos que engloben unidades de obra con una misma finalidad. El presupuesto de ejecución asciende a 955.000 € que, añadiendo los gastos generales, el beneficio industrial y el IVA, alcanzaría poco más del millón de euros (tabla 3).

ESTIMACIÓN DEL PRESUPUESTO			
		COSTES	PORCENTAJE
CAPÍTULO 1	ACTUACIONES PREVIAS	31.000,00	3,25 %
CAPÍTULO 2	MOVIMIENTO DE TIERRAS	85.000,00	8,90 %
CAPÍTULO 3	DIQUE EN TALUD	550.000,00	57,59 %
CAPÍTULO 4	MUELLE DE GRAVEDAD	180.000,00	18,85 %
CAPÍTULO 5	FIRMES Y PAVIMENTOS	25.000,00	2,62 %
CAPÍTULO 6	INSTALACIONES	16.000,00	1,68 %
CAPÍTULO 7	ELEMENTOS AUXILIARES	20.000,00	2,09 %
CAPÍTULO 8	VARIOS	48.000,00	5,03 %
TOTAL PEM		**955.000,00**	100,00 %

Tabla 3. Estimación de costes

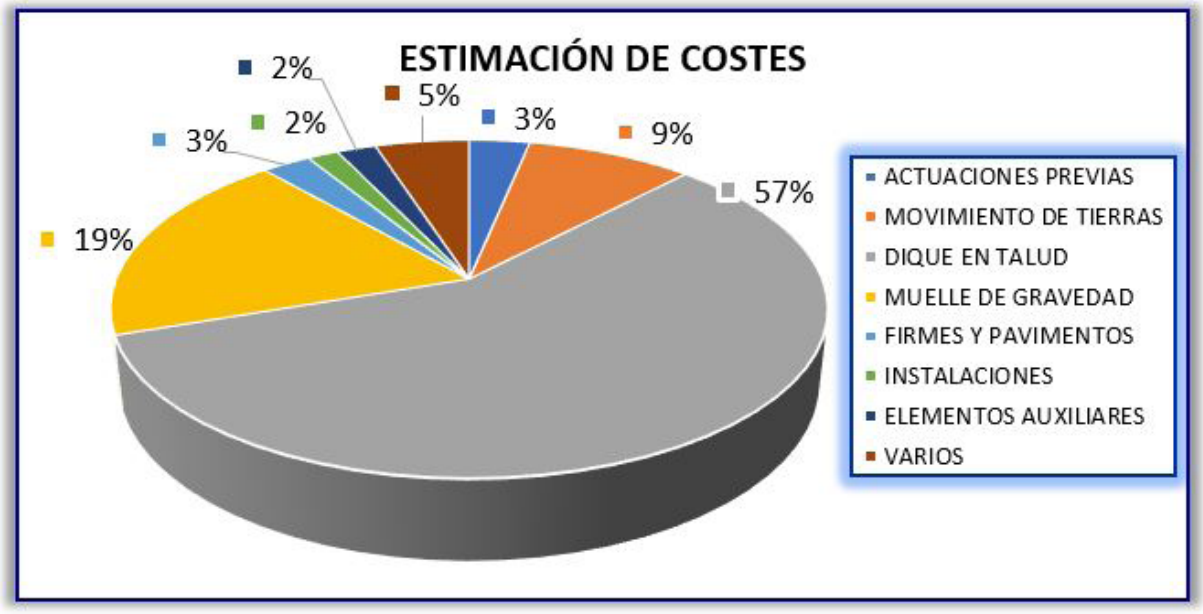


Figura 6. Distribución de costes.

3. Resultados y discusión

El crecimiento de la actividad del actual puerto de Djibouti, unido a las características e incidencia ambiental de sus principales tráficos, ha llevado a la necesidad de ampliar sus instalaciones en el exterior de la ciudad.

Así pues, el presente artículo se basa en un análisis de las variables y de los condicionantes incidentes más relevantes, la caracterización de la zona, el estudio del clima marítimo, así como el cálculo y diseño de las diferentes obras de abrigo y defensa (dique de abrigo, muelle de gravedad, instalaciones portua-

rias…). Todo ello con el objetivo de mejorar notablemente los servicios y habitabilidad de la zona, dinamizar la economía local, y sentar los cimientos para albergar una futura base naval española en la región.

4. Conclusiones

Es vital entender la importancia de este tipo de proyectos en el contexto político-social que nos encontramos, así como resaltar el papel que España desempeña en el continente africano, ampliando su influencia económica e instaurando lazos culturales y vínculos comerciales.

Por último, cabe destacar la consideración de la figura del ingeniero politécnico en una misión internacional, cada vez más habitual, teniendo que hacer frente al reto que representan las exigencias científico-tecnológicas de las nuevas y potentes tecnologías presentes en los actuales sistemas de armas.

Agradecimientos

Agradecer a mis tutores académicos de la Escuela Politécnica Superior del Ejército Tcol. D. Jesús Ramón Simón del Potro y Tcol. D. Santiago Martínez Almajano por el apoyo prestado y por la confianza depositada para el desarrollo de este tipo de proyectos, así como por la información recibida para su elaboración.

Referencias

1. *Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.*
2. *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras en el ámbito del Ministerio de Defensa. Orden Ministerial 76/2013, de 17 de diciembre (BOE 24/12/2013).*
3. *Normas y condiciones generales para la contratación de Puertos del Estado y de las Autoridades Portuarias. Orden FOM/4247/2006.*
4. *ROM 0.0 Procedimiento General y Bases de Cálculo. Puertos del Estado.*
5. *ROM 0.2-90 Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. Puertos del Estado.*
6. *ROM 0.4-95 Acciones climáticas II: Viento. Puertos del Estado.*
7. *ROM 3.1-99 Recomendaciones para el proyecto de la configuración marítima de los puertos: Canales de Acceso y Áreas de Flotación Marítimas. Puertos del Estado.*
8. *Unified Facilities Criteria (UFC), US Army Corps of Engineers. Military harbors and coastal facilities, Engineering and Design of Military Ports, Moorings, Design Piers and Wharves.*
9. *Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas. Puertos del Estado.*
10. *Iribarren, R. y Nogales. Libro de Obras Marítimas: Oleaje y diques.*
11. *Vicente Negro Valdecantos. Libro de diseño de diques rompeolas.*
12. *Recommendations of the committee for waterfront structures harbours and waterways EAU, 2004.*
13. *Manuales del PIANC (Comisión Internacional para la Navegación).*
14. *Centro de Inteligencia de las FAS. Manual de área de Yibuti.*
15. *Laura Pasión Jiménez. Trabajo de fin de formación: Construcción de un puerto de circunstancias en Djibouti. Escuela Politécnica Superior del Ejército, 2018.*

Guía básica para la protección de edificios frente a ataques terroristas

Vieites Manso, Javier[1*]; García Salinas, Alberto[2*]; Martínez Almajano, Santiago[3]; Muñoz Jiménez, Mariano[4] y Ropero Azañón, Miguel Ángel[5]

1 USBA El Copero. Teniente del Cuerpo de Ingenieros Politécnicos del Ejército de Tierra. Carretera Isla Menor S/N, Sevilla (Dos Hermanas). 41007 Sevilla. jvieman@mde.es

2 Academia de Artillería. Teniente del Cuerpo de Ingenieros Politécnicos del Ejército de Tierra. C/San Francisco, 25. 40001 Segovia. agars54@mde.es

3 Escuela Politécnica Superior del Ejército. Profesor titular. Teniente coronel. Cuerpo de Ingenieros Politécnicos del Ejército de Tierra. C/ Joaquín Costa, 6. 28002 Madrid. smalmajano@gmail.com

4 Escuela Politécnica Superior del Ejército. Profesor titular. Comandante. Cuerpo de Ingenieros Politécnicos del Ejército de Tierra. C/Joaquín Costa, 6. 28002 Madrid.

5 Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «*Esteban Terradas»,* Laboratorio de Ingenieros del Ejército *«General Marvá».* C/ Princesa 36-38. 28008 Madrid. roperoama@inta.es (MARA).

* Autor principal y responsable del trabajo.

Resumen

La actual globalización de la amenaza terrorista ha desembocado en la preocupación creciente por proteger de diferentes ataques las infraestructuras e instalaciones, en particular frente a explosiones. A nivel nacional, la latente inseguridad no ha dado lugar a normativa de aplicación para minimizar los efectos de este tipo de ataques sobre nuestros edificios, ni tan siquiera en aquellos más sensibles por su criticidad, ya sean públicos o privados.

La complejidad de encontrar soluciones transversales y económicas de fácil implantación para minimizar los daños generados por estos ataques, hace que sea difícil reducir sus efectos por ser en muchos casos impredecibles, complejos y cambiantes en el tiempo. Derivado de estos antecedentes, se han recopilado un conjunto de recomendaciones como embrión de un código de buenas prácticas de aplicación en cualquier edificio para mitigar las graves consecuencias de los efectos tanto de la sobrepresión producida como de los fragmentos proyectados en una explosión.

El estado del arte avoca a adaptar e implementar según la situación los manuales del Gobierno de Estados Unidos elaborados por su Agencia Federal de Gestión de Emergencias (Federal Emergency Management Agency – FEMA) en los escenarios nacionales. Por este motivo, se ha desarrollado una herramienta de apoyo a la decisión a nivel facultativo para todos aquellos técnicos que se les asignen tareas de diseño de infraestructuras, con independencia de su nivel ingenieril de formación.

Entre los aspectos abordados destacan la evaluación del origen de la amenaza, punto crucial para detectar las vulnerabilidades a afrontar. En segundo lugar, se desarrollan tanto el escenario como las medidas de actuación en los alrededores y en la infraestructura a proteger. Finalmente, identificadas las debilidades a contrarrestar se proponen ratios económicos y sociales de la adopción de dichas medias según su coste y su nivel de amenaza para su aceptación social.

Palabras clave

Protección, edificio, diseño, ataque terrorista.

1. Introducción

Este documento basa su contenido en la recopilación de diversa información contenida en los diferentes manuales que ha publicado FEMA (Federal Emergency Management Agency – Agencia Federal de Gestión de Emergencias) en Estados Unidos. Por lo tanto, al igual que en los citados manuales, la información recopilada es de aplicación voluntaria ya que no es de obligado cumplimiento; las autoridades competentes son las encargadas de determinar el grado de implantación de dichas recomendaciones. Estas carecen de eficacia en edificios con un gran valor simbólico o que cuenten con unas características que los hagan objetivos de ataques a gran escala, como por ejemplo, rascacielos (así como edificios diplomáticos que quedan fuera de las premisas que se exponen en la guía). Para este conjunto de edificios, el análisis de diseño ha de elaborarse con especial detalle y teniendo en cuenta sus peculiaridades propias.

Se pretende proporcionar una guía básica de consulta, tanto para gente con conocimientos técnicos, como para aquellos que carecen de conocimiento alguno sobre temas de ingeniería o arquitectura, en relación con las medidas en materia de seguridad a llevar a cabo en este tipo de edificaciones.

Es importante destacar que en España, en la actualidad, no existe ninguna normativa de aplicación en referencia a las medidas de seguridad a adoptar en edificios y espacios públicos frente a la amenaza de un ataque terrorista. Por lo tanto, se ha elaborado la guía para conseguir un primer acercamiento a las consideraciones en materia de seguridad que se tienen que evaluar e implementar, tanto si se quiere construir un edificio de nueva planta como remodelar uno ya existente.

Como fin último, se pretende que la guía sirva para que el responsable del edificio/infraestructura pueda optar por una decisión racional, y que goce de un cierto nivel de seguridad, a la hora de implantar o ejecutar ciertas medidas en materia de seguridad.

2. Desarrollo

El documento es una guía de seguridad diseñada para proteger personas, instalaciones, equipamientos y edificios. Esto se logra mediante la aplicación planificada e integrada de otros programas. Para llevar a cabo dicha planificación y poder implementar las medidas que propone FEMA, la guía se ha estructurado de la forma que se puede observar a continuación.

2.1. Evaluación de la amenaza

El objetivo de este apartado es evaluar las vulnerabilidades que tiene la infraestructura con respecto a la amenaza procedente de artefactos explosivos, de fuego directo (armas ligeras), y las derivadas de ataques químicos, biológicos, nucleares y radiológicos (NRBQ). Cada tipo de amenaza conlleva una serie de medidas de seguridad a implementar, según las peculiaridades del edificio objeto de análisis y el entorno y el medio social en el que está integrado.

La identificación y caracterización de las amenazas terroristas es el primer paso en el desarrollo de un programa de protección antiterrorista para evaluar la capacidad de una infraestructura de sobrevivir a un ataque.

2.1.1. Identificación de la amenaza

Se define en función del escenario. Para ello es necesario conocer los agresores que generalmente realizan actos hostiles contra personas, infraestructuras y/o equipos; las herramientas, armas y explosivos para establecer el nivel de protección necesario en una infraestructura acomodando en cada caso las herramientas y materiales empleados, y de sus manipuladores. Por últimto las tácticas, que son las estrategias ofensivas empleadas por los agresores, que reflejan sus capacidades y objetivos.

2.1.2. Definición de la amenaza

Los grupos terroristas operan de modo clandestino, por lo que la información necesaria para definir y analizar la amenaza terrorista a menudo es más difícil de obtener que la información que trata otro tipo de amenazas. Se han identificado seis factores que se utilizan en la recopilación y el análisis de la información de todas las fuentes relacionadas con la amenaza terrorista, que son: *existencia, capacidad, historial, intenciones, focalización* y *entorno de seguridad*.

2.1.3. Nivel de la amenaza

El grado en que un activo, equipo o instalación es protegido contra una amenaza se basa principalmente en su relevancia e importancia, tanto a nivel institucional como social. El nivel de amenaza para una zona se determina después de que la información sobre los factores de riesgo es reunida y analizada. Cuanto mayor sea la presencia de estos factores, mayor será el nivel de riesgo o amenaza.

2.1.4. Evaluación de la vulnerabilidad

Se aborda la susceptibilidad al ataque de una infraestructura y la amplia gama de amenazas que puede sufrir la seguridad de las personas, así como la seguridad de la misma. Como cada instalación puede tener diferentes niveles de amenaza, el nivel de protección varía. Los niveles más altos de protección generalmente se consiguen en el diseño original del proyecto de construcción de una infraestructura o por una actualización y modernización relativamente extensa de la misma.

Consideradas las posibles amenazas y su repercusión en el diseño preliminar, se debe entrar en la fase estratégica dirigida a la mitigación, para llevar a cabo una labor de prevención de posibles amenazas.

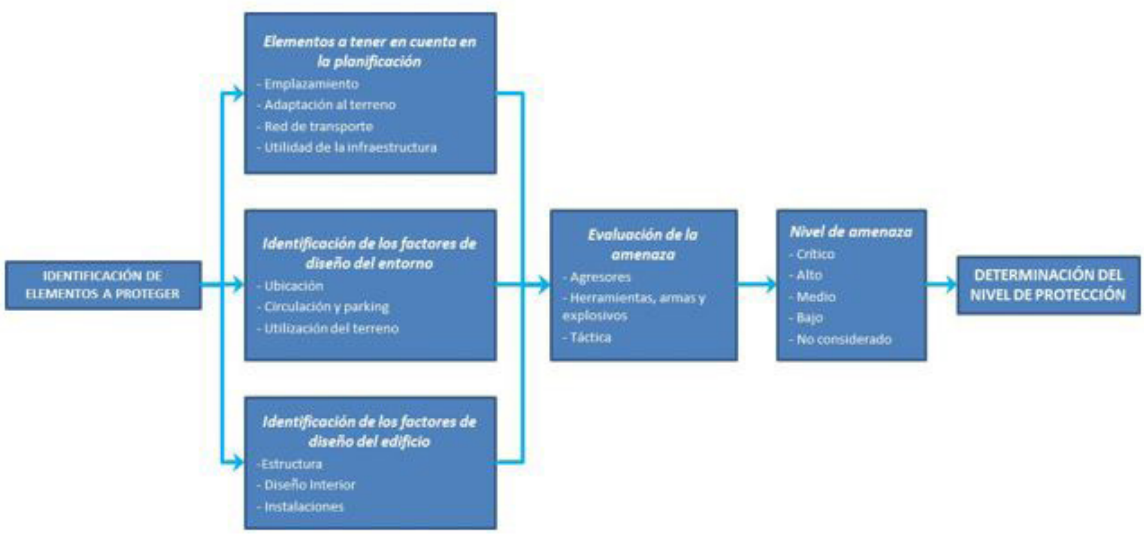


Imagen 1. Pasos para realizar una evaluación de la vulnerabilidad.
Guide Installation Force Protection USA Air Force.

2.2. Entorno de actuación, capas de seguridad y medidas de actuación

Esta parte del documento abarca una zonificación del terreno que rodea a la infraestructura. Las diferentes líneas o capas de defensa que rodean a un edificio o complejo de edificios, son los espacios físicos que proporcionan seguridad y distancia frente a posibles ataques terroristas.

Lo pretendido es crear un concepto de defensa en profundidad acumulando obstáculos que deben ser superados, lo que proporciona un valioso tiempo de respuesta a los servicios de seguridad para poder intervenir en la zona.

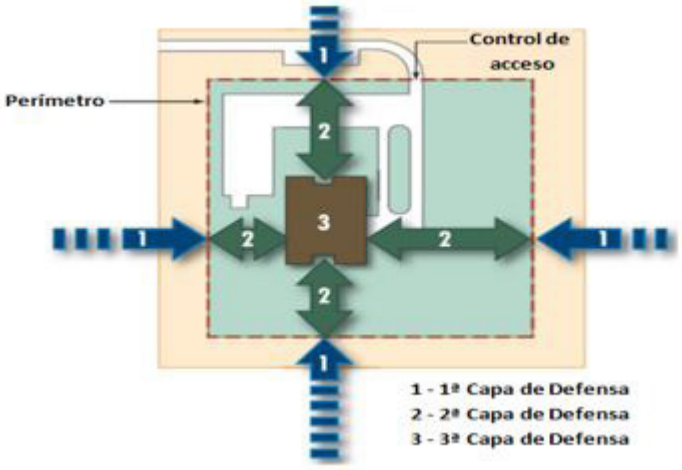


Imagen 2. Capas objeto de análisis. FEMA 430.

2.2.1. Capa 1: exterior

Se corresponde con la frontera entre el entorno y la instalación, situada en el límite de la propiedad. El diseño de esta primera línea o capa, puede verse modificado por el conjunto de actividades que se realicen en las inmediaciones.

Para dicho diseño, se deberían considerar aspectos externos e internos. El aspecto externo envuelve las características de los alrededores (densidad de población, actividades que se realizan en el entorno, la implicación de la población en las mismas,…).

Es importante conseguir una adaptación al entorno que rodea a la infraestructura. En cuanto al aspecto interno, se incluyen la cantidad de terreno disponible con la que podemos contar para conseguir una distancia aceptable de seguridad ante explosiones, así como la implementación de elementos de la naturaleza a modo de barreras antiterroristas.

2.2.1.1. Diseño urbano

En ocasiones, surge la problemática de otorgar una cierta colocación al edificio para proporcionar unas determinadas características en materia de seguridad, enfrentadas con el diseño convencional y más adecuado.

2.2.1.2 Orientación, distribución y geometría del edificio

Para conseguir la correcta ubicación de un edificio, la adaptación al entorno es un punto clave. En cuanto a la orientación del edificio, esta tiene una relevancia significante, ya no solo en términos de eficiencia energética, si no en la manera en que proporciona la seguridad necesaria a sus ocupantes.

La dispersión de edificios y de diferentes actividades reduce el riesgo de que se produzcan daños colaterales en propiedades colindantes. No obstante, las medidas de seguridad a adoptar tendrían que ser mayor en número.

Un edificio con formas singulares, a la hora de recoger las ondas de choque derivadas de una explosión, puede amplificar el efecto de la onda expansiva, lo que conlleva un incremento de los posibles daños estructurales.

2.2.2. Capa 2: intermedia

Comprende el espacio existente entre el perímetro defendido y los edificios o infraestructuras que requieren protección.

Para la planificación de esta capa, es importante disponer de una distancia suficiente de separación entre los terroristas y/o artefactos explosivos y los edificios protegidos, ya que la carga explosiva y sus efectos disminuyen exponencialmente con la distancia. No existe una distancia de separación ideal: esta viene determinada por el tipo de amenaza, el tipo de construcción y el nivel de protección deseado, y variará con cada proyecto.

2.2.2.1. ˙Diseño de las vías interiores

La amenaza de un ataque mediante la utilización de un vehículo se puede reducir significativamente al controlar su velocidad en el interior del recinto y eliminar la posibilidad de una colisión directa con el edificio.

2.2.2.2. Barreras activas y pasivas

La seguridad perimetral está diseñada para proteger a los viandantes y el material urbano contra amenazas, tales como vehículos que penetren sin autorización y a gran velocidad a zonas de alto riesgo, protección frente a explosiones, etc. El elemento clave para proteger estas instalaciones es diseñar una red de barreras que proporcionen un nivel de seguridad adecuado según la dimensión de la amenaza.

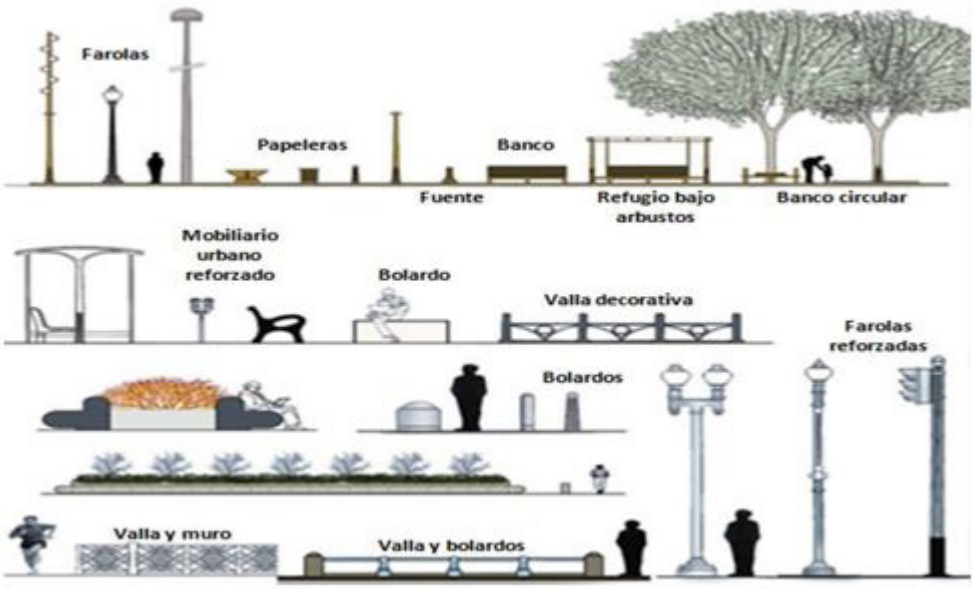


Imagen 3. Barreras pasivas. FEMA 426.

2.2.2.3. Seguridad y accesos

El diseño de los puntos de control de entrada debe cumplir varias funciones relacionadas con la seguridad, como gestionar el tráfico, controlar la entrada y dirección de los vehículos, administrar las colas de espera y apoyar al personal de inspección.

2.2.2.4. Aparcamiento y zonas de carga y descarga

Las zonas de carga/descarga y los accesos a áreas de servicio se requieren frecuentemente para el funcionamiento de un edificio. Los vehículos pueden transportan armas, artefactos explosivos y/o terroristas a un edificio. Por esta razón, se debe dedicar especial atención a estas áreas de servicio para evitar intrusos.

2.2.3. Capa 3: interior del edificio

Este apartado incluye el diseño bajo parámetros de seguridad de los atributos típicos del edificio como son orientación, distribución y geometría, asociados en definitiva a su configuración general; su envol-

vente, su estructura, la planificación del espacio interior, las instalaciones de climatización, eléctricas y de comunicaciones y de seguridad.

La clave del concepto de defensa de este nivel reside en construir estructuras y/o fachadas reforzadas, que puedan mitigar las acciones procedentes de una explosión.

2.2.3.1 Estructura

La configuración estructural del edificicio le permite soportar su propio peso y el de todas las cargas debidas al viento y a terremotos. Algunas veces, este sistema estructural es el mismo que el de la envolvente. El armazón del edificio es la cimentación y los muros, forjados, vigas y pilares. Esto permite que la infraestructura no colapse aún cuando la fachada haya sufrido graves daños.

En cuanto a la configuración del edificio, el refuerzo estructural en los tres primeros pisos es crítico. A medida que se asciende, las medidas de refuerzo pueden reducirse.

Para su diseño han de tenerse en cuenta una serie de consideraciones como usar armaduras simétricas, reducir al mínimo el espacio entre pilares, siendo recomendable no superar espaciados de luces de 6 m, 9 m como máximo; y por último, realizar un diseño equilibrado, con respuesta dúctil y redundancia estructural.

2.2.3.2 Sistemas e instalaciones

En la guía se aportan una serie de pautas y criterios a tener en cuenta en cuanto al diseño y utilización de las instalaciones eléctricas, de contraincendios, de climatización y de comunicaciones.

2.3. Repercusiones sociales y económicas

Una vez definidas las partes críticas de la infraestructura y los procesos que son más vulnerables y/o críticos, el siguiente paso debería ser identificar y establecer una ponderación entre *medidas a adoptar/costes/nivel de amenaza*. Conseguir un equilibrio es la clave para lograr la aceptación social.

Al llevar a cabo cualquier tipo de actuación en materia de seguridad, han de considerarse los *costes fijos*, los cuales no dependen de la dimensión o magnitud del ataque y los *costes variables*, que sí que dependen del nivel de amenaza y de su magnitud.

En el proceso de evaluación de riesgos, el responsable de la infraestructura se enfrenta a tres escenarios posibles. El primero consistiría en aceptar el riesgo y no realizar ninguna acción. En segundo lugar, llevar a cabo una planificación de evaluación de riesgos y ponderar la adopción de ciertas medidas en función del nivel de amenaza afrontado. Esta opción es la más eficiente. Por último, proteger el edificio contra todo tipo de amenazas para conseguir minimizar los riesgos potenciales al máximo. Esta opción es la más eficaz.

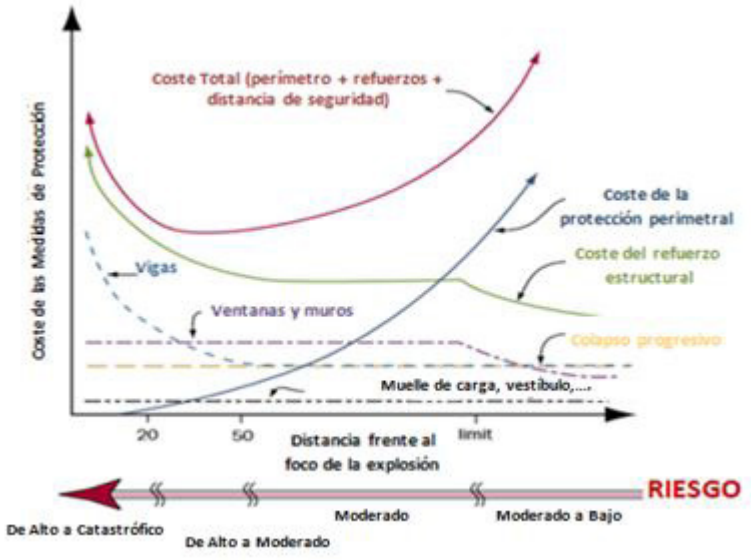


Imagen 4. Curvas de costes. FEMA 430.

3. Listas, figuras y tablas

Imagen 1. Pasos para realizar una evaluación de la vulnerabilidad. Guide Installation Force Protection USA Air Force.

Imagen 2. Capas objeto de análisis. FEMA 430.

Imagen 3. Barreras pasivas. FEMA 426.

Imagen 4. Curvas de costes. FEMA 430.

4. Resultados y discusión

La guía de referencia elaborada propone directrices y recomendaciones para la protección y diseño de edificios, infraestructuras y sus inmediaciones, garantizando el nivel de seguridad que se determine según la amenaza y el escenario definidos. En resumen, se pretende ofrecer una serie de métodos y técnicas de diseño, para la definición de la arquitectura, el dimensionamiento de la estructura, la elección de la envolvente y el cálculo de las instalaciones de un edificio en materia de seguridad a partir de lecciones aprendidas.

En este manual se ha realizado un estudio sobre el diseño de un edificio y sus alrededores para conseguir un cierto nivel de seguridad, en función de la amenaza o peligros (ataque directo, NRBQ o explosivos) a los que deben de hacer frente estas infraestructuras.

5. Conclusiones

La concienciación en el ámbito de la protección de edificios frente ataques terroristas y la capacitación técnica para su diseño se han convertido en una herramienta fundamental para aumentar la supervivencia de las víctimas y mitigar los efectos de los ataques. Necesariamente, se debe ahondar en el conocimiento y las consecuencias de aplicar la metodología expuesta para mitigar los riesgos y disponer de herramientas útiles para el diseño de edificios seguros.

Referencias

1. *FEMA RISK MANAGEMENT SERIES PUBLICATIONS Federal Emergency Management Agency, 2003. Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings, FEMA 426, Washington, D.C.*
2. *FEMA RISK MANAGEMENT SERIES PUBLICATIONS Federal Emergency Management Agency, 2003. Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks, FEMA 427, Washington, D.C.*
3. *FEMA RISK MANAGEMENT SERIES PUBLICATIONS Federal Emergency Management Agency, 2003. Primer to Design Safe School Projects in Case of Terrorist Attacks, FEMA 428, Washington, D.C.*
4. *FEMA RISK MANAGEMENT SERIES PUBLICATIONS Federal Emergency Management Agency, 2007. Site and Urban Design for Security, FEMA 430, Washington, D.C.*
5. *FEMA RISK MANAGEMENT SERIES PUBLICATIONS Federal Emergency Management Agency, 2005. Risk Assessment A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings, FEMA 452, Washington, D.C.*
6. *FEMA RISK MANAGEMENT SERIES PUBLICATIONS Federal Emergency Management Agency, 2006. Design Guidance for Shelters and Safe Rooms, FEMA 453, Washington, D.C.*
7. *FEMA RISK MANAGEMENT SERIES PUBLICATIONS Federal Emergency Management Agency, 2009. Handbook for Rapid Visual Screening of Buildings to Evaluate Terrorism Risks, FEMA 455, Washington, D.C.*
8. *FEMA RISK MANAGEMENT SERIES PUBLICATIONS Federal Emergency Management Agency, 2008. Incremental Protection for Existing Commercial Buildings from Terrorist Attack, FEMA 459, Washington, D.C.*

Uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la selección del emplazamiento óptimo de una base militar

Guerra Albarracín, Rafael [1], Álvarez Feijoo, Miguel Ángel [2,*] Suárez garcía, Andrés 2, Martinez Valenzuela, José [3], Carrasco Pena, Pedro[1], Arce Fariña, Elena[2]

1 Armada Española. rafaguerranc@gmail.com (RGA); pedrocarrascopena@gmail.com (PCP).

2 Centro Universitario de la Defensa (Marín). alvarezfeijoo@cud.uvigo.es (MAAF); andres.suarez@cud.uvigo.es (ASG); elena.arce@cud.uvigo.es (EAF).

3 IRSOLAV. jmvalenzuela@irsolav.com (JMV).

* Autor principal y responsable del trabajo.

Resumen

La planificación y desarrollo de cada operación militar implica la combinación de múltiples tareas y actividades coordinadas fundamentales para cumplir con su finalidad. Entre todas ellas, la localización de la base militar es de vital importancia en el desarrollo de cualquier operación militar, tanto en el extranjero como en territorio nacional, por ser el centro neurálgico de dichas operaciones.

Durante el estudio del planeamiento de una base militar, entran en juego numerosos factores geográficos (acceso, poblaciones, recursos disponibles, etc.). Hoy en día, una de las principales herramientas disponible para realizar un estudio combinado de los mencionados factores son los sistemas de información geográfica (SIG). Estos permiten el análisis y la visualización de una alta cantidad de datos de manera sencilla, procesando la información geográfica en forma de capas de datos.

En este documento, se utiliza el proceso de análisis jerárquico combinado con técnicas SIG para optimizar la selección de alternativas para el emplazamiento de una base militar dentro de un territorio en concreto, en función de unos parámetros específicos. Además, se analiza la flexibilidad de dichas técnicas, variando la importancia y pesos de cada parámetro en función del tipo de base militar especificado.

Palabras clave

Eficiencia energética, buque de guerra, consumo de combustible, mejora energética, medioambiente.

1. Introducción

La selección del emplazamiento de la base militar conlleva un largo proceso al depender de numerosos factores, tiene una enorme importancia en el desarrollo de las operaciones y, ante todo, deberá velar por la seguridad del personal que esté situado en ella. En los primeros compases, este proceso consistía en estimaciones *in situ*, midiendo aquellos parámetros que se consideraban importantes, y una vez hechas las mediciones sobre el terreno, posibles localizaciones, se llegaba a la conclusión de cuál era la más idónea. Estas técnicas podían llegar a poner en peligro a aquellas personas encargadas de realizar este estudio, debido a que las ubicaciones podían estar localizadas en terrenos controlados por fuerzas enemigas o de difícil acceso. Este proceso ha ido evolucionando hasta llegar a los procedimientos usados hoy en día, que son el uso de técnicas SIG (sistemas de información geográfica) para obtener la localización óptima del emplazamiento de una base militar.

Los sistemas de información geográfica (SIG) son usados entero en una gran diversidad de actividades administrativas, militares y científicas, debido a que son capaces de llevar a cabo de manera eficiente el manejo de grandes cantidades de datos espaciales y de atributos, los cuales han sido extraídos de distintas fuentes [1]. Se pueden definir como un sistema de *hardware*, *software* y procedimientos para facilitar el manejo, manipulación, análisis, modelado, representación y presentación de datos georreferenciados para resolver problemas complejos relacionados con el planeamiento y administración de los recursos [2]. La interpretación de los SIG es sencilla gracias a una visualización en capas del conjunto de datos que lo componen. Este conjunto de datos se puede definir como el grupo de mapas de la misma zona de un territorio, donde una localización conocida tiene las mismas coordenadas en todos los mapas incluidos en el sistema. De esta manera, es posible analizar sus características temáticas y espaciales para obtener un mayor conocimiento de la zona [3].

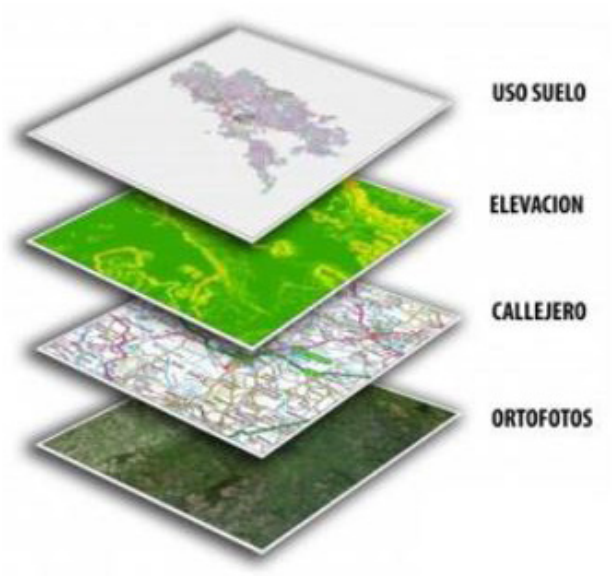


Figura 1. Capas SIG [3].

Pero el uso de los SIG de manera independiente no ofrece la posibilidad de realizar la selección de un emplazamiento, debido a que no ofrecen la capacidad de realizar toma de decisiones basadas en análisis multicriterio y establecer recomendaciones de localizaciones óptimas. Por lo tanto, surge la necesidad de combinar métodos de toma de decisiones basadas en análisis multicriterio (MCDM, del inglés *Multi-criteria Decision Making*) y los sistemas de información geográfica para obtener resultados para la optimización de emplazamientos de bases militares. La combinación de dichos métodos es un concepto ampliamente aceptado para resolver problemas espaciales en muchas áreas, tales como medioambiente, ecología, transporte, planificación urbanística y de manera creciente, emplazamientos de bases militares [1, 4, 5].

Las técnicas SIG combinadas con métodos de análisis multicriterio son en la actualidad, el concepto más avanzado empleado por aquellos responsables en la toma de decisiones, para seleccionar la opción más idónea de una lista de posibles alternativas usando criterios establecidos y asignándoles prioridades. Dichas tecnologías se han expandido en el contexto militar debido a mejoras en este campo. Por ejemplo, el uso de tecnologías satélites y de teledetección (RS, del inglés *Remote Sensing*), ha traído consigo un aumento en la precisión y exactitud en zonas de combate. Por lo tanto, gracias a las prestaciones que ofrecen los métodos MCDA (*Multi-criteria Decision Analysis*), los SIG se han convertido en una herramienta de gran utilidad para almacenar, analizar, manipular y gestionar información relativa a la localización de emplazamientos y mejorar la efectividad en futuras operaciones militares [6]. Su aplicación conlleva una exactitud mayor respecto a otras tecnologías en el análisis de información para el posible establecimiento de bases o instalaciones, además de mejorar la capacidad de compartir dicha información, creando así, una imagen común del ambiente geográfico en un periodo de corta duración.

El AHP es un método ampliamente conocido dentro de las técnicas multicriterio, el cual ha sido incorporado a los procedimientos de idoneidad basados en SIG [7]. En este método, la información necesaria para resolver los problemas de toma de decisiones puede ser dividida tanto de forma cualitativa como cuantitativa [5]. AHP es un método flexible y cuantitativo, el cual se emplea para la selección de ciertas alternativas que han sido escogidas en función de la relación que han obtenido en base a una serie de criterios seleccionados. Los valores relativos necesarios para cada criterio pueden ser extraídos de una matriz de comparación pareada de dichos criterios usando el método AHP. Una vez obtenido los pesos para cada criterio a través del método de comparación de los diferentes parámetros, las puntuaciones resultantes son usadas para ordenar las diferentes alternativas, desde la más adecuada hasta la menos deseada [8].

Este documento tiene como finalidad el estudio de las posibles localizaciones de una base militar en un territorio usando técnicas multicriterio, para el caso concreto de la isla de La Palma [9].

2. Desarrollo

Para la obtención de las ubicaciones más adecuadas para la instalación de una base militar es necesario obtener y posteriormente procesar y analizar diversos conjuntos de datos en capas.

El proceso de obtención de capas es uno de los pasos más primordiales a la hora de realizar el estudio de optimización del emplazamiento de la base militar. Para ello, es necesario localizar diversos datos relativos a terreno, núcleos de población, suelos, ríos, etc., pero a veces no se pueden localizar todos los necesarios. Después de hacer una búsqueda, se encontró en la página La Palma Open Data [9] y se observó que contenía una alta cantidad de datos de distintos campos que permitían crear múltiples capas de datos para analizar la aplicación de esta técnica. Por lo tanto, se decidió aplicar esta técnica en la isla de La Palma (perteneciente al archipiélago de islas Canarias). Estas capas constituyen las variables empleadas para aplicar el método AHP. En el proceso de seleccionar un emplazamiento para una base militar, es esencial elegir las variables más importantes del estudio que determinarán que el emplazamiento se encuentre en el lugar idóneo.

Las capas de datos empleadas se obtuvieron de diversas fuentes:

- Núcleos de población (fuente: La Palma Open Data [10]). Servirá para establecer la distancia a la que nuestra base se debe situar de los núcleos de población. En función del tipo de base se deberá

situar a una distancia u otra, pero como norma general, dicha base deberá estar alejada de zonas de población para poder mantener el factor sorpresa en caso de estar en territorio enemigo, o para poder realizar ejercicios o maniobras sin la preocupación de tener a personal civil rondando por la zona y causando problemas o interrupciones de los mismos.

- Red de carreteras (fuente: La Palma Open Data [10]). La distancia a la que la base militar deberá situarse de las principales líneas de carreteras también es clave. En caso de ser una base en territorio enemigo, se necesitará que se sitúe alejada de las principales carreteras. En cambio, si se trata de una base militar en territorio propio, podría ser de mayor utilidad que no se situase a una gran distancia de las líneas de carreteras.
- Localización de embalses (fuente: La Palma Open Data [10]). Una base debe estar situada relativamente cerca de puntos de obtención de agua.
- Zonas de especial conservación (fuente: La Palma Open Data [10]). Las zonas de este tipo no se contemplan para la ubicación de la base.
- Cobertura WiMAX (fuente: La Palma Open Data [10]). Es fundamental la comunicación. Es decir, disponer de una tecnología de banda ancha que permita conectarse a la red a través de ondas electromagnéticas en zonas donde la banda ancha tradicional no puede llegar, y además, la posibilidad de establecer radioenlaces que permitan obtener dicha cobertura.
- La elevación del terreno (fuente: Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica, CNIG) [11]). Esta variable es de especial relevancia para la localización de la base, y juega un papel fundamental cuando se trata de combate contra tropas enemigas. Combatir desde una posición elevada es más fácil que desde una posición con menor elevación, ofreciendo una gran ventaja junto con un amplio campo de visión, permitiendo una vigilancia de los alrededores de manera efectiva.
- La pendiente del terreno. Se obtiene de los datos de elevación del terreno. La pendiente no debe ser pronunciada ya que facilitará el desarrollo de las operaciones, traslados de personal y transporte de vehículos; además de su construcción y desarrollo de las actividades dentro de la misma.
- Tipo y uso del suelo (fuente: Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica, CNIG) [11]). No cualquier suelo es apto para su construcción y desarrollo de las operaciones. Además de los tipos de suelos, será necesario descartar aquellas zonas que estén bajo algún tipo de protección o que estén reservadas.
- Los límites del terreno (fuente: FreeGis data [12]).

El la figura 2 se observan las distintas capas obtenidas de los datos.

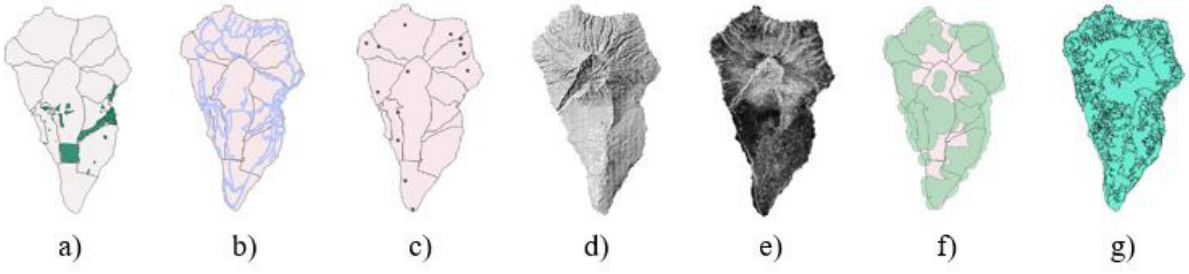


Figura 2. a) Núcleos de población. b) Distancia a carreteras. c) Distancia a ríos o embalses. d) Elevación del terreno. e) Pendiente del terreno. f) Cobertura. g) Uso del suelo.

Establecidas las variables del estudio, el siguiente paso consiste en la generación de los criterios, es decir, dentro de cada capa, qué situación es más idónea para lograr una selección lo más óptima posible. Cabe destacar, que en función de qué criterio se le asigne a cada capa, irá acompañado de un valor que oscilará entre un 5 y un 1, siendo 5 el valor óptimo y 1 lo contrario. Este valor se usará más tarde, para poder establecer en el programa QGIS, cual tiene mayor importancia a la hora de juntar todas las capas y obtener las distintas alternativas. En la tabla 1 se recogen los criterios elegidos.

Tabla 1. Resumen criterios. Elaboración propia

		Criterio		
		5	**3**	**1**
Variables	**Distancia a núcleos de población**	>3 kilómetros	Entre 1,5 y 3 kilómetros	< 1,5 kilómetros
	Elevación	Entre 100 y 250 metros	Entre 250 y 600 metros	>600 metros < 100 metros
	Cobertura	Nivel correcto	-	Nivel insuficiente
	Distancia a embalses	Entre 1 y 3 kilómetros	> 3 kilómetros	< 1 kilómetro
	Distancia a carreteras	Entre 400 y 800 metros	> 800 metros	< 400 metros
	Pendiente	< 10 grados	Entre 10 y 20 grados	> 20 grados

Para realizar una selección dentro de diferentes alternativas en función de una serie de criterios, se emplea habitualmente el método AHP. Se define por lo tanto como una técnica estructurada la cual organiza y analiza decisiones complejas basadas en matemáticas y psicología, por lo que dicho método se realiza a través de un diagrama de flujos. En este caso se pretende determinar las alternativas que cumplen mejor con los criterios, pero sin disponer de dichas alternativas en un principio.

En este se ha adaptado el método AHP debido a que lo que se intenta averiguar son las alternativas que cumplen mejor con los criterios, pero sin disponer de dichas alternativas en un principio. Por lo tanto, los pasos que se siguieron fueron los siguientes:

1. Establecimiento de las variables que influyen en la selección del emplazamiento.
2. Formulación de los criterios dentro de cada variable para su posterior implementación en el proceso de selección.
3. Creación de la matriz de comparación de una variable con otra dándoles pesos en función de si una tiene mayor importancia que la otra.
4. Comprobación de la consistencia, midiendo el ratio de consistencia.
5. Comprobación de que el ratio de consistencia es inferior al límite máximo permitido. Cálculo de los pesos de cada una de las variables.
6. Creación de la capa formada por una suma de todas las capas, obteniendo los lugares que cumplen en mayor grado, los requisitos establecidos para conseguir el emplazamiento óptimo de una base militar.

Para generar en el programa los criterios establecidos para las variables, es necesaria la creación de *buffers* de las capas para dividirlas y poder asignarles el valor correspondiente según el criterio. No obstante, esta operación únicamente se realizó con las capas vectoriales, ya que no se pueden generar *buffers* para capas ráster. Los *buffers*, con su valor implementado, sirvieron para establecer aquellas áreas, dentro de cada variable, se cumplían con mayor o menor grado. Una vez obtenidas las capas clasificadas para cada una de las variables, se procedió a rasterizar dichas capas. Este proceso se realizó, para poder unificar en una sola capa, cada uno de los criterios de cada variable, de manera que se consiga de forma rápida y sin grandes tiempos de procesamiento.

Una vez se generaron todas las capas ráster que se iban a utilizar en el trabajo, se derivó a la última parte del estudio, en la que se consiguió obtener una capa final que fuese una mezcla de todas las anteriores [9].

3. Resultados y discusión

Después de realizar los pasos anteriormente comentados, se crea una capa final con las posibles ubicaciones de una base militar con nivel medio/bajo de amenaza. En la figura 3, se aprecia la capa final, sin eliminar aquellas zonas donde no era viable la construcción de la base militar. La capa está clasificada

con una escala del 1 al 10, siendo el 10 el lugar más idóneo para situar el emplazamiento. Y sobre esa, se eliminan las zonas no válidas debido al uso de los suelos y zonas protegidas.

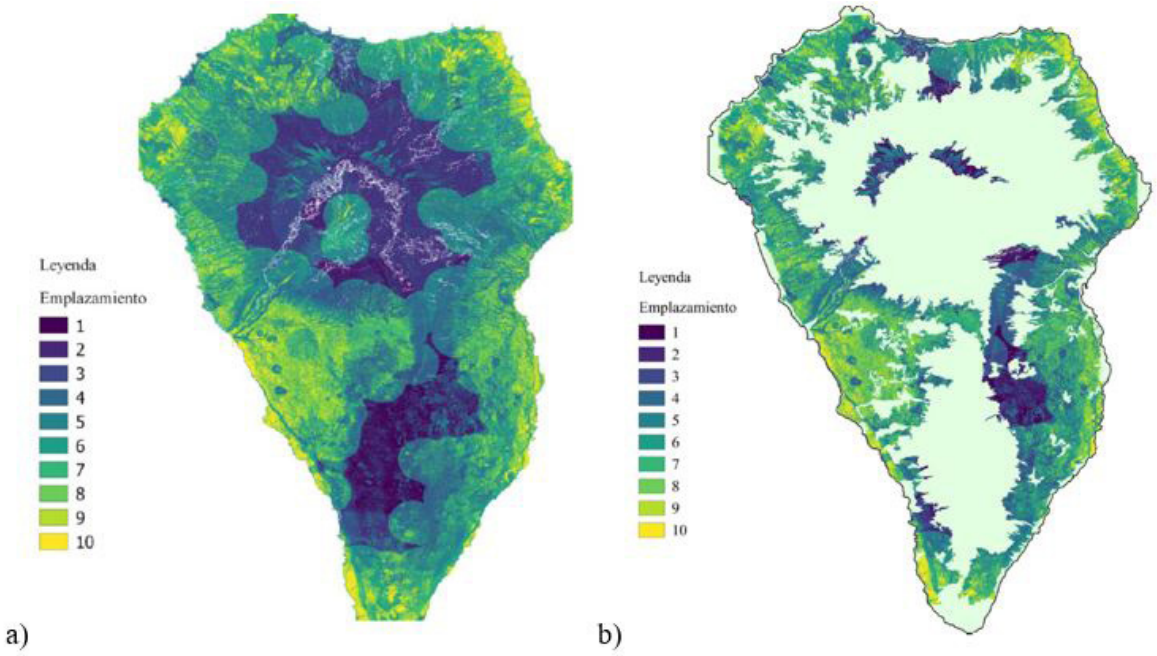


Figura 3. a) Alternativas base con amenaza media/baja. b) Alternativas una vez eliminadas las zonas no válidas debido al uso de los suelos y zonas protegidas.

Los lugares apropiados se reducen considerablemente en este caso, debido a la orografía, los núcleos de población y demás restricciones impuestas en este análisis.

4. Conclusiones

El principal inconveniente de un análisis de este tipo consiste en la limitada disponibilidad de datos del territorio a estudiar. Por lo tanto, para poder realizar este estudio de optimización, utilizando este *software*, se tuvo que buscar un territorio del que se dispusiesen datos que permitieran completar las diferentes etapas de análisis y el consiguiente procesado de capas. Las distintas capas obtenidas establecen, mediante una escala de colores, aquellos lugares más óptimos para situar la base militar.

Estas técnicas permiten establecer una serie de alternativas para el emplazamiento, de manera que no se involucren expediciones al territorio donde se quiere establecer la base militar y con una rapidez mucho mayor, siendo capaz de realizarse desde un ordenador privado que cuente con las herramientas y referencias necesarias.

Este estudio se ha basado en una amenaza media/baja, por lo que las variables y su importancia cambiarán en otro tipo de escenarios (alto nivel de amenaza, territorio enemigo, etc.).

Referencias

1. *Gigovic L. The Combination of Expert Judgment and GIS-MAIRCA Belgrade: Analysis for the Selection of Sites for Ammunition Depots; 2016.*
2. *L. U. P. S. CIESAS. Sistemas de Información Geográfica. Laboratorio Unidad Pacífico Sur CIESAS. [Internet]. [citado 12 septiembre 2018] Disponible:* https://langleruben.wordpress.com/¿que-es-un-sig/.
3. *Lenagala S. The Analytic Hierarchy Process in GIS-Driven Military Operation Base Selection: A Case Study in Sri Lanka, Journal of Defense Management; 2017.*

4. *Greene R, Devillers R, Luther J E, Eddy B G. GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. Blackwell Publishing; 2011.*
5. *Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill; 1980.*
6. *Lenagala S. The Analytic Hierarchy Process in GIS-Driven Military Operation Base Selection: A Case Study in Sri Lanka. Journal of Defense Management; 2017.*
7. *Jankowski P, Richards L. Integration of GIS-Based Suitability Analysis and Multicriteria Evaluation in a Spatial Decision Support System for Route Selection. Environment and Planning B: Planning and Design; 1994; 323-340.*
8. *Dong S. Comparisons between Different Multi-criteria Decision Analysis Techniques for Disease Susceptibility Mapping. Sölvegatan: Department of physical Geography and Ecosystem Science in Lund University; 2016.*
9. *Gerra R. Selección de emplazamiento óptimo de una base militar mediante sistemas de información geográfica. Trabajo Fin de Grado. Marín: Centro Universitario de la Defensa; 2018.*
10. *C. d. l. Palma. La Palma Open Data. [Internet]. [citado 12 septiembre 2018]. Disponible: http://www.opendatalapalma.es/*
11. *Centro Nacional de Información Geográfica, [Internet]. [citado 12 septiembre 2018]. Disponible: ficheros de información geográfica digital generada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).*
12. *«FreeGis Data,» 3 Enero 2018. Internet]. [citado 12 septiembre 2018]. Disponible:* https://freegis-data.rtwilson.com/

Gestión de la generación y la demanda eléctrica en un campamento militar con OpenHAB

Mur Amada, Joaquín[1,*], García García, Miguel Ángel[1], Pascual-Aranzana, Javier[1], Aguado-Jiménez, Sergio[1] , Jiménez-Pacheco, Roberto [1] y Yusta-Loyo, José María[2]

[1] Centro Universitario de la Defensa. Academia General Militar. Zaragoza. Email: magargar@ unizar.es (MGG), jpascual@unizar.es (JPA), saguadoj@unizar.es (SAJ), rjimenez@unizar.es (RJP).

[2] Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Zaragoza. Email: jmyusta@unizar.es (JMY).

* Autor principal y responsable del trabajo. Correo electrónico: joaquin.mur@unizar.es (JMA).

Resumen

Es posible la reducción del consumo de combustible y la disminución del mantenimiento de grupos electrógenos en el suministro eléctrico de instalaciones militares no permanentes si se hace una adecuada gestión de los consumos, coordinada con la generación.

Se propone adaptar un mix de soluciones domóticas para la gestión de la demanda y de la generación eléctrica en un campamento. Por otra parte, se deberían gestionar aparatos que no han sido diseñados para ser telemandados, por lo que se requiere un sistema flexible, de fácil configuración y que se adapte a circunstancias muy diversas.

Se propone utilizar openHAB [1] como sistema capaz de controlar equipos con protocolos y estándares diversos (KNX, z-wave, IoT…), que al ser de código abierto permite adaptarse a cualquier solución *ad-hoc*. El sistema openHAB [2,3] también permite gestionar bancos de grupos electrógenos o priorizar consumos cuando la capacidad de generación es limitada o se quieren utilizar grupos electrógenos más pequeños o menor número de ellos. Por ejemplo, al activar el pulsador para la conexión de una carga de gran consumo, el sistema debe de ser capaz de dar una orden para que arranque otro grupo electrógeno, esperar a que se sincronice y se conecte en paralelo a la red, y entonces proceder a la alimentación de la carga.

Palabras clave

Suministro energético, grupos electrógenos, campamento militar, domótica.

1. Introducción

En este artículo se estudian mejoras en el suministro energético de campamentos militares utilizando para ello técnicas domóticas [4] y de redes eléctricas inteligentes (*SmartGrid*) [5, 6]. Algunos autores denominan *SmartCamp* a la aplicación de técnicas de *SmartGrid* a campamentos aislados [7–9].

Las redes eléctricas inteligentes y el control domótico de instalaciones que se propone, deben adaptarse a las características propias de las instalaciones militares. Algunas características que se pueden encontrar en campamentos militares son:

a) Su suministro eléctrico suele hacerse mediante grupos electrógenos porque los campamentos no suelen tener acceso a una red eléctrica fiable. Los grupos electrógenos funcionan mejor a media carga o a carga media-alta. Cuando funcionan a baja carga, se genera una acumulación de residuos en el motor y sistemas de escape, conocido como *wetstacking* [10], que se traduce en la necesidad de aumentar la frecuencia de las labores de mantenimiento y en una menor fiabilidad. También se deben evitar cambios muy bruscos de consumo eléctrico porque se pueden producir inestabilidades y se empeora la calidad de la energía generada. Si la carga inicial durante el arranque es elevada, se dificulta la conexión del generador. Si el consumo sube bruscamente, por ejemplo, por el arranque directo de un gran motor eléctrico (o de varios motores eléctricos que se conectan simultáneamente), se puede llegar a producir una bajada de tensión que, en los casos más severos, lleven al colapso de la tensión generada por el grupo. Las, en general, condiciones extremas de trabajo (temperatura, arena…) influyen negativamente en el funcionamiento de los grupos electrógenos y pueden restringir su límite de operación.

b) Los requisitos de continuidad de suministro en un campamento militar son muy rigurosos en los equipos críticos (comunicaciones, sistemas informáticos…) porque afectan a la seguridad.

c) Cerca de zonas de conflicto se requiere elevada continuidad de suministro, los costes del combustible y del mantenimiento de los grupos electrógenos son elevados. Estos factores hacen más alta la rentabilidad de inversiones en equipamiento que contribuyan al ahorro de combustible y al aumento en los plazos de mantenimiento.

d) La disponibilidad de repuestos y de personal especialista en zona de operaciones es mucho más reducida que en instalaciones civiles. Por lo tanto, se prefieren sistemas fáciles y rápidos de montar, que tengan gran fiabilidad y que se puedan ampliar fácilmente si las necesidades del campamento se incrementan.

e) La oferta de equipos aptos para uso militar es más reducida que en el caso de instalaciones civiles y muchos aparatos todavía no suelen incorporar la opción de gestionarlos y controlarlos centralizadamente. No obstante:

   - Si son aparatos que se pueden controlar por mando a distancia, su gestión remota se puede llevar a cabo mediante emisores de infrarrojos o de radiofrecuencia que se incorporan al sistema domótico.

- Si los equipos no se pueden controlar directamente mediante señales eléctricas, siempre se puede añadir relés o interruptores telemandados que los conecten o desconecten remotamente.

f) Algunos contenedores y otros recintos pueden estar sellados para proporcionarles protección NBQ. Todos los cables que penetren en esos recintos deben hacerlo de forma que no se rompa su estanqueidad. Por otra parte, muchos contenedores tienen cubierta exterior metálica, lo que mejora la inmunidad electromagnética en ambientes de guerra electrónica pero también dificulta la conectividad inalámbrica con elementos situados en el exterior del contenedor.

g) La escasez de equipos comerciales de pequeño tamaño con alta portabilidad, bajo mantenimiento y que funcionen en condiciones ambientales extremas dificulta implementar micro-cogeneraciones o micro-trigeneraciones en campamentos [11].

h) Se está fomentando la eficiencia energética y el uso de energías renovables dentro del Ejército. Aunque se está avanzando en ambos frentes, existen importantes dificultades como:
   - Las necesidades de espacio que requieren algunas energías renovables (solar, mini eólica, micro-hidroeléctrica, geotérmica), que redunda además en un incremento de las necesidades de vigilancia y seguridad de estas instalaciones.
   - La menor movilidad de las instalaciones de mayor tamaño, mayor peso o mayor sofisticación, que pueden requerir maquinaria, personal especialista y un tiempo considerable tanto de montaje como de desmontaje.
   - El recurso primario de las energías solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica depende mucho del emplazamiento.
   - La mayor huella visual de algunas instalaciones de energías renovables como la solar o la eólica, que son fácilmente localizables desde el aire o incluso desde tierra.
   - El coste económico de la sustitución de algunos equipos por otros de mayor eficiencia energética.
   - El elevado coste de desarrollo de equipos de micro-cogeneración, micro-trigeneración, celdas de combustible, etc., que sean aptos para uso militar. En la actualidad existen pocos equipos civiles adecuados para ser adaptados a su uso militar.
   - La necesaria formación tanto del personal especialista encargado de su montaje y mantenimiento, como de los usuarios de las nuevas instalaciones.
   - La reticencia a cambios de hábitos en el uso de las instalaciones y en su gestión.
   - La limitada experiencia en la implantación de medidas de mejora de la eficiencia energética y el uso de energías renovables en operaciones militares.
   - La falta de estandarización de algunas tecnologías, lo que encarece los equipos por la menor economía de escala y dificulta su implementación debido a que pueden convivir en el mercado varios estándares simultáneamente. Cabe citar como ejemplos los sistemas domóticos, las *SmartGrid*, los sistemas híbridos que combinan almacenamiento en baterías con energía solar — u otras energías renovables — y grupos electrógenos, la distribución de energía en corriente continua...

2. Elección de la plataforma domótica

Los sistemas de gestión de la energía, también conocidos por las siglas PMS (*Power Management Systems*), se encargan de que un sistema eléctrico sea seguro y eficiente. Si el consumo de energía es mayor que la capacidad de generación, desconectan cargas eléctricas para evitar apagones. También pueden encargar de arrancar y detener automáticamente grupos electrógenos conforme varía la carga conectada al sistema.

Los sistemas de gestión de la energía utilizados en campamentos militares suelen ser bastante sencillos porque, salvo los módulos prefabricados, el resto de instalaciones castrenses debe realizarse en su em-

plazamiento definitivo. Además, muchas de las necesidades energéticas de un campamento, además de ser variables con el tiempo, son de tipo residencial.

Esto no ocurre en otros sectores, como puede ser el de la navegación. Los buques cuentan con sistemas de gestión de la energía mucho más sofisticados [12] debido al alto consumo eléctrico de sus servicios auxiliares, tales como bombas y/o compresores (especialmente si transportan productos perecederos refrigerados o congelados) o el sistema con propulsión eléctrica, en el caso de contar con él. Tanto el cableado como las soluciones de control en los buques son más complejos que en campamentos militares porque los buques se construyen en astilleros y su economía de escala permite una mayor integración de consumo y generación.

Ya que los sistemas domóticos están diseñados para controlar cargas residenciales y pueden instalarse en elementos prefabricados, pueden aportar flexibilidad, comodidad y seguridad a los sistemas de gestión de la energía en campamentos militares, complementándolos.

Dentro de los sistemas domóticos existentes en el mercado, la elección del sistema openHAB para gestionar el suministro eléctrico en campamentos militares se debe a las siguientes razones:

- OpenHAB es un controlador domótico de código abierto que se ejecuta sobre una máquina virtual java (Windows, Rasbperry Pi…), que se comunica con la mayoría de redes domóticas utilizadas actualmente (KNX, z-wave…) y que es capaz de interactuar con señales analógicas y digitales (provenientes, por ejemplo, de sensores de temperatura, de sensores de intensidad luminosa, de los grupos electrógenos…).
- OpenHAB permite gestionar el funcionamiento de uno o más grupos electrógenos que alimentan a un conjunto de cargas, pudiendo estar estas clasificadas por su prioridad y por su posible programación/retraso horario. La eficiencia y la fiabilidad del suministro eléctrico se ven incrementadas al poderse coordinar mejor la generación y el consumo eléctricos.
- Un sistema domótico ocupa poco espacio y se puede instalar en cuadros eléctricos, junto a equipos de comunicaciones o informáticos y en los contenedores ya existentes. Por tanto, no se requiere dedicar un espacio exclusivo al sistema domótico en el campamento.
- Las necesidades de personal especialista en zona de operaciones para poner en marcha y mantener este sistema son bastante reducidas. La instalación en los contenedores y en los cuadros eléctricos se puede hacer en territorio español. La parametrización del sistema domótico y los ajustes que sea necesario realizar una vez completada la instalación *in-situ*, pueden hacerse telemáticamente desde territorio nacional mediante una conexión satélite a la máquina Java del campamento donde se ejecuta openHAB.
- Los pequeños ajustes y cambios de programación se pueden realizar utilizando el interfaz gráfico de openHAB en tabletas, teléfonos móviles u ordenadores conectados a la misma red informática donde está el dispositivo donde se ejecuta el openHAB.
- Dada la actual fragmentación de los estándares domóticos, este sistema tiene la ventaja que permite controlar equipos de varios estándares (KNX, z-wave, IoT…). Además, esta plataforma está siendo apoyada y patrocinada por cada vez más fabricantes.
- Existen módulos de bajo coste económico que permiten controlar aparatos eléctricos convencionales, ya sea reproduciendo la funcionalidad de mandos a distancia o con simples relés interruptores que conectan y desconectan equipos que no disponen de reguladores. El poder controlar equipos ya existentes disminuye la inversión necesaria para la implantación del sistema.
- El sistema puede programarse para que adopte distintos estados de funcionamiento en función del grado de alerta (por ejemplo, puede programarse para apagar instantánea y automáticamente todo el alumbrado prescindible en caso de un ataque) y de los fallos del equipamiento (grupos electrógenos, daños en equipamiento debido a ataques, etc.).

- El mayor control del sistema eléctrico redunda en una mayor fiabilidad dado que el sistema puede tomar medidas muy rápidamente y de esa manera se puede evitar que los grupos electrógenos en funcionamiento se colapsen por un exceso o un defecto de consumo eléctrico.
- La flexibilidad del sistema permite gestionar equipos de almacenamiento de energía, energías renovables y grupos electrógenos.
- El hecho de que openHAB sea un sistema abierto, en el que se tiene acceso al código fuente, tiene importantes ventajas, como:
    - poder auditar su seguridad frente a ataques cibernéticos y poder optimizar el sistema para su funcionamiento en redes de comunicación militar,
    - permite añadir nuevos módulos adaptados a las características de la instalación y de equipos militares concretos (por ejemplo, para el control de grupos electrógenos en paralelo). De hecho, existen módulos (*bindings* en la nomenclatura de openHAB) que permiten a openHAB conectarse a la red CAN-BUS (protocolo SAE J1939) que equipan muchos grupos electrógenos [13],
    - el acceso al código fuente (en lenguaje Java) permite implementar estrategias de control más sofisticadas,
    - no se necesitan costosas licencias para programar y parametrizar el sistema domótico, y no se está a expensas de limitaciones debidas a vetos de exportación o uso militar del sistema,
    - la plataforma funciona sobre una máquina virtual Java, que se puede instalar en pequeños dispositivos como sistemas Raspberry Pi, Android, servidores NAS y PC's,
    - la parametrización del sistema se realiza mediante interfaces gráficos, a través de ficheros de texto o mediante la conexión a la base de datos de openHAB,
    - existe una comunidad muy activa de usuarios, que intercambian sus conocimientos de la plataforma openHAB en foros y blogs. Además, el desarrollo de módulos se realiza en el popular lenguaje Java, que tiene una gran base de programadores.

3. Reglas de control en un campamento

Un sistema domótico openHAB se controla mediante reglas lógicas previamente programadas que se ejecutan en respuesta a eventos.

Un evento puede ser la petición de conectar o desconectar una carga, petición que puede realizarse desde el botón de una pantalla en una tableta, un interruptor domótico, una temporización, un sensor de movimiento, una programación horaria… o desde un usuario con suficientes privilegios desde la pantalla de gestión de la plataforma.

Las alarmas basadas en el reloj del sistema y los eventos temporizados (los que se inician como respuesta a otro evento) se pueden utilizar para realizar una secuencia de acciones.

Los sensores también pueden generar eventos: una sonda de temperatura, una alarma del grupo electrógeno, el disparo de un interruptor automático electromagnético, un interruptor crepuscular, un detector de movimiento, una alarma de funcionamiento del sistema, etc.

Las reglas son el conjunto de algoritmos escritos en lenguaje informático Java con los procedimientos lógicos que se ejecutan cuando sucede un evento en el sistema domótico. Estas reglas son muy flexibles, y sus acciones pueden depender, entre otros, del estado del sistema (máquinas de estados), de las señales actuales de los sensores y de medidas históricas (persistencia).

Las figuras 1 y 2 muestran los diagramas de flujos de dos eventos simplificados. La solicitud de conexión de carga (figura 1) se desencadenaría con la pulsación de un botón físico o en una pantalla táctil conectada a openHAB. La gestión de la cola de peticiones autorizadas (figura 2) es, sin embargo, un evento temporizado que periódicamente comprueba los conflictos de generación y consumo, tomando una acción mediante un proceso de decisión multicriterio.

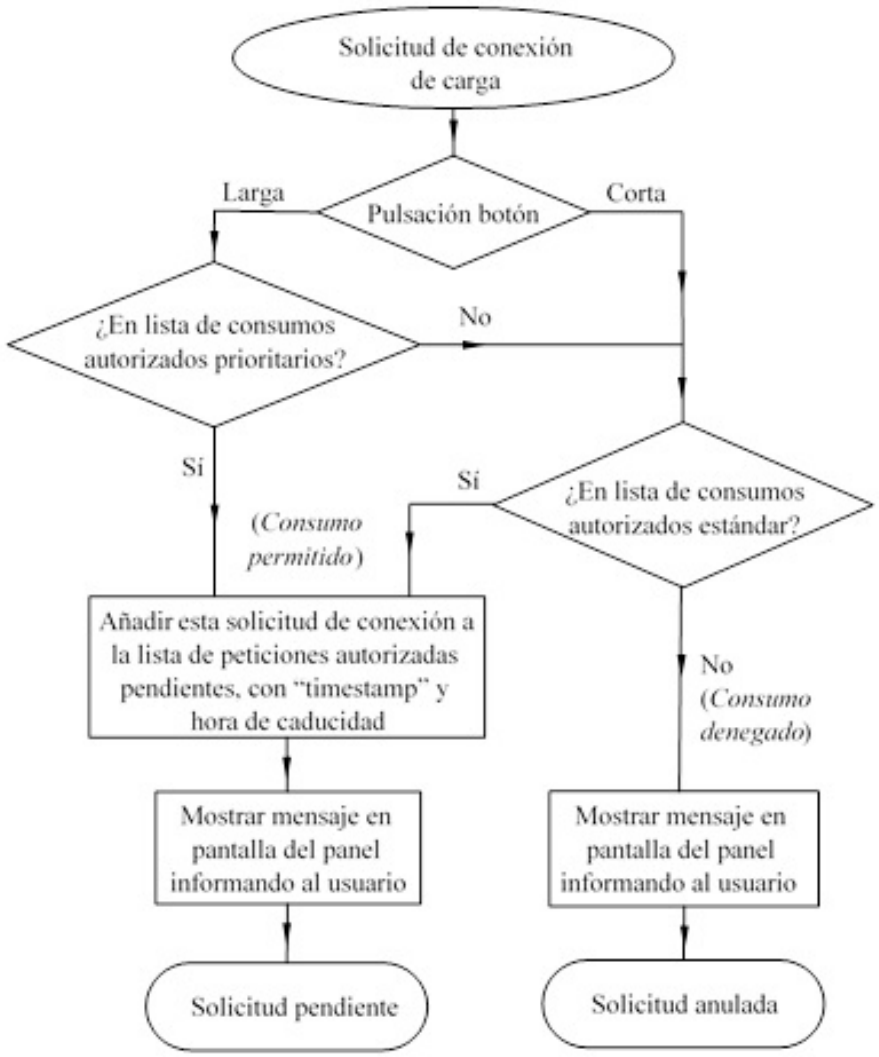


Figura 1. Diagrama de flujo de la solicitud de conexión de carga.

4. Categorización de zonas de consumo

Por conveniencia, las plantillas para la gestión domótica de edificios con openHAB dividen el edificio por plantas para organizar el acceso a las pantallas de configuración y control. En un campamento, las plantillas por defecto se pueden reutilizar renombrando las plantas como zonas del campamento. Es decir, las zonas del campamento se codificarán como plantas del edificio para modificar menos las plantillas de openHAB, tal como se propone en la siguiente tabla.

Zona prioritaria	Puesto de mando, con todo lo que incluye: comunicaciones, equipos informáticos, sistemas de armas, sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI), *Battle Management Systems* (BMS)
Zona de seguridad	Alumbrado exterior (de seguridad), sistemas de vigilancia (videocámaras, sensores, sirenas, central de alarmas…), cuerpo de guardia, polvorín…
Zona de vida	Dormitorios, zona de ablución, duchas, comedor, cocina, cantina, zona deportiva…
Servicios auxiliares	Lavandería, depuradora, potabilizadora, sistemas de almacenamiento de energía, servicios generales, recuperadores de calor y energías renovables…

Tabla 1. Categorización de los consumos del campamento en openHAB

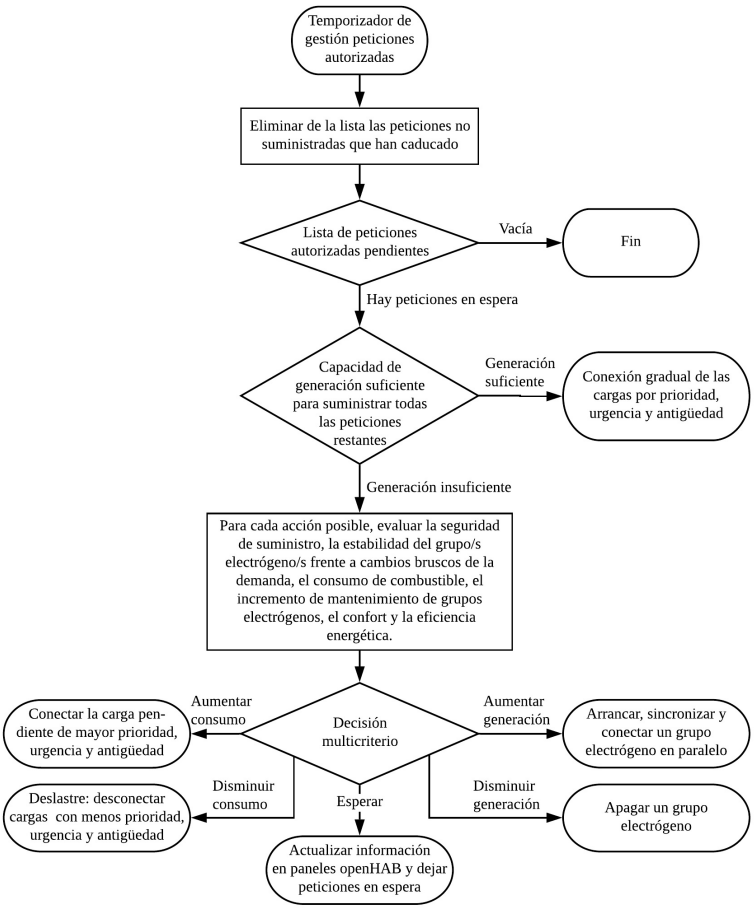


Figura 2. Diagrama de flujo de la gestión de la cola de peticiones autorizadas pendientes.

Agradecimientos

Al Centro Universitario de la Defensa en la Academia General Militar de Zaragoza, financiador del proyecto «Análisis y desarrollo de sistemas de simulación 3D para instrucción y realidad virtual aumentada en el ámbito del ET» 2017-18.

Referencias

1. *OpenHAB. Acccesible desde: https://www.openhab.org/*
2. *Zandi H, Kuruganti T, Vineyard E, Fugate D. Home Energy Management Systems: An Overview. 9th Int Conf Energy Effic Domest Appliances Light. 2017;(2018):605–14.*
3. *Hosek J, Masek P, Kovac D, Ries M, Kropfl F. Universal smart energy communication platform. In: 2014 International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG). IEEE; 2014. p. 1–4.*
4. *Asare-Bediako B, Ribeiro PF, Kling WL. Integrated energy optimization with smart home energy management systems. In: 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). IEEE; 2012. p. 1–8.*
5. *Van Ackooij W, De Boeck J, Detienne B, Pan S, Poss M. Optimizing power generation in the presence of micro-grids. Eur J Oper Res. 2018 Dec;271(2):450–61.*
6. *Colak I, Wilkening H, Fulli G, Vasiljevska J, Issi F, Kaplan O. Analysing the efficient use of energy in a small smart grid system. In: 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). IEEE; 2012, p. 1–4.*

7. *Kohn MM, Oslislo LJ, Talevski A, Karduck AP. Smart Camp. In: 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies. IEEE; 2010, p. 407–13.*
8. *Oslislo LJ, Talevski A, Karduck AP. SMART CAMP: Benefits of Media and Smart Service Convergence. In: 2011 IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications. IEEE; 2011, p. 763–8.*
9. *Proskurin S, McMeekin D, Karduck AP. Smart camp building scalable and highly available IT-infrastructures. In: 2012 6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST). IEEE; 2012, p. 1–6.*
10. *Yilmaz N, Donaldson AB. Examination of Causes of Wetstacking in Diesel Engines. In: SAE Technical Paper. SAE International; 2005.*
11. *Calero JJ. Prototipo de cogenerador de 50 kVA. Memorial del Arma de Ingenieros. 2017; n.º 98, p. 113–25.*
12. *Radan D. Integrated Control of Marine Electrical Power Systems [Internet]. Department of Marine Technology. Norwegian University of Science and Technology; 2008.*
13. *Lega M, Lo Calzo G, Lidozzi A, Solero L, Crescimbini F. Variable speed generating unit for stand-alone microgrids. 2012 IEEE Int Energy Conf Exhib ENERGYCON 2012. 2012;140–5.*

Diseño de infraestructura de telecomunicación para edificios de uso militar

Marquínez Cabaleiro, Juan Manuel[1], Rodríguez Bermúdez, Germán[2]

[1] Teniente de la Escala de Oficiales del Cuerpo General del Ejército del Aire, destinado en la Agrupación del Acuartelamiento Aéreo de Getafe. Dirección: C/ John Lennon s/n, Getafe. Email: jmarc14@ea.mde.es J.M.M.C.

[2] Profesor del Centro Universitario de la Defensa (San Javier), Email: german.rodriguez@cud.upct.es G.R.B.

Resumen

La delicada situación económica de nuestro país en los últimos años ha provocado un descenso en las diferentes partidas del presupuesto español. De esta manera y, como es de imaginar, el presupuesto destinado a Defensa también se ha visto mermado. Dicha situación ha provocado, que los recursos, que a priori estaban destinados a la renovación y mejora del equipamiento de las distintas bases aéreas y acuartelamientos, se hayan destinado al propio mantenimiento de las instalaciones, teniendo como principales consecuencias la desactualización y deterioro de parte de las instalaciones existentes en dichos recintos militares. Por todo ello, la renovación, actualización y mejora de las infraestructuras de telecomunicaciones, básicas para el buen funcionamiento de cualquier organización, pasan a un primer plano frente a otras de carácter secundario.

Debido a esta situación, se ha procedido a realizar un proyecto dirigido a actualizar las instalaciones dedicadas a telecomunicaciones en un edificio militar, más concretamente de un alojamiento logístico militar. Haciendo uso de las nuevas normativas nacionales al respecto y, sin dejar de lado las políticas de austeridad llevadas a cabo por el Ministerio de Defensa, se ha diseñado una infraestructura común de telecomunicaciones (ICT), con el fin de conseguir una alta estandarización y unos niveles de calidad a la altura de las actuales instalaciones civiles.

Palabras clave

Telecomunicaciones, estandarización, ICT.

1. Introducción

El presente artículo tiene como finalidad mostrar brevemente el proyecto de diseño y la proyección de una infraestructura común de telecomunicaciones en un edificio militar. Se diseñará todo lo concerniente para el funcionamiento y la instalación de una ICT en un ALM bajo la normativa vigente.

2. Objetivos

Para que el proyecto sea realizable y esté totalmente actualizado se tomarán como base de estudio las siguientes etapas:

a. Evaluación de necesidades de cada instalación

Diseño de una infraestructura común de telecomunicaciones tomando como referencia la normativa actual al respecto (1). A pesar de que, en el caso de las FAS no es necesaria la aplicación forzosa de dicho Real Decreto, es al mismo tiempo altamente aconsejable su empleo, con el fin de obtener unos niveles de calidad superiores a la media.

b. Diseño y distribución de las instalaciones

En este apartado, se llevará a cabo una planificación de reserva de espacios, una descripción de los diferentes equipos instalados en las edificaciones y de sus ubicaciones y, además, se especificará el tipo de cableado utilizado y su emplazamiento.

c. Cálculos

Todos los cálculos se realizarán utilizando un *software* específico (CYPE) para el cálculo de instalaciones de telecomunicaciones.

d. Presupuesto

Es de sobra conocido que, sin el presupuesto adecuado, ningún proyecto, por mínimo que sea, alcanzará el fin deseado. De esta manera, se hace necesario establecer una valoración ordenada y sistemática de todos y cada uno de los elementos que intervienen en la instalación, elaborando, por lo tanto, el presupuesto mínimo necesario para desarrollar las acciones que en el mismo se analizan. Debido a ello, se realizará una valoración sistemática de todos y cada uno de los elementos que intervienen en la instalación.

Gracias a una de las herramientas del *software* utilizado, CYPECAD MEP y su gestor de precios, se elaborará el presupuesto con costes de instalación ajustados al mercado real. En nuestro caso y, debido al emplazamiento de la Academia General del Aire, donde se haya el Centro Universitario de la Defensa, el presupuesto estará confeccionado con los precios vigentes en mayo de 2018 en la región de Murcia.

3. Infraestructura común de telecomunicaciones (ICT)

Para poder realizar un estudio sobre las ICT debemos acudir a diversa normativa desarrollada en el ámbito civil. Si hacemos referencia a lo establecido en el (1) y tal y como se muestra en figura 1, una ICT está compuesta por una instalación de radio y televisión terrestre y satélite, una instalación de telecomu-

nicaciones para los servicios de telefonía disponible al público y de banda ancha y, por una instalación de las infraestructuras que dan soporte al hogar digital.

Figura 1. Composición de una ICT. Fuente: elaboración propia en base a datos del Ministerio de Industria, 2011

Básicamente, una ICT simplifica, favorece y regula todas las instalaciones y canalizaciones dentro de un edificio a través de su estandarización, de manera que las siguientes obras o mejoras en los servicios que se quieran incorporar, lo puedan hacer con mayor facilidad y en la mayor brevedad posible como señala el (1), hasta la más simple actuación como «poner al día el cableado dentro de los edificios». En definitiva, una ICT constituye una **normalización de los métodos y los medios** para el mejor funcionamiento de los servicios, para la obtención de mayores capacidades para los usuarios y la simplificación de las futuras instalaciones.

Como podemos ver en el mencionado (1) «el desarrollo en los últimos años de las tecnologías de la información y las comunicaciones, así como el proceso de liberalización que se ha llevado a cabo, ha conducido a la existencia de una **competencia efectiva** que ha hecho posible la oferta por parte de los distintos operadores de **nuevos servicios de telecomunicaciones.**

Asimismo, los avances tecnológicos producidos en los últimos años, han permitido el desarrollo de nuevas tecnologías de acceso ultrarrápido que posibilitan que los **servicios de telecomunicación** que se ofrecen a los usuarios finales sean **más potentes, rápidos y fiables**. Algunos de estos servicios exigen para su provisión a los ciudadanos la actualización y perfeccionamiento de la normativa técnica reguladora de las infraestructuras comunes de telecomunicaciones en el interior de las edificaciones» (1).

3.1. Proyecto técnico

De acuerdo con el (1), las redes de telecomunicaciones ICT deben contar con un proyecto técnico que incluya detalladamente todos los elementos que componen la instalación.

Dicho proyecto contará, al menos, con los siguientes apartados:

1. **Memoria**
    a. Descripción de los servicios.
    b. Previsiones de demanda.
    c. Cálculos de niveles de señal en los distintos puntos de instalación.

d. Elementos que componen la infraestructura.

2. **Planos**
   a. Esquemas de principio de la instalación.
   b. Tipo.
   c. Número.
   d. Características.
   e. Situación de los elementos.
3. **Pliego de condiciones**
   a. Calidades de los materiales y equipos.
   b. Condiciones de montaje.
4. **Presupuesto**
   a. Número de unidades.
   b. Precio por unidad.
   c. Características, modelos tipo y dimensiones de los elementos.

Tal y como se muestra en la siguiente figura 2, se puede observar un esquema básico de las partes que componen un proyecto técnico.

Figura 2. Partes principales de un proyecto técnico. Fuente: elaboración propia en base a datos del Ministerio de Industria, 2011Fuente: elaboración propia.

4. Esquemas

En la figura 3, se pueden observar las canalizaciones generales de una ICT, desde las redes de RTV hasta la arqueta de acceso principal de la fibra óptica.

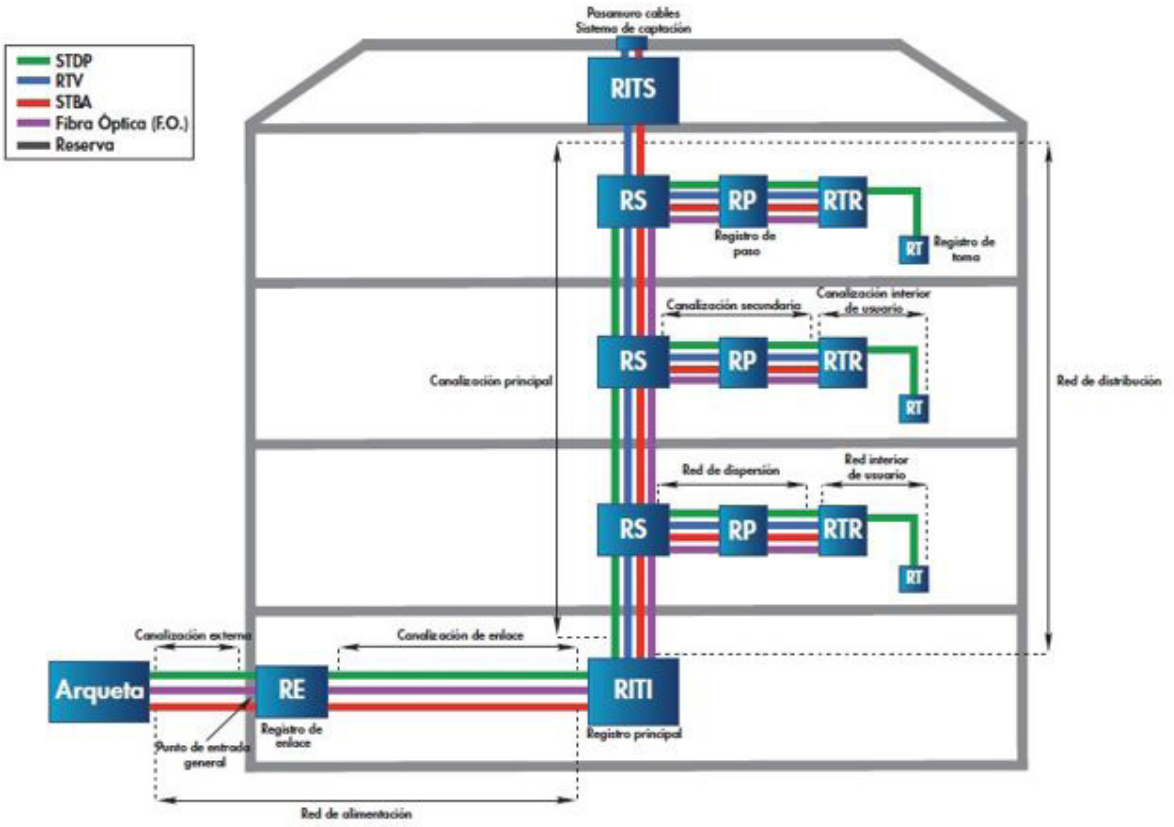


Figura 3. Esquema general de canalizaciones para una ICT. Fuente: Esquema general de canalizaciones para una ICT. Fuente: ALCAD, 2012.

La siguiente siguiente figura 4, corresponde a una captura del programa CYPE, en este caso concreto de los planos de instalación de las plantas 2 y 3 del proyecto.

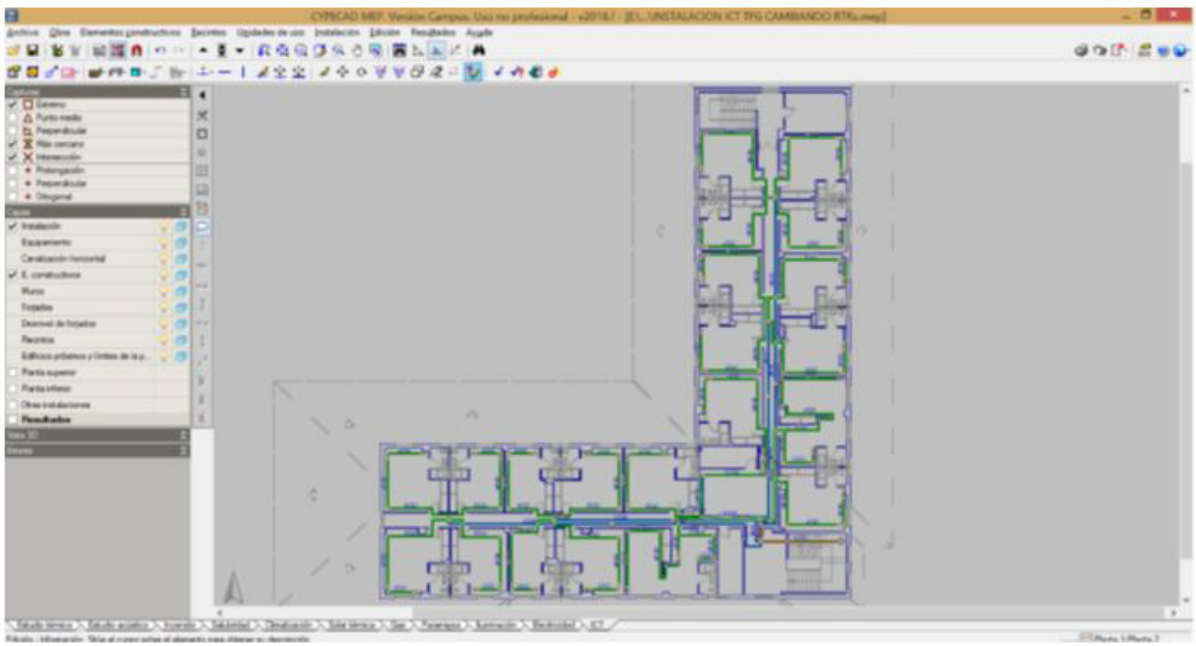


Figura 4. Muestra de software utilizado, CYPE.

La figura 5, representa otra captura más detallada del *software* CYPE, en este caso en concreto de uno de los tipos de vivienda realizados en el proyecto.

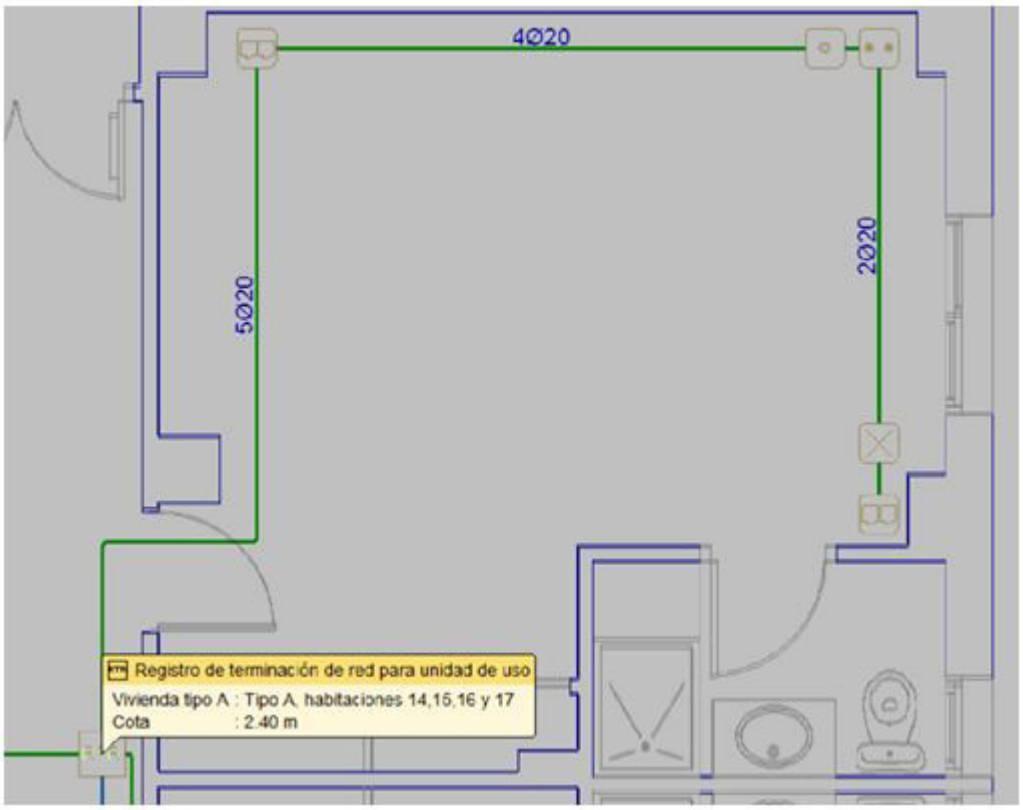


Figura 5. Muestra vivienda tipo A.

Las siguientes imágenes, figura 6, corresponden a parte de dos de los planos incluidos en el proyecto técnico realizado.

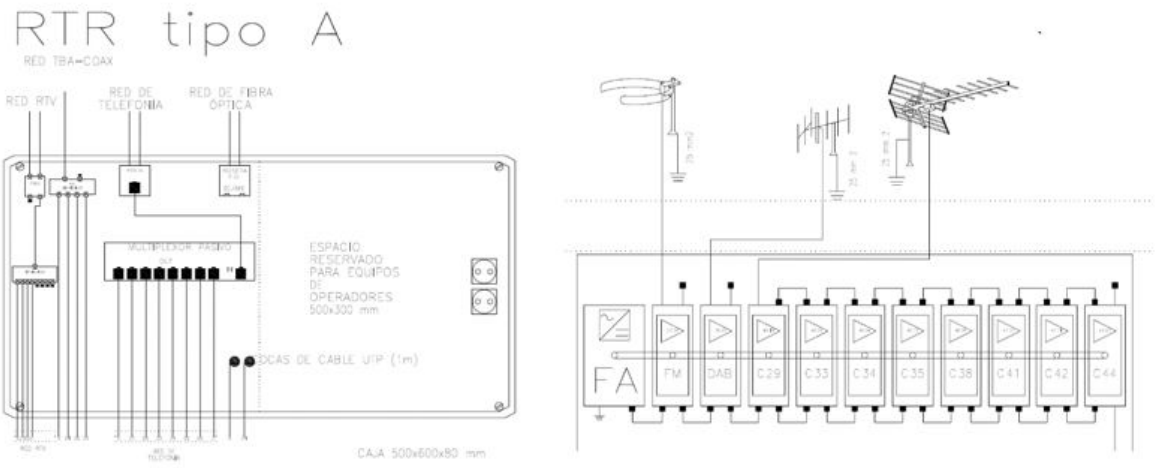


Figura 6. Muestra planos RTR tipo A y cabecera RTV.

5. Conlusiones

Las telecomunicaciones evolucionan constantemente tanto en el ámbito civil como dentro del marco del Ejército español. Las nuevas tecnologías no paran de avanzar y, al mismo tiempo, crecen con ellas las necesidades de actualización e innovación de toda clase de servicios tecnológicos.

En el entorno militar de las telecomunicaciones, la normativa vigente con respecto a las ICT, no es de obligado cumplimiento, pudiendo realizarse instalaciones que no sigan dichas directrices. Por otro lado, en el entorno civil, las ICT son un símbolo de estandarización y calidad en todos los niveles y, su implementación supondría sin lugar a duda, un avance significativo y necesario.

La idea principal de este artículo se resume en:

- **La implementación de las ICT,** aunque no sean estrictamente necesarias, **incrementan los niveles de calidad** de las instalaciones de telecomunicaciones militares.

Como puntualización final, fruto del análisis de este trabajo y, con vista al futuro, cabe recomendar la instalación de ICT según la normativa vigente, en todas aquellas edificaciones militares en las que sea posible, sobre todo en aquellas destinadas a alojamientos. El alto nivel de calidad obtenido y, el alto grado de estandarización de las diferentes redes, canalizaciones y materiales utilizados en este tipo de instalaciones, tiene como resultado una gran reducción de costes, a la vez que facilita el trabajo de los propios militares encargados de su mantenimiento y el de los diferentes operadores de servicios que se pudieran contratar, abriendo así un amplio abanico de posibilidades antes no contemplado.

Gracias a las ICT, se puede **dejar atrás gran parte del mantenimiento correctivo, para darle paso al mantenimiento preventivo**, con las claras ventajas, tanto de recursos económicos como humanos, que esto conlleva.

Referencias

1. *Ministerio de Industria TyC. RD 346/2011, de 11 de marzo. 2011.*
2. *ALCAD. [Online].; 2012. Available from: http://www.alcad.net/uploads/publicaciones/catalogos/pdf/LIBRO%20ICT%202.pdf*

Z-Damper

Pérez Díaz, José Luis[1,*], Valiente, Ignacio[2], Sánchez García-Casarrubios, Juan[3] y Pérez del Álamo, José Luis[4]

[1] Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá, Campus Externo, A2, km 33600, 28803 Alcalá de Henares. Correo electrónico: jlperezd@uah.es (JLPD).

[2] Magsoar S.L., Avda. Europa 82, 28341 Valdemoro. Correo electrónico: ivaliente@magsoar.com (IV).

[3] San Jorge Tecnológicas S.L., Avda. Europa 82, 28341 Valdemoro. Correo electrónico: jsanchez@sanjorgetecnologicas.com (JS).

[4] San Jorge Tecnológicas S.L., Avda. Europa 82, 28341 Valdemoro. Correo electrónico: jlpedeal@sanjorgetecnologicas.com (JLPA).

Email: jlpedeal@sanjorgetecnologicas.com

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: jlperezd@uah.es (JLPD).

Resumen

La propagación de vibraciones puede provocar fallos crítico e incluso la rotura total de estructuras e impide operaciones de posicionado de precisión. Aunque existen diversos dispositivos para control de vibraciones estos suelen tener rangos de actuación desacoplados de las necesidades.

Z-Damper es un innovador dispositivo basado en magnetomecanismos que permite el acoplamiento de impedancias mecánicas y por tanto la optimización de los elementos de control de vibraciones. Este amortiguador puede trabajar a temperaturas entre -200ºC y 250ºC y soportar altas tensiones dinámicas con una gran eficiencia y una reducción del tamaño y el peso respecto a otros sistemas de control de vibraciones.

El trabajo muestra resultados y potenciales aplicaciones. Ha sido financiado por el Programa Clean Sky del séptimo Programa Marco de la Comisión Europea, numero de concesión JTI-CS-2013-02-SFWA-03-013, habiendo además recibido el primer premio al mejor proyecto de dicho programa en 2017.

Palabras clave

Amortiguación, mecanismos robustos, acoplamiento, impedancias mecánicas.

1. Introducción

1.1. Reducción de vibraciones

El aislamiento de vibraciones es una necesidad universal en ámbitos de ingeniería, por ejemplo en vehículos, estructuras y elementos de precisión. Las técnicas habituales de reducción de vibraciones se basan en el empleo de suspensiones que combinan elementos elásticos con amortiguadores que disipan la energía mecánica en forma de calor. En otros casos son absorsores dinámicos de vibraciones o resonadores los que se emplean para reducir la amplitud de vibraciones en estructuras y edificios.

Ambas tecnologías están limitadas a la hora de aislar vibraciones de muy baja frecuencia debido a que tanto velocidades como aceleraciones tienden a cero lineal y cuadráticamente cuando la frecuencia tiende a cero. Así, por ejemplo, el amortiguamiento viscoso proporcional a la velocidad de vibración tiende a desaparecer a bajas frecuencias.

Además, las temperaturas de operación de aceites y elastómeros están limitadas al entorno de la ambiental. Esto generalmente impide que puedan utilizarse tecnologías de amortiguamiento convencionales por encima de los 200ºC.

1.2. Z-Damper

El proyecto Z-Damper del FP7 Clean Sky tuvo como objetivo superar estas limitaciones desarrollando un dispositivo único capaz de multiplicar el movimiento –acoplando impedancias mecánicas– y optimizar las prestaciones mecánicas de otros dispositivos. Como ejemplo de aplicación se integró un amortiguador magnético formando un dispositivo compacto para la amortiguación de vibraciones de baja frecuencia capaz de funcionar a temperaturas superiores a los 200ºC, siendo a su vez ligero, compacto y seguro. Los ensayos a 12 Hz del prototipo mostraron una amortiguación equivalente a la viscosa con coeficiente de amortiguación de 35 Ns/mm.

Esto es posible gracias a los componentes magneto-mecánicos, que presentan una gran cantidad de ventajas frente a sus equivalentes mecánicos: no presentan desgaste, tienen una larga vida operativa y no requieren lubricación o fluidos técnicos, por lo que pueden trabajar en ambientes extremos, que van desde los criogénicos (-200ºC) hasta los de altas temperaturas (250ºC).

Figura 1. Fotografía del dispositivo Z-Damper.

El equipo del Z-Damper obtuvo el primer premio FP7 Clean Sky al mejor proyecto en 2017.

Figura 2. Giuseppe Pagnano, coordinador del programa Clean Sky entrega el primer premio Clean Sky 2017 al profesor Pérez Díaz de la Universidad de Alcalá.

2. Descripción del dispositivo

La idea básica de la tecnología Z-Damper es simple: un engranaje magnético lineal multiplica un movimiento corto asociado a una gran fuerza de vibración en otro movimiento más largo pero con menor fuerza de vibración, siendo este último más fácil de amortiguar –por su mayor velocidad–. Una vez realizada esta transformación, los imanes permanentes del engranaje magnético inducen corrientes de Foucault en una lámina fina externa de cobre, donde se genera calor y se disipa al entorno. Al no haber contacto entre las partes no necesita lubricación ni se produce desgaste.

Además, una resonancia interna debidamente definida dentro del Z-Damper multiplica el efecto de la impedancia del engranaje maximizando el coeficiente de amortiguación a una frecuencia seleccionada. El dispositivo Z-Damper ha sido diseñado para la amortiguación de vibraciones optimizada a dicha frecuencia predefinida.

El engranaje magnético lineal se compone de tres etapas: una primera etapa de entrada conectada directamente a la fuente de vibración, un estator conectado al asiento y una etapa interna de movimiento rápido. La caja de cambios proporciona una multiplicación de desplazamiento entre la entrada y la etapa de movimiento rápido con una relación de transmisión n:

$$n = \frac{n_{ranura}}{n_{entrada} - n_{estator}} \qquad (1)$$

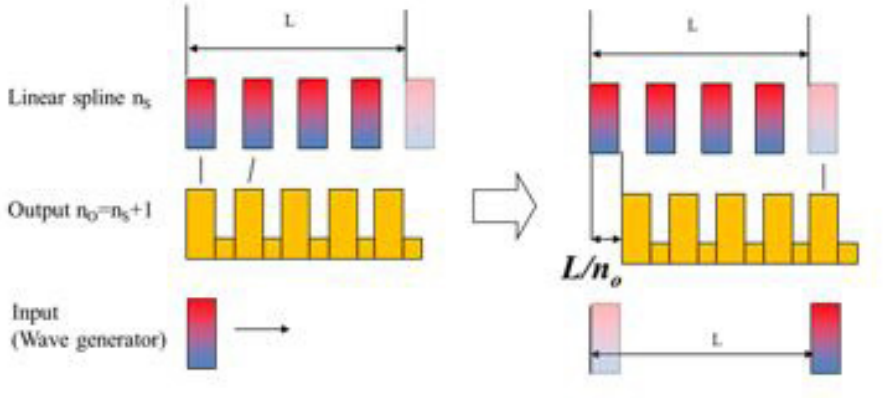


Figura 3. Principio de funcionamiento de un mecanismo magnético lineal.

La etapa de movimiento rápido y el estator están compuestos básicamente de imanes permanentes de SmCo 32H con forma de anillos y con una alta resistencia a la desmagnetización a altas temperaturas. La etapa de entrada está compuesta de unos anillos laminados de aleación FeCo. Los anillos espaciadores de Ti grado 5 se utilizan para controlar el espacio entre los diferentes elementos del engranaje. La mayor parte de los elementos del dispositivo están también hechos de Ti grado 5 por su gran resistencia mecánica y su relativa baja densidad. Los rodamientos de teflón, por su parte, son autolubricados. Finalmente, la capa más externa del Z-Damper está compuesta de una lámina de cobre electrolítico y sirve para disipar las corrientes de Foucault que en ella se generan. Todos estos materiales permiten una utilización teórica del dispositivo a más de 300ºC.

Las características fundamentales del Z-Damper se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. Características del Z-Damper

Propiedad	Valor	Unidad
Diámetro	105	mm
Longitud	491	mm
Peso	19,6	kg
Máximo desplazamiento de entrada	> ±5	mm
Relación multiplicadora (n)	7:1	
Máxima fuerza de entrada (30ºC)	6500	N
Frecuencia de resonancia	12,5	Hz
Susceptibilidad térmica	-1,8	N/ºC
Rango de temperaturas operacional	[-50, 200]	ºC
Rango de temperaturas no operacional	[-70, 270]	ºC
Coeficiente máximo de amortiguación viscoso equivalente a 12 Hz (200ºC)	35	Ns/mm
Máxima potencia disipada	600	W

3. Modelo teórico

La fuerza de la etapa de entrada y la fuerza de movimiento rápido se relacionan entre sí mediante la relación de transmisión:

$$n = \frac{X_{rápida}}{X_{entrada}} = \frac{F_{entrada}}{F_{rápida}} \qquad (2)$$

Donde X representa el desplazamiento y F la fuerza de cada etapa.

La impedancia mecánica de cada etapa se define como:

$$Z = \frac{F}{\dot{X}} \qquad (3)$$

Donde Ẋ con un punto arriba (derivada de X) es la velocidad de la etapa.

El factor de adaptación de impedancias, es decir, la relación entre las impedancias de entrada y de salida es, por tanto:

$$\frac{Z_{entrada}}{Z_{rápida}} = n^2 \qquad (4)$$

Este modelo simplificado, que puede observarse en la figura 4, no considera las condiciones dinámicas internas del Z-Damper, donde la etapa de movimiento rápido, que está conectada virtualmente a las otras a través de una rigidez equivalente, tiene una masa definida.

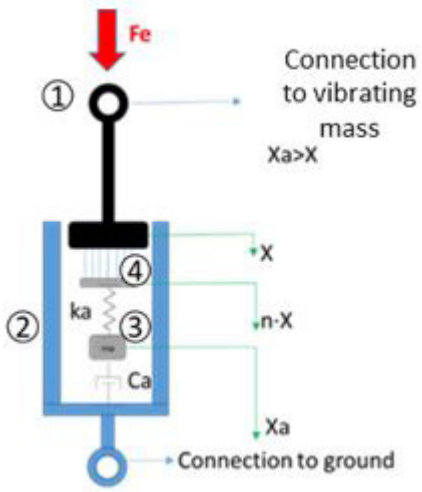


Figura 4. Modelo dinámico considerado para el Z-Damper.

En la figura 4 pueden observarse los tres elementos más relevantes del dispositivo Z-Damper: una etapa de entrada o de movimiento lento (1), que está conectada rígidamente a la masa vibrante; una etapa de movimiento rápido (2), que está en el interior del Z-Damper y el estator del dispositivo (3), que está conectado rígidamente al asiento. La etapa virtual intermedia (4) ayuda a describir teóricamente el dispositivo y a interpretar el modelo propuesto.

Asumiendo que la amortiguación está generada básicamente por la disipación de corrientes de Foucault entre la etapa de movimiento rápido y el estator de cobre, puede considerarse una amortiguación viscosa definida por el coeficiente equivalente de amortiguación viscosa (ca). También se tiene en cuenta en este modelo la disipación por corrientes de Foucault en el interior del Z-Damper, aun siendo su influencia dos órdenes de magnitud menor.

De acuerdo con lo anterior, la ecuación de movimiento en el dominio del tiempo de la etapa de movimiento rápido bajo excitaciones armónicas y considerando que no hay fuerzas adicionales es:

$$-m_a\ddot{X}_a - k_a(X_a - nX) - C_a\dot{X}_a = 0 \qquad (5)$$

Xa es el desplazamiento de la etapa de movimiento rápido, X es el desplazamiento de entrada, n el factor de multiplicación, k_a es la rigidez del engranaje, m_a es la masa de la etapa rápida y ω es la frecuencia de excitación.

Se puede definir el desplazamiento de la etapa de movimiento rápido, para una vibración armónica de entrada como:

$$X \quad = nX \cdot \frac{k_a}{(k_a - m_a\omega^2) + jC_a\omega} \qquad (6)$$

Que puede simplificarse como:

$$X_a = nX \cdot \frac{1}{(1 - \Omega^2) + j2\xi_a\Omega} \qquad (7)$$

Donde Ω es la relación de frecuencias entre la de excitación y la frecuencia natural, $\Omega = \frac{w}{w_n}$, y ξ_a , y ξ_a es la relación de amortiguación, $\xi_a = \frac{c_a}{2\sqrt{k_a \cdot m_a}}$.

Las fuerzas magnéticas que actúan en la etapa de movimiento rápido son:

$$F_{rápida} = -k_a(X_a - nX) - C_a \cdot \dot{X}_a \qquad (8)$$

Teniendo en cuenta que:

$$F_{entrada} = -n \cdot F_{rápido} \qquad (9)$$

Y combinando las ecuaciones anteriores, se pueden obtener (10) y (11):

$$F_{rápida} = -nk_aX \cdot \frac{\Omega^2 - j2\xi_a\Omega}{(1-\Omega^2) + j2\xi_a\Omega} \qquad (10)$$

$$|F_{entrada}| = n^2\Omega^2 k_a X \cdot \sqrt{\frac{1}{(1-\Omega^2)^2 + (2\xi_a\Omega)^2}} \qquad (11)$$

4. Resultados experimentales

Se ha diseñado, montado y puesto en marcha una bancada de ensayos dedicada a demostrar el concepto Z-Damper.

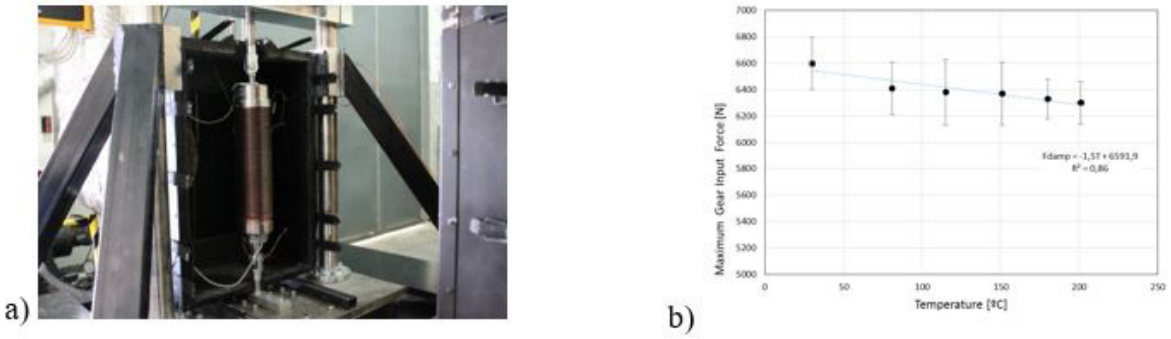


Figura 5. Bancada de ensayo del Z-Damper (a) y resultados del ensayo de fuerza máxima del Z-Damper frente a temperatura (b).

Después de los ensayos realizados sobre el prototipo, se ha comprobado la correlación entre los ensayos realizados y el modelo teórico, así como la aptitud del mismo para trabajar a altas temperaturas. El sistema se comporta del mismo modo que el oscilador lineal armónico, con la diferencia de que en este caso el sistema es sobreamortiguado. También se observó una maximización de la potencia disipada a la frecuencia concertada.

La disipación de energía medida por ciclo supera la de los mejores amortiguadores de tecnologías convencionales.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado una tecnología de amortiguación por acompañamiento de impedancias en un mecanismo lineal magnético, durante el proyecto Z-Damper del FP7 Clean Sky. El prototipo amortiguador, con un coeficiente de multiplicación de n=7 y diseñado con una resonancia interna de 12 Hz para maxi-

mizar los efectos a dicha frecuencia ha servido para demostrar el modelo teorético mediante experimentos. Se ha demostrado su correcto funcionamiento en un rango de temperaturas desde ambiente hasta 200ºC y se ha obtenido un coeficiente equivalente viscoso de 35Ns/mm a 200ºC para 12 Hz.

Esta nueva tecnología abre nuevas oportunidades de diseño para ingenieros mecánicos y estructurales que requieren dispositivos de amortiguación efectivos y compactos incluso en ambientes de temperaturas.

El dispositivo Z-Damper puede por tanto emplearse para la amortiguación de vibraciones en diversos ámbitos: aeronaves –particularmente en el entorno del pylon y motor donde las temperaturas son elevadas, suspensión de vehículos, sistemas antiretroceso de tiro abriendo la posibilidad de aumentar la cadencia de tiro–, absorsores dinámicos en edificios, estructuras, etc. y finalmente en aquellos sistemas sujetos a choques y percusiones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Programa 7TH Framework Clean Sky, bajo la concesión JTI-CS-2013-02-SFWA-03-013.

Los autores quieren expresar sus mayores gratitudes a M. Iliev y J. Serena por su participación esencial en la fabricación de los prototipos así como a Sebastien Servoles, Benoit Petitjean y Marc Maurel, supervisores de Airbus, por su positivo soporte durante la ejecución del proyecto.

Referencias

1. *Valiente-Blanco, E. Díez-Jiménez, M. A. Álvarez-Valenzuela, C. Cristache, and J. L. Pérez-Díaz, «Characterization and Improvement of Axial and Radial Stiffness of Contactless Thrust Superconducting Magnetic Bearings,» Tribol. Lett., 2014, pp. 213–220.*
2. *J. L. Pérez-Díaz, J. C. García-Prada, I. Valiente-Blanco, and E. Díez-Jiménez, «Magnetic-Superconductor Cryogenic Non-contact Harmonic Drive: Performance and Dynamical Behavior,» in New Trends in Mechanism and Machine Science Mechanisms and Machine Science V.7, Springer Netherlands, 2013, pp. 357–364.*
3. *Valiente-Blanco, E. Díez-Jiménez, and J. L. Pérez-Díaz, «Engineering and performance of a contactless linear slider based on superconducting magnetic levitation for precision positioning,» Mechatronics, vol. 23, n.º 8, 2013, pp. 1051–1060.*
4. *Valiente-Blanco, C. Cristache, J. Sánchez-García-Casarrubios, F. Rodríguez-Celis, and J.-L. Pérez-Díaz, «Mechanical Impedance Matching Using a Magnetic Linear Gear,» Shock Vib., vol. 2017, Aug. 2017, pp. 1–9.*
5. *J. Pérez-Díaz, I. Valiente-Blanco, and C. Cristache, «Z-Damper: A New Paradigm for Attenuation of Vibrations», Machines, vol. 4, n.º 2, Jun. 2016, p. 12.*

Avances y adecuación de dispositivos DDCE para la protección ante descargas eléctricas atmosféricas y pulsos electromagnéticos de infraestructuras y equipamiento en defensa

Maldonado Pardo, Javier[1*]; Kamal Abd El Hady, Hala[2 +]; Sáenz Nuño, María Ana[3];

Bernabéu Martínez, Eusebio[2]**

[1] Dinnteco International, [2] Universidad Complutense de Madrid, [3]Universidad Pontificia Comillas (ICAI), [+] Ain Shams University, Cairo. Egypto.

* Director técnico. Email:jmaldonado@dinnteco.com (JMP). **Email: ebernabeu@fis.ucm.es (EBM).

Resumen

Es conocido y probado que los DDCE son dispositivos pasivos de captación de corriente eléctrica en el tiempo, que realizan una compensación en microsegundos del campo eléctrico cuando en el dispositivo se alcanza una diferencia de potencial entre 12 y 20 kV. Los DDCE van derivando a tierra las corrientes continuamente captadas, consiguiendo una compensación sostenible del campo eléctrico variable existente en su entorno, evitando que se produzcan descargas intensas descontroladas sobre los propios DDCE y en la estructura que protegen.

Es de resaltar la eficiente utilización de los DDCE en Defensa, donde la mayor parte de las instalaciones y equipamiento por su emplazamiento y materiales (generalmente conductores) que los conforman están fuertemente expuestos a descargas eléctricas de rayos en la atmósfera y efectos de pulsos electromagnéticos.

El objetivo de este trabajo es dar cuenta de los avances sobre la modelización teórica de los DDCE, de los procesos físico-químicos que sustentan su funcionamiento y dimensionado, así como en su emplazamiento, con el propósito de continuar perfeccionando y adecuando los DDCE a distintas demandas de infraestructuras y equipamientos a proteger, y su extensión a otros usos potenciales como son: seguridad vial en condiciones atmosféricas desfavorables, protección de infraestructuras generadoras de energía en renovables, prevención de entornos contaminados en instalaciones hospitalarias y áreas producción sensibles; así como poner en valor aquellos puntos susceptibles de mejora que propicien avances de los DDCE. Para ello se parte de los distintos ensayos de que se dispone y de los amplios datos estadísticos servidos por METEORAGE sobre alcance protector de los DDCE en instalaciones significativas reales, los cuales se actualizan y analizan hasta el presente (primer semestre del 2018). Para el análisis de la modelización se ha hecho uso de herramientas de software: CONSOL Multiphysics, y HFSS de Ansys, para la simulación de las condiciones de operatividad de los DDCE y de un conjunto de ensayos dinámicos realizados en el Laboratorio EMC en Cámara del INTA, laboratorio acreditado ENAC.

Palabras clave

Compensador de campos eléctricos DDCE, protector de descargas eléctricas de la atmósfera y de pulsos electromagnéticos, equipamiento de seguridad para comunicaciones e instalaciones críticas.

1. Introducción

Es conocido y probado [1] que los DDCE son dispositivos pasivos de captación de corriente eléctrica en el tiempo, que realizan una compensación casi inmediata (en microsegundos) del campo eléctrico cuando en el dispositivo se alcanza una diferencia de potencial entre 12 y 30 kV. Los DDCE van derivando a tierra las corrientes continuamente captadas, consiguiendo una compensación sostenible del campo eléctrico variable existente en su entorno, evitando que se produzcan descargas intensas descontroladas –violentas– sobre los propios DDCE y en la estructura que protegen. Son, pues, una protección local frente a descargas eléctricas descontroladas, que evitan el impacto de rayos sobre la estructura que protegen y minimiza de forma significativa los daños por pulsos electromagnéticos. También, los DDCE pueden comportarse como fusible térmico cuando, eventualmente, captasen directamente sobretensiones inducidas externas provenientes de impactos de rayos en su entorno, ya vengan por tierra o bien en forma de pulsos electromagnéticos. En tal caso, los DDCE absorberían parte de la energía en calor por fusión de sus componentes externos, minimizando los efectos adversos en la estructura protegida.

Es de resaltar la eficiente aplicación de los DDCE en defensa, donde la mayor parte de las instalaciones y equipamiento por su emplazamiento y materiales (generalmente conductores) que los conforman están fuertemente expuestos a descargas eléctricas de rayos en la atmósfera y efectos de pulsos electromagnéticos: los DDCE ya son utilizados para proteger instalaciones móviles de telecomunicaciones en asentamientos militares, como protección de antenas, radares, shelters e infraestructuras terrestres; por ejemplo en, telecomunicaciones en Torrejón de Ardoz, Eva 21 instalaciones móviles en la UME (Unidad Militar de Emergencias). En este caso, Dinnteco adaptó su DDCE incorporándole un mástil telescópico y desarrollando un protocolo de uso adecuado a la finalidad de uso en campaña, respetando el cumplimiento de la normativa UNE-EN 62561 [2]. También los DDCE son de uso en acuartelamientos, polvorines, torres de control de aeródromos y helipuertos, hangares, puesto de mando y de operaciones, hospitales de campaña, entre otros; así como en los navíos de la Armada: portaviones, fragatas, transporte, dragaminas,… en puertos: aprovisionamiento de combustibles, dársenas,.. La proyección de DINNTECO está en la mejora y adecuación de sus DDCE a los condicionantes de cada aplicación específica.

1.1 Objetivo del trabajo

En este trabajo se pretende dar cuenta de los avances en la comprensión de los procesos físico-químicos que sustentan el funcionamiento y dimensionado de los DDCE, así como en su emplazamiento, con el objetivo de encontrar mejores soluciones y adecuaciones a las distintas demandas de infraestructuras y equipamientos a proteger y a otros usos potenciales de aplicación como son: la seguridad vial en condiciones atmosféricas desfavorables (nieblas y calimas), la protección de infraestructuras generadoras de energía en renovables (eólica, solares, biodegradables,…), en la prevención de entornos contaminados en instalaciones hospitalarias y áreas producción sensibles (farma-industria, procesado alimentario,…). Así como poner en valor aquellos puntos susceptibles de mejora por nuevos diseños o materiales que propicien avances significativos en los DDCE.

2. Normativa y resultados sobre el alcance protector de los DDCE

Un DDCE es un dispositivo [1] formado por un elemento conductor de recepción conectado a tierra y, por tanto, cargado positivamente y un elemento conductor de captación conectado al aire (separado por un aislador) y cargado negativamente. Al aumentar el campo eléctrico se produce un efecto de atracción de cargas, de positivo a negativo, induciendo a subir las cargas positivas (tierra) hacia el elemento de recepción. Por otro lado, el aumento del campo eléctrico por encima del elemento de captación induce a depositarse carga negativa procedente del entorno (nubes) sobre el mismo. Si en un momento dado se produce una diferencia de potencial variable en función del aumento del campo eléctrico entre ambos elementos, aparece una fuga de corriente a tierra controlada (del orden de entre 50 mA a 1,8 A aproximadamente). La fuga de corriente a tierra es consecuencia de la compensación de campo eléctrico que tiene lugar de manera continuada y secuencial en el interior del DDCE, dependiente de un cierto valor umbral variable, consecuencia del diseño del DDCE, de los materiales y tratamientos utilizados así como, también, de otras condiciones menos controlables, como son las medioambientales: humedad relativa, velocidad del viento, temperatura, altitud, etc. Como dispositivo protector electromagnético y contra caídas de rayos debe cumplir la Norma UNE EN IEC 62305 [2] que responda de su calidad y de la prestación fiable de su función protectora.

2.1 Dispositivos DDCE y normativa sobre alcance protector

De acuerdo a la norma referida [2] puede afirmarse para un DDCE 100 un radio de alcance protector de 100 m, cuando se encuentra instalado a una altura del suelo igual o superior a 26,79 m, siempre y cuando todas las estructuras metálicas existentes dentro de este radio se encuentren al mismo potencial que la semiesfera inferior del DDCE, no existiendo en ese entorno otras estructuras de igual o superior altura. Si dentro de este radio de protección existen estructuras con capacidad de ionización significativa, como pueden ser pararrayos tipo Franklin o pararrayos de cebado o antenas de televisión o árboles u otras similares, no puede asegurarse que no se produzcan impactos en estos elementos y, por tanto, dentro de los 100 m de cobertura protectora de un DDCE. Conviene señalarse que los pararrayos tipo Franklin o de cebado se instalan para atraer el rayo. Por lo que, en todo caso, un DDCE garantizará que no se produzcan impactos directos de rayos dentro del radio de cobertura, exceptuando en los pararrayos de cebado o tipo Franklin dispuestos, o en las estructuras ionizantes (como árboles o antenas de televisión) que no se encuentren al mismo potencial que la semiesfera inferior del DDCE. La tabla 1 recoge los resultados para otras alturas de ubicación de los DDCE de acuerdo a la ecuación (2.1), según la Norma UNE EN IEC 62305 [2] parte 1, p. 40:

$$R = 10\, I^{0,65} \quad (1)$$

Se consigue una esfera de radio 200 m. De acuerdo con la siguiente ecuación se puede calcular la distancia horizontal sobre el suelo que estaría cubierta por la zona de protección, o lo que es lo mismo, la proyección sobre el suelo del arco de la esfera conformado por el punto de toque de la esfera con el dispositivo y el punto de toque de la esfera con el suelo.

$$d = \sqrt{h_1(k - h_1)} - \sqrt{h_2(k - h_2)} \quad (2)$$

donde, d es la zona de cobertura sobre el suelo (m); h_1 es la altura del dispositivo captador (m); h_2 es la altura de la estructura a proteger (m), y k es el doble del radio de la esfera (m). Obteniendo los siguientes resultados que se recogen en la tabla 1.

ALTURA DE LA INSTALACION (metros)	RADIO DE COBERTURA * (metros)
5	44,4
10	62,4
15	76
20	87,2
25	96,8
26,79	100
30**	100
40**	100
50**	100

Tabla 1. *Radio de cobertura protectora de un DDCE 100 en función de la su altura de instalación.*

* La distancia o radio de cobertura calculado se refiere a la zona de protección sobe el suelo, cuando existan estructuras cercanas, con distintas alturas, se deberá calcular la cobertura de la zona de protección individual para cada estructura.

** A pesar de que la altura de instalación sea mayor de 26,79 m y el resultado del radio de cobertura sea mayor a 100 m, se considerará esta distancia como límite máximo para el cálculo. Este criterio se ve fundamentado en la valoración de la eficiencia del DDCE mediante seguimiento en casos reales de los que se presenta un resumen estadístico en lo que sigue en texto.

Estos resultados ajustados a norma vienen corroborados por el resultado satisfactorio en las infraestructuras protegidas por equipos DDCE de DINNTECO en distintos puntos del mundo y, sobre todo, más sistemáticamente, con exaustivas y continuadas medidas de campo por incidencias en la caídas y localización de impactos por rayo en varias estaciones muy significativas por su emplazamiento en zonas de registros de muy alta abundancia de descarga eléctrica atmosférica y, también, por la singularidad de las infraestructuras protegidas –torres de comunicaciones– por los DDCE de DINTECO. El apartado siguiente 2.2 recoge un breve resumen de estos análisis estadísticos de impactos de rayo en distintas zonas geográficas a partir de los datos servidos por METEORAGE [3], trabajo de seguimiento concertado por DINNTECO.

2.2. Pruebas de campo en instalaciones reales de DDCE en puntos muy significativos

La tabla 2 recoge los resultados estádisticos en seis estaciones a partir de los datos aportados por METEORAGE .

CONCEPTO	LA MASELLA	LES PARDINES	TORRE AEMET JATA	PIC DE GOMA	MIRADOR ROC DE QUER	TORRE JAIZKIBEL
Período de estudio	2014-2017	2003-2017	2010-2017	2015-2017	2017	2015-2017
Impactos en 2 km alrededor de la torre	961	1.366	306	929	247	447
Impacto sobre la torre (0 m)	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Impactos a menos de 100 m de la torre (< 100 m)	0,2 %	0,073 %	0,65 %	0 %	0 %	0 %
Impactos entre 100 m y 300 m de la torre (100 m – 300 m)	6,97 %	1,68 %	5,22 %	0,267 %	2,83 %	1,12 %
Impactos entre 300 m y 500 m de la torre (300 m – 500 m)	3,32 %	2,63 %	4,24 %	1,76 %	4,85 %	3,58 %
Impactos entre 500 m y 900 m de la torre (500 m – 900 m)	16,64 %	8,93 %	23,52 %	7,38 %	17,81 %	16,78 %
Impactos a más de 900 m de la torre	72,84 %	86,60 %	66,33 %	90,49 %	74,49 %	78,52 %

Tabla 2. *Eficacia y eficiencia de dispositivos DDCE en pruebas en campo reales. Probabilidad de impactos de rayos en la zona e incidencia en las infraestructuras protegidas con DDCE.*

La figura 1 presenta, a título de ejemplo, uno de los mapas de recogida de datos de METEORAGE; en este caso, de la torre JATA (AEMET), una de los puntos con mayor periodo de seguimientos.

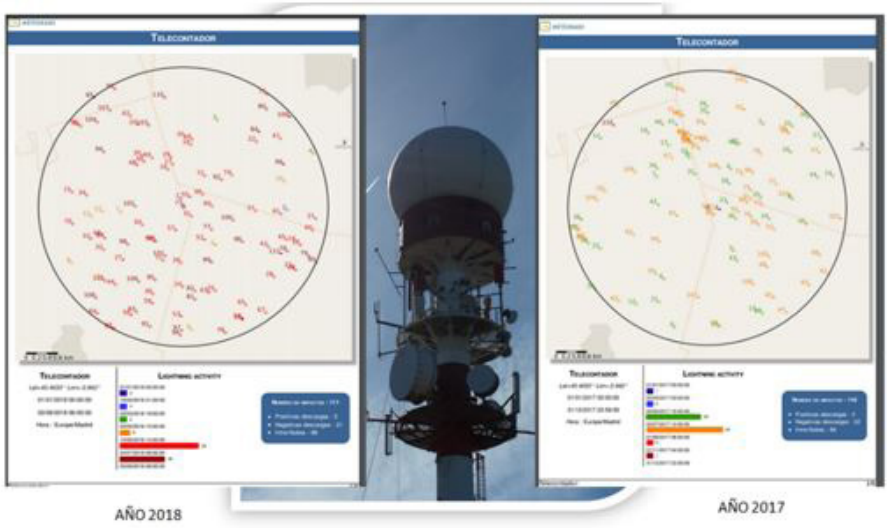


Figura 1. Torre JATA de comunicaciones de AEMET, protegida por DDCE, y a izquierda y derecha mapa de recuento de impactos de rayo en la zona en los años 2018 y 2017. Impactos en zona protegida por DDCE: 0 impactos.

3. Análisis del dispositivo DDCE como resonador y circuito LCR

La estructura de un dispositivo DDCE se identifica bien con la de un resonador de radiofrecuencias, cuya estimación geométrica conduce a fijar, a priori, una frecuencia resonante en torno a 1,7 GHz para el formato DDCE-100 de DINNTECO. Por ello hemos considerado oportuno en someter a una simulación de comportamiento de campos electromagnéticos en régimen lo más próximo posible al entorno funcional del dispositivo con el doble propósito de comprender mejor su funcionamiento y programar los ensayos de laboratorio en INTA. Para este estudio de simulación se ha contado con dos potentes herramientas de cálculo [4,5] que operan en 3D. Ello nos ha permitido obtener la distribución dinámica del campo electromagnético en el interior y en exterior del DDCE.

La figura 2.a presenta para el campo resonante de 1,7 GHz en un instante temporal de máximo para el campo eléctrico E en el interior de resonador DDCE y la figura 2.b muestra el campo eléctrico resonante en exterior en otro instante en que el campo eléctrico exterior presenta una columna vertical bien neta y dos laterales en ángulo a cada lado que parcialmente le circunvalan.

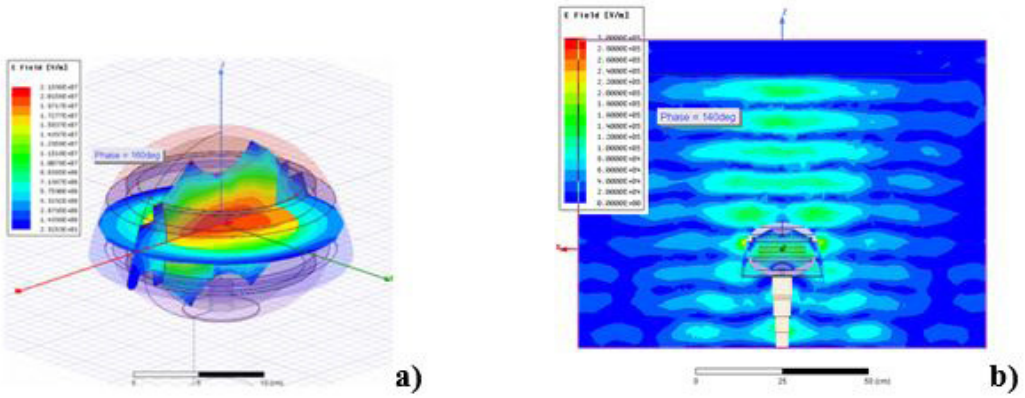


Figura 2. Campo electromagnético en un DDCE 100 a 1,70 GHz: a) campo E en el interior de la cavidad resonante, b) campo E en el espacio libre exterior.

La tabla 3 muestra en la superficie exterior del casquete superior de un DDCE 100 las simulaciones obtenidas para distribuciones del campo eléctrico **E**, campo magnético **H** y densidad de corriente superficial **J** en distintos instantes de tiempo comparables entre sí, y que hemos seleccionado como más significativas de las secuencias temporales de la dinámica del campo electromagnético resonante a 1,70 GHz. La dinámica temporal está reflejada en la fase a un semi-periodo (180º).

- Las distribuciones del campo eléctrico se corresponden bien a un modo transversal magnético TM01 en una cavidad resonante. Las distribuciones del campo magnético se corresponden bien a un modo transversal magnético TM00.
- Las distribuciones de la densidad de corriente superficial es dependiente, como expresa la ley de Lorentz, de los campos eléctrico y magnético y sus distribuciones se corresponden con ello.
- Las distribuciones del campo eléctrico alcanza dos máximos centrados (TM01) elevados (1,6 x 10^6 V/m), pero ya en los bordes los máximos son algo más pronunciados (2,0 x 10^6 V/m).
- Las distribuciones del campo magnético alcanza un máximo central (TM00) elevado (2,0 x 10^2 A/m).
- La descarga de corriente se reparte entre los dos modos únicos relevantes: el dominante de 1,70 GHz estimado en un < 80 % de toda la corriente de descarga y el de 0,59 GHz estimado en un <20 % de toda la corriente de descarga. Lo que en potencia corresponde con un 0,60 % para el segundo en relación al modo dominante: la potencia disipada por el DDCE es atribuible en gran medida al modo dominante de 1,7 GHz.

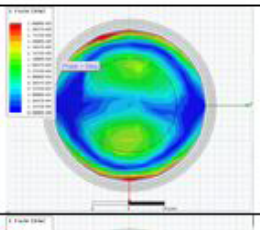
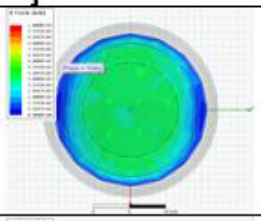
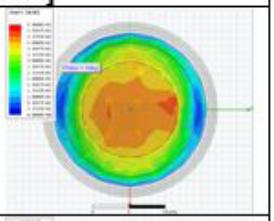
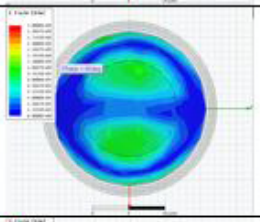
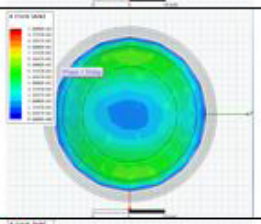
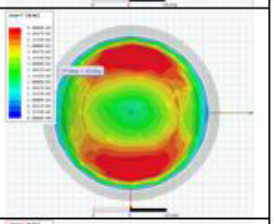
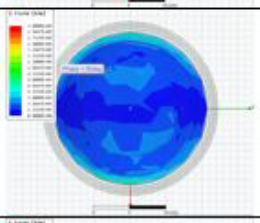
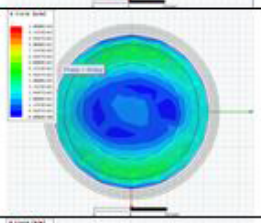
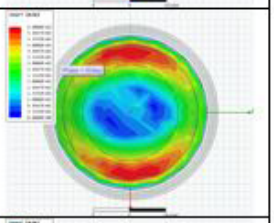
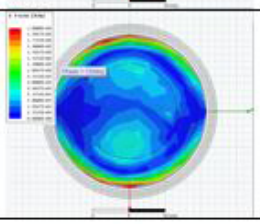
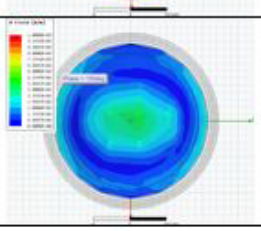
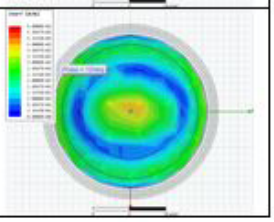
Fase	Campo E [V/m]	CAMPO H [A/m]	Corriente J [A/m2]
0° aprox			
40° aprox			
80° aprox			
120° aprox			

Tabla 3. *Distribuciones espaciales en la superficie exterior del casquete superior de un DDCE 100 para los campos eléctrico, magnético y densidad de corriente superficial a la frecuencia resonante 1,70 GHz para instantes de evolución temporal caracterizados por los valores de la fase en un semiperíodo.*

Las simulaciones realizadas a distintas frecuencias han corroborado lo previamente estimado a partir de un análisis geométrico del interior de un DDCE al considerarlo como una cavidad resonante de ondas electromagnéticas: que la frecuencia resonante para un DDCE 100 está en 1,70 GHz. Pero las simulaciones han permitido también establecer un valor para la anchura de espectral de esa resonancia y que estimamos entre 20 a 34 MHz. Este valor y el de la frecuencia resonante permiten establecer una fineza *F* que en un resonador es asimilable al número de ondas con capacidad de superposición interferencial –equivalente al llamado número de Fresnell en los sistemas difractivos– que estaría entre 2,05 a un valor <3, por lo que apenas si cabe esperar la existencia de un armónico. De hecho, las simulaciones han puesto en evidencia una segunda resonancia menos intensa a 59 MHz. La estimación de carácter geométrico lo sitúa próximo a <60MHz, lo que parece bastante consistente. La explicación de una resonancia casi única viene justificada por dos causas:

- Los DDCE son dispositivos resonantes que al conectarlos a tierra son intensos disipadores de energía electromagnética que recogen y retiran del entorno en que se encuentran instalados, parte de la energía se disipa en forma de calor –posiblemente generado por el efecto Joule asociado a las intensidades de corriente superficial– y, también, en energía acústica asociable a la propia descarga eléctrica compensadora en el interior del DDCE. Pero ambas energías disipadas son de menores frente a la energía eléctrica derivada a tierra como corriente de descarga y a la energía electromagnética igualmente descargada.
- Existe otra causa asociada a que el resonador no es estrictamente simétrico: los dos casquetes interiores no son iguales, sino casi iguales en relación a la longitud de onda asociada a la frecuencia de resonancia, y ello permite –en cierto modo– «inhibir» la presencia de otros armónicos resonantes. En el ámbito de la óptica electromagnética esto ha sido recientemente puesto de manifiesto [6] para condiciones estructurales formalmente comparables a procesos resonantes periódicos.

4. Asimilación de las descargas compensatorias de un DDCE a un circuito LRC

Los ensayos realizados en LCOE –Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia– del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España, vinculado a la UPM en la sede de Getafe (Madrid) [7] han sometido a los DDCE 100 a impulsos de corriente de 100 kA con forma de onda 10/350 de acuerdo a la norma UNE 21186 de diciembre de 2011 apartado C.3.4. Las formas de onda aplicada corresponden a las de norma UNE-EN 62561. La descarga de este pulso de corriente genera transitorios, cuya forma puede apreciarse en la figura 3.

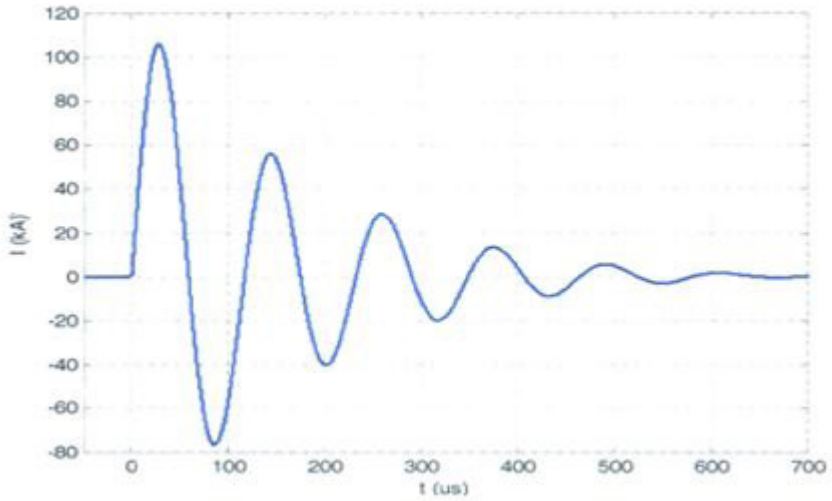


Figura 3. Transitorio de un pulso de corriente (descarga de corriente aplicada JD21-05) en un DDCE 100. Según informe LCOE [6].

A esta gráfica experimental le hemos realizado un análisis comparativo de ajuste a un modelo de circuito LRC: constituido por un dispositivo equivalente al comportamiento de exponencial amortiguado de una resistencia R, una impedancia L y un condensador C, los tres dispuestos en serie.

La ecuación diferencial que rige este circuito básico es la conocida [8,9]:

$$V_{entrada} = I_{entrada} \cdot R_{entrada} = I_{gen} \cdot R_{DDC} + L \cdot \frac{dI_{gen}}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int I_{gen} dt \ . \quad (3)$$

Un análisis de ajuste numérico por el método de mínimos cuadrados permite poner en valor la adecuación del circuito LRC en cuanto a su evolución temporal en los transitorios analizados y evidenciar la excelente concordancia del modelo LRC elegido, y obtener así los valores de la inductancia y capacitancia durante la evolución temporal de la descarga. Los ajustes de estas evoluciones temporales se muestran en la figura 4.

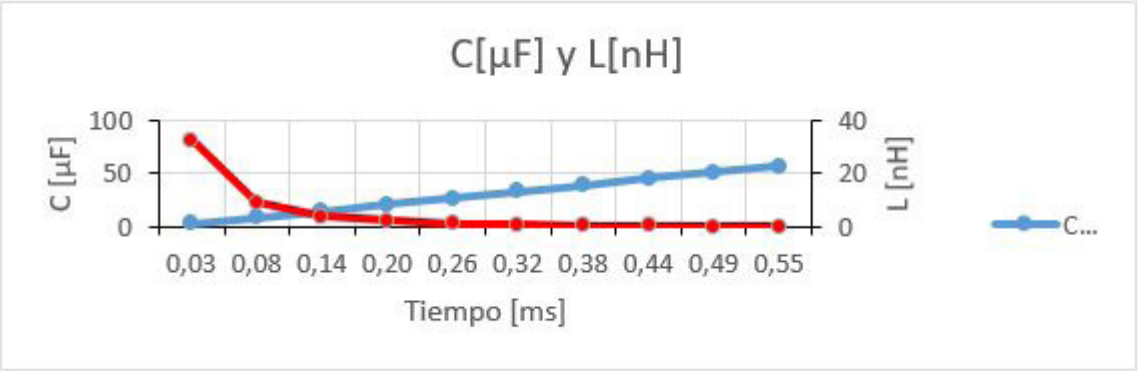


Figura 4. Evoluciones temporales de inductancia L(nH) en rojo y de la capacitancia C(µF) para los ensayos de pulsos de corriente LCOE. Los coeficientes de regresión de los ajustes son > 0,98.

5. Algunas consideraciones finales

Un dispositivo DDCE puede considerarse como un sistema fuertemente disipador de cargas eléctricas y de energía electromagnética resonante: el modelo de DINNTECO DDCE 100 aquí analizado lo es a frecuencias de 1,7 GHz y 0,59 GHz, en un ratio relativo aproximado de 0,60 a favor de primer modo en relación a la potencia disipada en la descarga derivada a tierra; relación que es proporcionalmente equivalente a los valores del campo eléctrico del campo electromagnético resonante captado del espacio exterior para estos modos. Este campo electromagnético exterior próximo establece vías de encauzamiento preferente de las cargas al sumidero de cargas eléctricas por compensación –que es lo se pone de manifiesto en un DDCE: un DDCE es disipador de cargas eléctricas del entorno amplio que le rodea–.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto de Tecnología Aeroespacial –INTA– su colaboración en las simulaciones por cálculo numérico y en los ensayos de laboratorio realizados en el Laboratorio de EMC en Cámara del Departamento de Equipos y Sistemas. En particular, a Borja Plaza Gallardo por su excelente y continuada labor, también a David Poyatos Martínez y Daniel López Sanz por su interés y facilidades prestadas.

Referencias

1. *Maldonado J, Ribó A, Larena A, Bernabeu E: Dispositivo compensador de campos eléctricos variables DDCE de protección ante descargas atmosféricas y pulsos electromagnéticos para instalaciones y equipamiento en Defensa. 2017. V DESEi+D. Toledo.*

2. *Norma Española UNE-EN 62305-1: Protección contra el rayo. Parte 1. (IEC62305-1:2006). Norma Internacional: IEC62305-1:2006. AENOR 2007. 72pp. Grupo 21. 2007.*
3. *METEORAGE: https://www.meteorage.com/f .Empresa francesa, radicada en Pau (Francia), que cubre los servicios informativos y de datos estadísticos sobre las tormentas de gran parte de Europa.*
4. *CONSOL MultiPhysics: https://www.comsol.com/*
5. *ANSYS: HFSS: https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss*
6. *Niu J, Shi L, Liu Z, Pu T, Li H, Wang G, Xie G: High order diffraction suppression by quasiperiodic two dimensional gratings. 2017. 7, 366-375.*
7. *LCOE/UPM: Ensayos de descarga eléctrica con cebado exterior e interior. 2016. Ref. Doc. Nº2016043F0161. Informe para Dinnteco International.*
8. *Pozar DM: Microwave Engineering. Caps 6 y 8. 2013, Wiley Student Ed.*
9. *Collin RE: Foundations for Microwave Engineering. Caps 7 y 8. 2001, Wiley-IEEE Press.*

3D. Plataformas terrestres

Cooperación entre vehículos no tripulados (UGV-UAV) para misiones fuera de línea de vista

Villena Salinas, Pedro[1,*], Vázquez Calvo, Pablo[1], Naranjo Hernández, José Eugenio[2], Jiménez Alonso, Felipe[2]

[1] everis ADS (Aeroespacial, Defensa y Seguridad) SL, Camino Fuente de la Mora 1, Planta 4, 28050 Madrid, España.

Email: pablo.vazquez@everis.com (PVC), pedro.cesar.villena.salinas@everis.com (PVS).

[2] INSIA (Instituto Universitario de Investigación del Automóvil) UPM (Universidad Politécnica de Madrid), Campus Sur UPM, Carretera de Valencia (A3) km. 7, 28031 Madrid, España.

Email: joseeugenio.naranjo@upm.es (JENE), felipe.jimenez@upm.es (FJA).

* Autor principal y responsable del trabajo.

Resumen

Los vehículos terrestres no tripulados (UGV) militares permiten extender las capacidades del Ejército en zonas de operaciones de guerra convencional y no convencional (terrorismo, ciberguerra y guerra electrónica), reduciendo los riesgos del personal involucrado, especialmente en escenarios NBRQ, y en misiones de vigilancia, reconocimiento y eliminación de artefactos explosivos (EOD, IED, UXB, UXA).

Uno de los principales problemas a solucionar para consolidar la implantación de UGV en los ejércitos es asegurar su operatividad en misiones fuera de la línea de vista desde una estación de mando y control. El aumento de la distancia y el tiempo de operación exigen una alta fiabilidad de las comunicaciones necesarias para ejecutar las tareas de supervisión, control y monitorización de la plataforma UGV, con transmisiones en tiempo real, con el ancho de banda y los tiempos de latencia requeridos.

Una solución a este problema es la integración en la cadena de comunicaciones de uno o varios vehículos aéreos no tripulados (UAV), que tengan una línea de vista directa con la plataforma UGV para asegurar un enlace de comunicaciones de gran ancho de banda, continuo, fiable y eficiente. Este tipo de cooperación permite disponer de una solución con capacidad de operar en diversos escenarios donde las características conjuntas de los UGV/UAV maximizan la eficacia y éxito de la misión.

En este artículo se plantea un esquema de cooperación entre UGV y UAV enfocada en la integración de un UAV cautivo dentro de la cadena de comunicaciones, por su reducido coste de implantación, rápido despliegue y fácil integración con otros sistemas.

Palabras clave

Plataforma terrestres, UGV, RPAS, plataformas aéreas, UAV, cooperación UGV/UAV, sistemas de comunicaciones.

1. Introducción

1.1. Vehículos terrestres no tripulados

En los últimos años, muchos grupos de investigación europeos (INSIA, INRIA, Autopia, CMU, PATH, Parma, etc.) han estado trabajando en el dominio de los sistemas de transporte inteligente, especializándose en el área de los vehículos autónomos para aplicaciones civiles. Esta tecnología y sus aplicaciones en el sector militar para misiones en zonas de operación, empezaron a ser de gran interés a partir de las competiciones *DARPA Grand Challenge* en 2004, 2005, 2007 y 2013 [1].

Un vehiculo terrestre puede adquirir capacidades autónomas mediante un kit de robotización, que está conformado por un grupo de actuadores (dirección, frenos y acelerador), una unidad de control y un grupo de sensores especializados, estos últimos seleccionados según los objetivos operativos del UGV (p.e. lidar 3D/2D de corto, mediano y largo alcance; cámaras estabilizadas simples y estereoscópicas, radares de apertura sintética, sistemas inerciales –acelerómetros, giróscopos y magnetómetro–, sistema global de navegación por satélite, etc.).

Figura 1. Kit de robotización de Kairos Autonomi: Pronto4 Series 4 (P4S4) [6].

El amplio desarrollo de UGV en el ámbito civil está reduciendo rápidamente los costes para la robotización de un vehiculo, los cuales se pueden aprovechar en el ámbito militar bajo ciertas condiciones de operatividad, como tener el control completo del UGV mediante la tele-operación desde una estación de mando y control. En este sentido, cada vez se encuentran más UGV con capacidades mínimas de autonomía como son la detección de obstáculos, alertas de colisión y determinadas acciones supervisadas.

En la tele operación de los UGV es importante la robustez y fiabilidad del enlace de comunicaciones inalámbrico para que las señales de vídeo y los comandos de control lleguen desde la estación de mando y control al UGV sin ninguna interrupción. Este enlace de comunicaciones se degrada rápidamente a medida que aumenta la distancia entre el UGV y la estación de mando y control [2].

1.2. Vehículos aéreos no tripulados

Desde hace algunas décadas los vehículos aéreos no tripulados (UAV) de ala fija han ido ganando popularidad. En el ámbito militar, el uso de los UAV se ha incrementado significativamente, especialmente para misiones de vigilancia, búsqueda, rescate y ataques estratégicos (ver figura 2a). A partir de que la

Universidad de Stanford desarrollara un controlador muy robusto para un multicóptero [4], el uso de UAV con multirrotores se ha extendido enormemente por su bajo coste y tamaño en comparación con los UAV de ala fija. Los multirrotores han evolucionado rápidamente mejorando sus prestaciones y capacidades, logrando ampliar su rango de aplicación a multitud de ámbitos.

La limitación en el tiempo de autonomía de los UAV multirotores está determinado principalmente por el tamaño y eficiencia de las baterías y los rotores. Esta limitación se puede resolver mediante un cable umbilical de alimentación continua desde una estación de tierra, a costa de una movilidad restringida. Ciertos UAV cautivos pueden elevar una carga de pago hasta una altura aproximada de 100 metros, permitiendo disponer de un punto elevado para misiones de vigilancia y reconocimiento [5].

Figura 2. a) UAV de ala fija de SCR. b) UAV cautivo de PowerLine.

En la actualidad, se están desarrollando varias propuestas de colaboración UGV y UAV para uso militar. La empresa RoboTeam está desarrollando a Rooster, un UAV hexa-rotor con una carga de pago de 4,5 kg, para transportar al microrobot Iris de 1,65 kg a localizaciones de difícil acceso (ver figura 3a). El Ejército de Corea del Sur está estudiando el uso de múltiples UGV ligeros como relés de comunicaciones para la tele-operación de un UGV pesado [2], donde algunos UGV ligeros cuentan con un mutirrotor que colabora en las funciones de vigilancia del entorno de las operaciones [7, 10].

Figura 3. Colaboración entre UGV y UAV: a) Rooster e Iris. b) MoD Corea.

1.3. Topologías de comunicaciones

Las diferentes formas de colaboración entre vehículos no tripulados se pueden clasificar por la topología de las comunicaciones utilizada. Según la topología, el protocolo de comunicaciones define las prestaciones de la red (fiabilidad y rendimiento) para el intercambio de información (vídeo y datos) entre los nodos de la red (estación de mando y control, y los vehículos no tripulados).

Las topologías más utilizadas son las redes dedicadas punto a punto y las redes distribuidas en malla. Las redes en malla permiten la interconexión de múltiples nodos distribuidos, dando como resultado una red muy robusta, compleja y escalable, pero costosa e ineficiente. El número de nodos (repetidores, puntos de acceso, etc.) permite estimar el rango de cobertura, el coste de la infraestructura, la latencia de transmisión y el ancho de banda [2].

Las redes de malla permiten incrementar el rango de cobertura de un UGV usando varios repetidores entre el UGV y la estación de mando y control. Una distribución homogénea de los repetidores permite varias rutas de enlace, aumentando la robustez y fiabilidad [3], pero disminuyendo el ancho de banda y aumentando la latencia por los complejos algoritmos de control de tráfico, conmutación y enrutamiento utilizados [2]. Por el contrario, las redes dedicadas punto a punto son simples, baratas y eficientes, pero menos escalables y en determinados escenarios poco robustas.

2. Propuesta

Dentro de un escenario operativo de guerra no convencional, donde no existe un frente hostil definido, un UGV puede ejecutar diversas misiones (reconocimiento, suministro, ataque, etc.) sin poner en riesgo al personal operativo. La transportabilidad del UGV es una característica clave para que este pueda ser rápidamente suministrado y desplegado en este tipo de escenarios. Se propone utilizar un vehículo militar ligero robotizado de aproximadamente 500 kg que pueda ser transportado y lanzado desde un avión de carga junto con el resto de suministros logísticos. Debido a que este tipo de operaciones logísticas habitualmente se realizan en batallones y/o compañías desplazadas en zonas de operaciones, se establece un rango medio de cobertura aproximado de 15 km entre el UGV y su estación de mando y control [8].

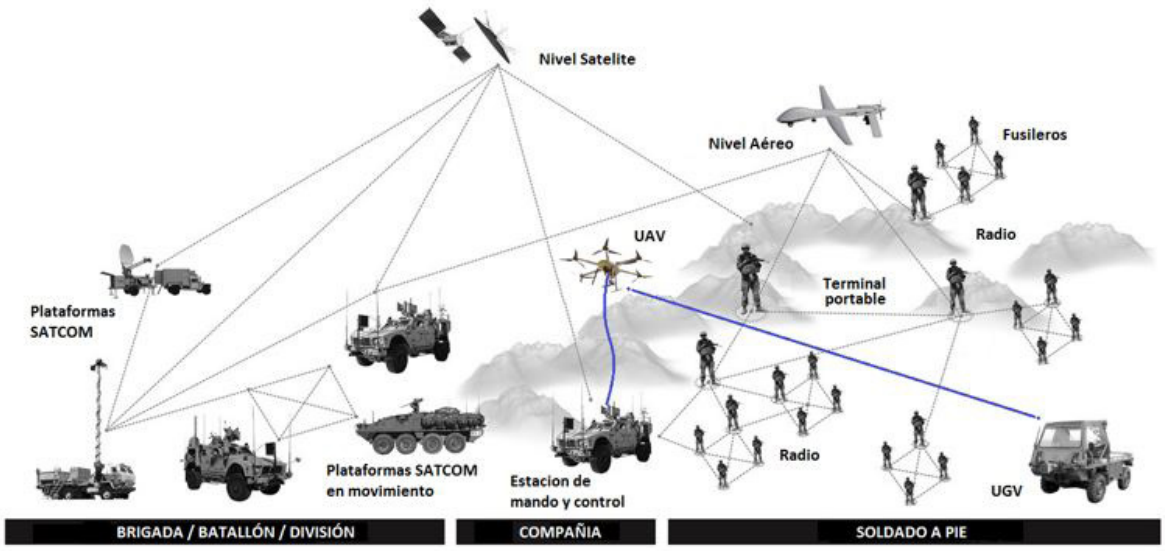


Figura 4. Cobertura de comunicaciones en un escenario de operaciones.

2.1. Vehículo terrestre no tripulado (UGV)

Se propone utilizar como UGV la evolución de la mula mecanizada actualmente existente en el Ejercito de Tierra español, específicamente el vehiculo 4x4 especial aerolanzable de ToroDT Q-150D Grizzly. Este vehículo contará con un kit de robotización desarrollado por el INSIA que permite a la mula dos

modos de funcionamiento remoto: tele-operado o guiado autónomo. En ambos modos el UGV realiza acciones autónomas para prevenir la colisión con obstáculos y rutas no transitables [1]. Este kit es fácilmente instalable en la mula, permitiendo ambos modos de conducción: manual o autónoma, y comprende los siguiente módulos: control (dirección, freno y acelerador), percepción (cámaras y LiDAR), comunicaciones (vídeo y control) y navegación (INS y GPS).

Figura 5. Evolución de la mula mecanizada aerolanzable Grizzly Q-150D

La unidad de control y operación (OCU) del UGV se encontrará dentro de la estación de mando y control. Se propone utilizar la plataforma de simulación de vehículos militares de SIMUMAK Simescar Gold 4x4, que cuenta con una interface de operación altamente inmersiva y muy realista, la cual puede utilizarse también para el entrenamiento y certificación de los operadores.

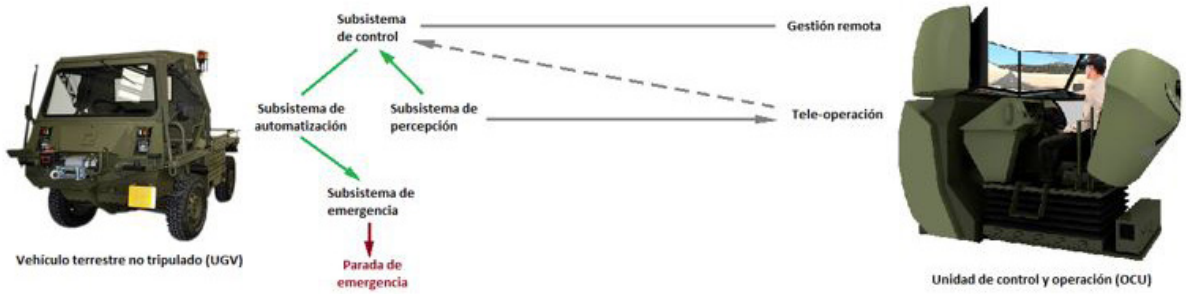


Figura 6. OCU del UGV (Simescar Gold 4x4 de SIMUMAK).

2.2. Vehículo aéreo no tripulado (UAV)

Se propone utilizar como UAV cautivo el hexacóptero de everis ASTER-T para que sobrevuele el vehículo de mando y control a una altura aproximada de 100 metros. El despliegue del UAV puede ser realizado desde el techo del vehículo de mando o desde una posición sobre el suelo hasta una distancia máxima de 200 metros de este vehículo. El UAV cautivo tiene la capacidad de seguir al vehículo de mando, manteniendo su posición sobre el mismo hasta una velocidad de 35 km/h [9].

La carga de pago del UAV cautivo está compuesta por una cámara auto estabilizada de alta definición para el espectro visible e infrarrojo, y dos módulos de comunicaciones militares en diferentes bandas para la señal de vídeo y control.

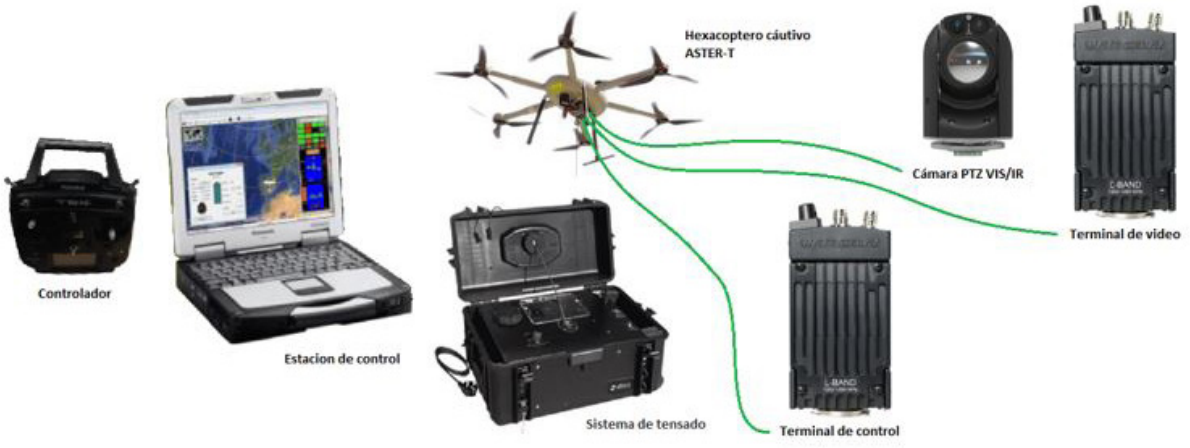


Figura 7. Hexacóptero cautivo ASTER-T de everis ADS.

2.3. Sistema de comunicaciones

Se propone utilizar el terminal militar de radio MPU5, desarrollado por Persistent Systems, que utiliza la tecnología Wave Relay MANET y permite la transmisión de vídeo de alta definición usando los compresores de vídeo H.264. El sistema de comunicaciones dispone de dos terminales MP5 que están montados en el UGV y el UAV cautivo. El terminal RF1150 (High Power L Band Module) se utiliza para el control, configuración y monitorización del UGV, y el terminal RF5100 (Upper C Band Module) para la señal de vídeo.

Las comunicaciones entre el UAV y la estación de mando y control se realizan por el cable umbilical del UAV usando el protocolo IEEE 1902 para comunicaciones de gran ancho de banda sobre redes de alimentación eléctrica.

3. Resultados esperados

Disponer de un vehículo terrestre no tripulado (UGV) aero-lanzable, desarrollado en su totalidad por un consorcio de empresas españolas, que pueda utilizarse de forma tele-controlada en operaciones fuera de línea de vista hasta un rango medio de 15 km de distancia.

El UGV estará basado en una plataforma actualmente en uso en el Ejército de Tierra español, permitiendo los modos de conducción manual y autónoma, y los modos de funcionamiento tele-operado y autónomo, con la capacidad de detectar automáticamente obstáculos. Esta capacidad puede ser desactivada en zonas complejas donde el operador del UGV deba controlar el vehículo a baja velocidad. El UGV puede circular en modo autónomo hasta una velocidad máxima de 50 km/h, dependiendo de la complejidad del terreno y las condiciones climatológicas. En modo tele-operado, la velocidad del UGV se puede incrementar a criterio del operador.

La OCU, diseñada para misiones de larga duración, ofrece una inmersión total del operador en el entorno del UGV, visualizando todo el panorama de conducción en tiempo real y sintiendo las diversas fuerzas del terreno sobre el vehículo (vibraciones, aceleraciones, golpes, etc.). De esta forma se minimizan los efectos de mareo y migraña causados por la diferencia entre la percepción visual y el sentido del equilibrio del operador [1].

El UAV cautivo es una solución flexible y de bajo coste, que puede ser suministrada a cualquier estación de mando y control tanto para la monitorización y vigilancia de su entorno como para la operación con un UGV que se esté realizando a gran distancia [3].

El sistema de comunicaciones dedicado punto a punto con dos bandas de transmisión entre el UGV y la estación de mando, asegura un enlace robusto y fiable para los datos de control del vehículo (banda L), y un enlace de gran ancho de banda para los datos de vídeo (banda C).

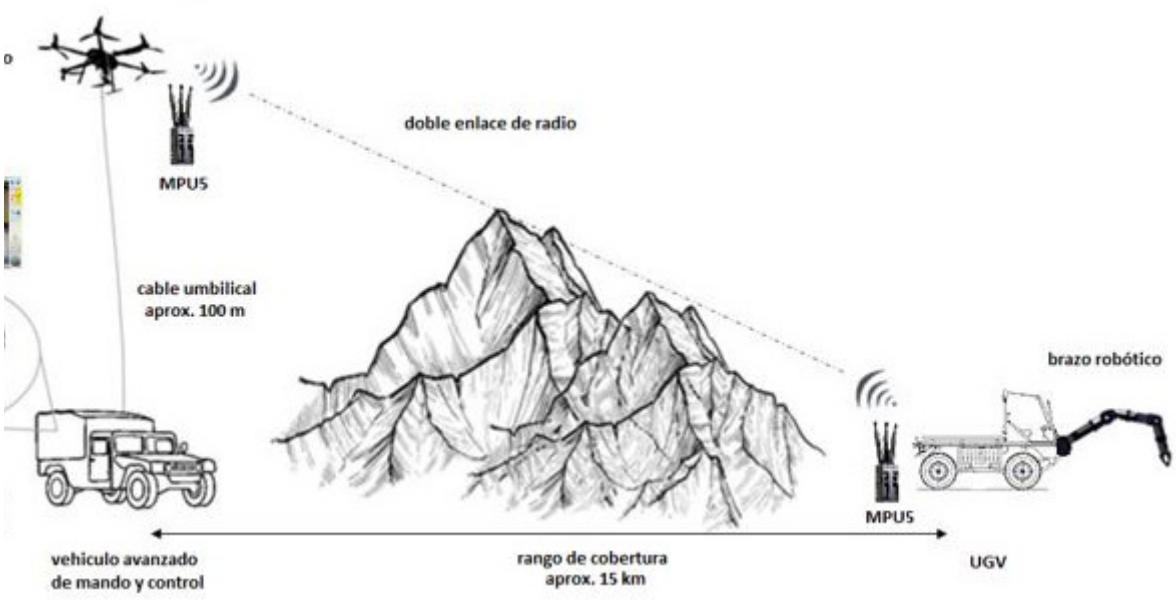


Figura 8. Colaboración entre UGV y UAV para comunicaciones fuera de línea de vista, usando dos líneas de comunicaciones dedicadas.

4. Conclusiones

En este artículo se propone una solución de colaboración entre UGV y UAV, con una línea de comunicación dedicada punto a punto para la ejecución de misiones de larga duración con un UGV fuera de línea de vista.

Se pretende demostrar la viabilidad (técnica, operativa y de costes) de una solución de comunicaciones en un entorno altamente exigente como es el entorno militar, y el potencial de un sistema tele-operado para ser utilizado en misiones en zonas operativas, limitando los riesgos del personal asignado a este tipo de misiones.

Se plantea implementar dicha solución dentro del marco del Programa COINCIDENTE 2018 financiado por el Ministerio de Defensa de España mediante el proyecto *Cooperación entre vehículos no tripulados (UGV-UAV) para misiones NBRQ fuera de línea de vista – COOP-UXV*, con el objetivo de demostrar su factibilidad para ser incorporadas a misiones a nivel de batallón y compañía.

Adicionalmente, la solución propuesta resuelve otras problemáticas no expuestas en este artículo que son necesarias abordar en misiones que incluyen la tele-operación de UGV fuera de línea de vista:

- Utilización de entornos totalmente inmersivos para la tele-operación de UGV en misiones de larga duración, de forma que se mejore la experiencia de los operadores y puedan extenderse los límites de actuación.
- Aplicación orientada a escenarios NBRQ utilizando un brazo robótico tele-operado para la manipulación remota de objetos, recolección de muestras, detección de agentes de guerra, despliegue de balizas y sensores, etc.

Referencias

1. *Naranjo JE, Clavijo M, Jiménez F, Gómez O, Rivera JL, Anguita M. Autonomous vehicle for surveillance missions in off-road environment. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Sweden. 2016.*
2. *Chae H, Ju JH, Kim TH. The reliable design by the wireless network redundancy for remote control mechanism of the heavy unmanned ground vehicle. IEEE International Conference of Advanced Intelligent Mechatronics, Alemania. 2017.*

3. *Baumgärtner L, Kohlbrecher, Euler J, Ritter T, Stute M, Meurisch C, Mühlhäuser M, Hollick M, Von Stryk O, Freisleben B. Emergency communication in challenged environments via unmanned ground and aerial vehicles. IEEE Conference of Global Humanitarian Technology, USA. 2017.*
4. *Hoffman GM, Rajnarayan DG, Waslander SL, Dostal D, Jang JS, Tomlin CJ. The Stanford testbed of autonomous rotorcraft for multi agent control (STARMAC). IEEE Conference of Digital Avionics Systems. 2004.*
5. *ZikouL, Papachristos C, Tzes A. The power-over-tether systems for powering small UAVs: tethering-line tension control synthesis. IEEE Conference of Control and Automation, Spain. 2015.*
6. *Kairos Autonomi: Pornto4TM.Agnostic Autonomi System - Existing Vehicle Autonomy for Unmanned Ground Vehicles [internet]. [Consultado 3 Septiembre 2018]. Disponible en http://www.kairosautonomi.com/pronto4-system-s4.php*
7. *Chae H, Kim WY, Hong JT. The comparison of the detecting performance between the ground and the aerial visual analytics in te UGV-UAV collaborative system. IEEE International Conference of Advanced Intelligent Mechatronics, Canada. 2016.*
8. *Fraga P, Castelo L, Morales A, Camas JM. Sistemas de comunicaciones militares de banda ancha basados en tecnologías inalámbricas 4G. Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad DESEi+d 2015, España. 2015.*
9. *Waslander S. Unmanned aerial and ground vehicle teams: recent work and open problems. En: Nonami K, Kartidjo M, Yoon KJ, Budiyono A. Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, Tokyo. Springer, 2013. p. 21-35.*
10. *Quintin F, Iovino S, Savvaris A, Tsourdos A. Use of co-operative UAV to support/augment UGV situational awareness and/or inter-vehicle communications. International Federation of Automatic Control, UK. 2017.*
11. *Duan H, Liu S. Unmanned air/ground vehicles heterogeneous cooperative techniques: current status and prospects. Science China Technological Sciences, Beijing. 2010.*
12. *Cantelli L, Lo Presti M, Mangiameli M, Melita CD, Muscato G. Autonomous cooperation between UAV and UGV to improve navigation and environment monitoring in rough environments. International Symposium Humanitarian Demining, Zagreb. 2013.*

Validación y pruebas de vehículo de tracción eléctrica y rango extendido VAMTAC ST5 híbrido

Resino, D.[1,*], Castro, V.[2], Acosta, T.[3], López, JM.[4], Arribas, B.[5]

[1,2,3,4] Universidad Politécnica de Madrid – Instituto Universitario de Investigación del Automóvil, Crta. Valencia km 7 – Campus Sur UPM – Madrid.

[5] URO Vehículos Especiales SA. Crta. Puentecesures a Villagarcía – Valga – Pontevedra.

* email: daniel.resino@upm.es

Resumen

En el marco del programa Coincidente, la Universidad Politécnica de Madrid –y concretamente el INSIA– ha liderado el proyecto ATHEMTO, en el que junto con la empresa UROVESA se ha desarrollado el primer prototipo de vehículo militar de transporte operativo con tracción puramente eléctrica y extensión de rango sobre la plataforma de un vehículo URO VAMTAC ST5. Como parte final del proyecto, el prototipo ha sido sometido a una batería de pruebas de distinta índole para validar tanto las prestaciones del mismo como las herramientas utilizadas para su diseño y desarrollo.

El presente trabajo tiene como objetivo la descripción de las pruebas de velocidad, rampa máxima, y autonomía realizadas en pista de pruebas, así como la descripción y validación de los modelos de simulación utilizados durante el proceso de diseño y desarrollo de los diferentes sistemas involucrados.

Palabras clave

Model based design, electric vehicle, hybrid vehicle, vehicle, range-extended, real testing, 4WD test.

1. Introducción

En los últimos años, la electrificación de los vehículos terrestres se ha convertido en la tónica habitual, debido fundamentalmente a la necesidad de reducir el consumo y las emisiones contaminantes del transporte rodado en las sociedades del siglo XXI. En el ámbito de la defensa, la electrificación de los sistemas de propulsión de los vehículos terrestres cuenta con importantes ventajas adicionales, como son fundamentalmente sus menores huellas térmica y sonora así como la posibilidad de contar con suministro de energía eléctrica para todos los equipos auxiliares embarcados, cada vez más demandantes.

Como respuesta a esta necesidad, la Universidad Politécnica de Madrid –y concretamente el INSIA– presenta en el marco del programa Coincidente 2015 una propuesta junto con UROVESA para la implementación de un prototipo de vehículo de transporte operativo con tracción puramente eléctrica y extensión de rango sobre la base de un URO VAMTAC.

El presente trabajo pone el foco en la descripción de los ensayos realizados con el vehículo prototipo, con el fin de comprobar el cumplimiento de los requisitos planteados para este proyecto. Además, también se realizará la descripción de los modelos de simulación desarrollados durante el proceso de diseño, así como la validación de los mismos contrastando sus resultados con los obtenidos durante las pruebas.

2. Descripción del vehículo

El objetivo principal del proyecto ha sido desarrollar un prototipo demostrador de vehículo de transporte militar operativo, con tracción totalmente eléctrica y rango extendido basado en el URO VAMTAC. Para ellos, se ha eliminado la caja de cambios con convertidor de par presentes en el sistema de tracción del vehículo convencional, desacoplándose por completo el motor de combustión de la cadena cinemática que lo une con las ruedas (figura 1). En su lugar se han instalado dos motores eléctricos responsables del movimiento del vehículo y un tercero a modo de generador conectado al motor de combustión –que ha sido reducido en tamaño– que suministra energía eléctrica de forma controlada para asegurar el funcionamiento requerido dependiendo del modo de operación seleccionado por el conductor.

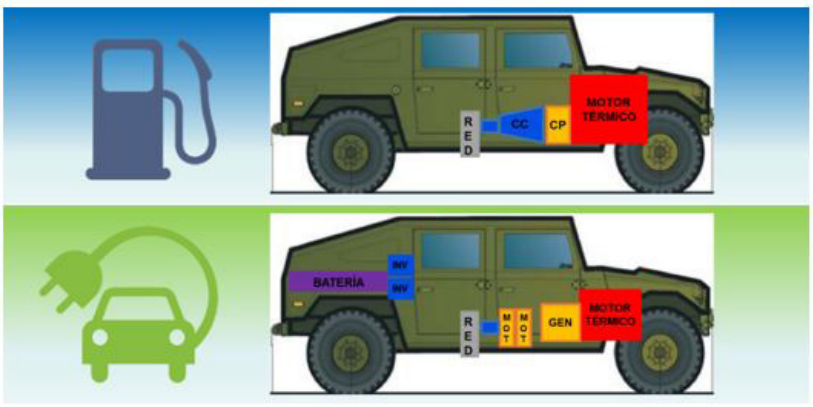


Figura 1. Esquema de sistema de tracción convencional frente al desarrollado.

3. Validación del modelo de simulación

Para validar el modelo de planta desarrollado con el programa AVL-Cruise, se compararon los resultados obtenidos durante las simulaciones con los datos registrados durante las pruebas.

3.1. Maniobra de velocidad máxima

En cuanto a la prueba de velocidad máxima, se realizó un ciclo con el pedal de acelerador accionado a su máxima posición. En las figura 2, figura 3 y figura 4, se muestran las comparaciones de algunas señales del vehículo, motor de tracción y batería, respectivamente, entre los resultados obtenidos en pruebas (test) y los calculados en las simulaciones (*cruise*).

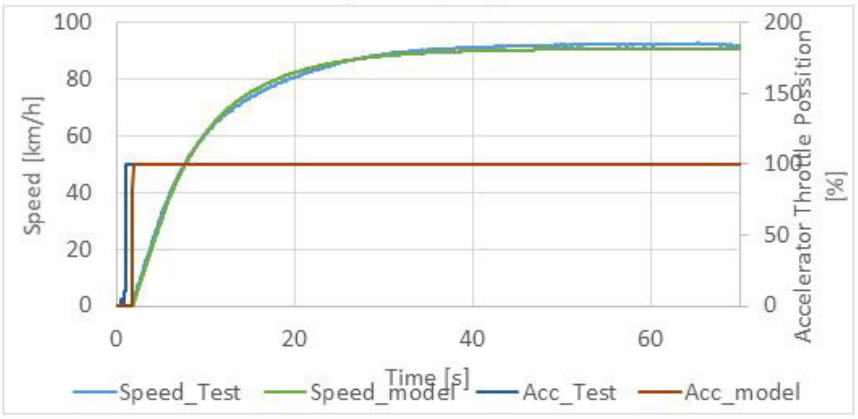


Figura 2. Comparación de las señales de velocidad y pedal de acelerador.

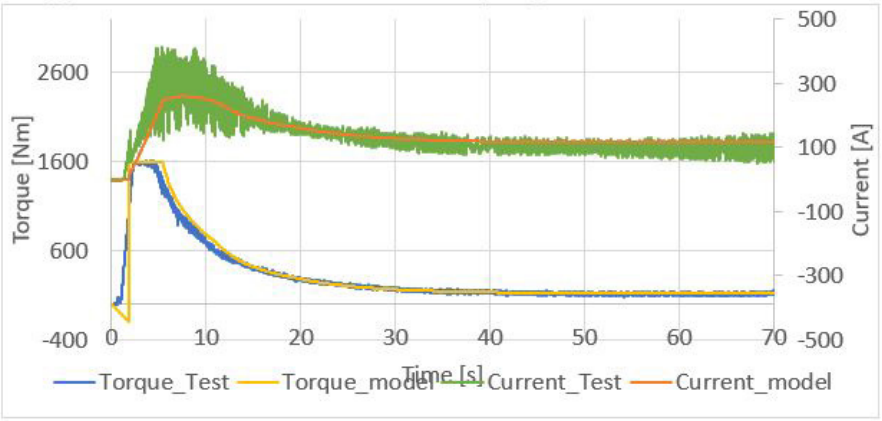


Figura 3. Comparación de las señales de par y corriente en el motor de tracción.

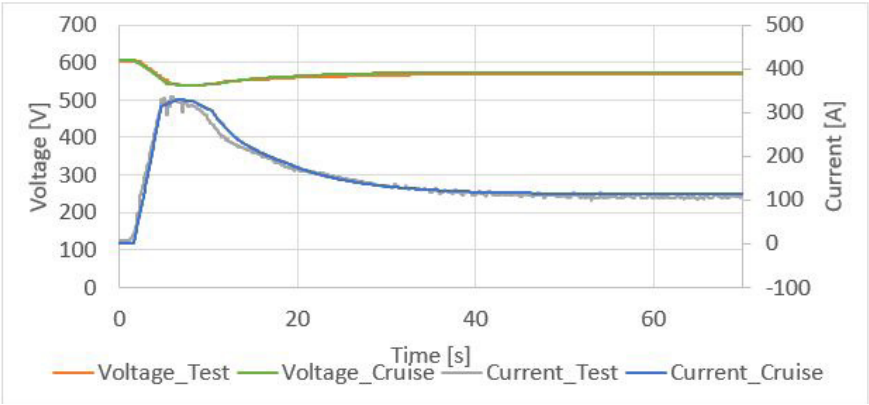


Figura 4. Comparación de las señales de voltaje y corriente en la batería.

3.2. Maniobra de subida 60 %

Para el ensayo de pendiente máxima superable por el vehículo, se obtuvieron también resultados similares entre los datos registrados durante la prueba y los valores generados en la simulación, como se puede ver en las figura 6 y figura 5.

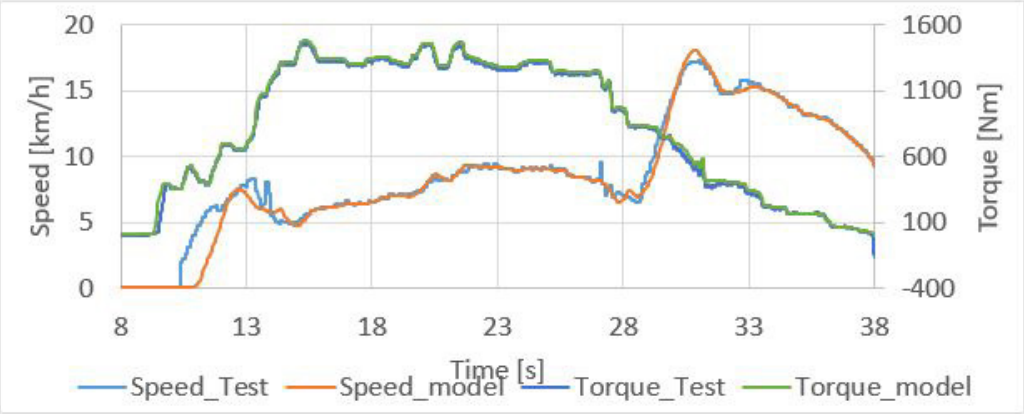


Figura 5. Comparación de las señales de velocidad del vehículo y par en el motor de tracción.

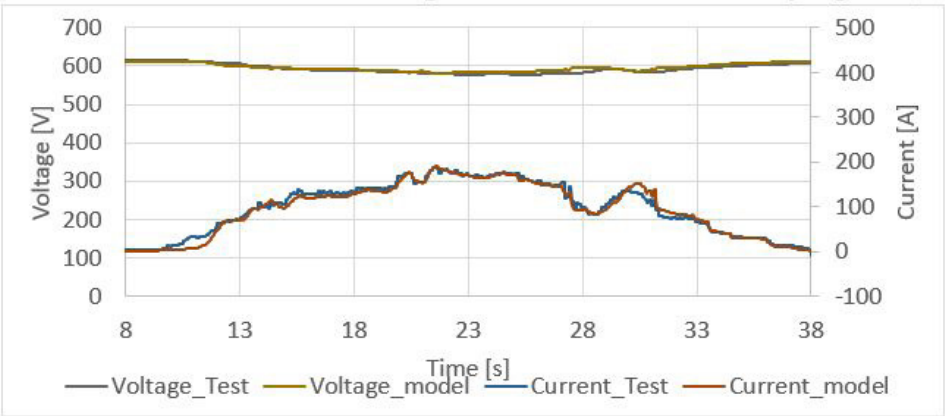


Figura 6. Comparación de las señales de voltaje y corriente en la batería.

4. Definición de las pruebas

4.1. Requisitos funcionales

- RF1. Pendiente máxima superable de un 60 %.
- RF2. Velocidad máxima en llano de 100 km/h.
- RF3. Autonomía equivalente al convencional.

Los resultados más relevantes del presente trabajo se han valorado mediante el testeo del prototipo en pista. Con este fin se ha utilizado un equipo embarcado Dewetron 2602 con el que se han registrado las variables analógicas de tensión y corriente del bus DC del vehículo, temperaturas de los sistemas de refrigeración y todas la redes CAN del mismo.

Figura 7. Prototipo instrumentado durante las pruebas.

5. Resultados y discusión

5.1. RF1. Rampa máxima

Para la realización de este ensayo, se utilizaron pistas de pruebas con rampas normalizadas longitudinales del 30 %, 40 % y 60 %. Se realizaron los ensayos tanto en subida directa como con parada y arranque en medio de la rampa. A excepción de la pendiente del 30 % en subida directa, se emplearon las marchas cortas para el desarrollo de estas pruebas.

Las rampas del 30 % y 40 % se superaron sin dificultades. En la figura 8 se ilustran las variables correspondientes a la prueba del 60 % de pendiente. Al igual que en el caso anterior, la maniobra resulta exitosa. Con un pedal del 90 % del acelerador se consigue pasar este ensayo con una velocidad registrada de unos 10 km/h. A continuación, se muestran los resultados de la misma maniobra repetida en las tres pendientes, pero en esta ocasión partiendo desde parado en un punto intermedio de las mismas. En la figura 9 se resumen los resultados obtenidos para la subida interrumpida de la rampa. En todos los casos el par entregado por los motores de tracción es suficiente para superar la pendiente acelerando el vehículo desde un punto intermedio de la misma.

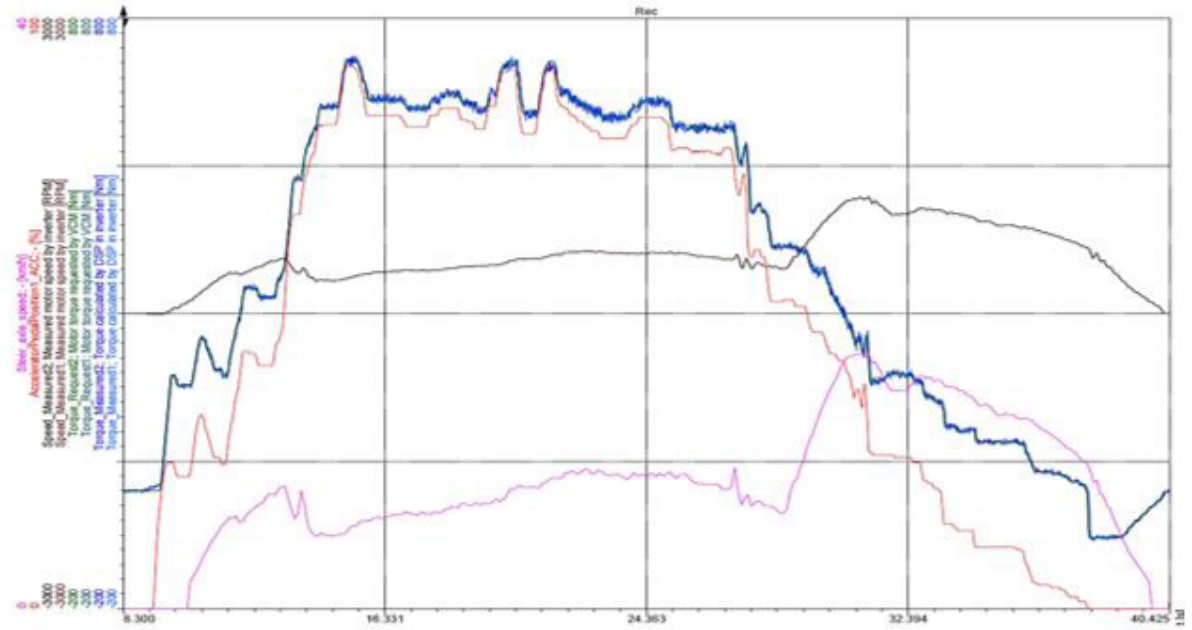


Figura 8. Señales de velocidad, pedal de acelerador, régimen de giro y par motor durante maniobra de subida de pendiente del 60 % desde lanzado (posición reductora: cortas).

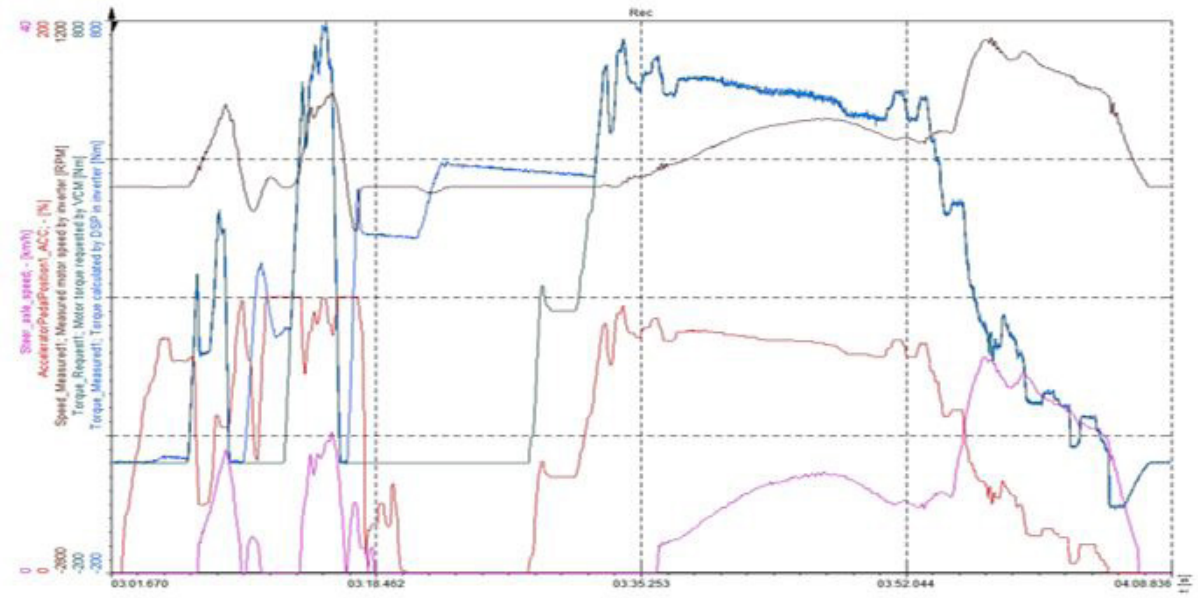


Figura 9. Señales de velocidad, pedal de acelerador, régimen de giro y par motor durante maniobra de subida de pendiente del 60 % desde lanzado (posición reductora: cortas).

5.2. RF2. Velocidad máxima

Esta prueba se realizó en las instalaciones del INTA, concretamente en el anillo de velocidad, una pista asfaltada con 3 km de longitud. Una vez comprobadas que las condiciones del vehículo eran las correctas, se accionó a su máximo recorrido el pedal del acelerador hasta que el vehículo alcanzó su máxima velocidad. Para este ensayo se empleó el modo eléctrico, el depósito de combustible estaba lleno y el vehículo cargado con el conductor y tres ingenieros.

Se registró una velocidad máxima de 95 km/h, como se muestra en la figura 10. Se puede observar también cómo en ningún caso la velocidad de giro de los motores supera su valor máximo recomendado de 3.500 rpm. Además, la batería también respeta su límite de consumo, contando aún con un margen superior a 100 A de descarga.

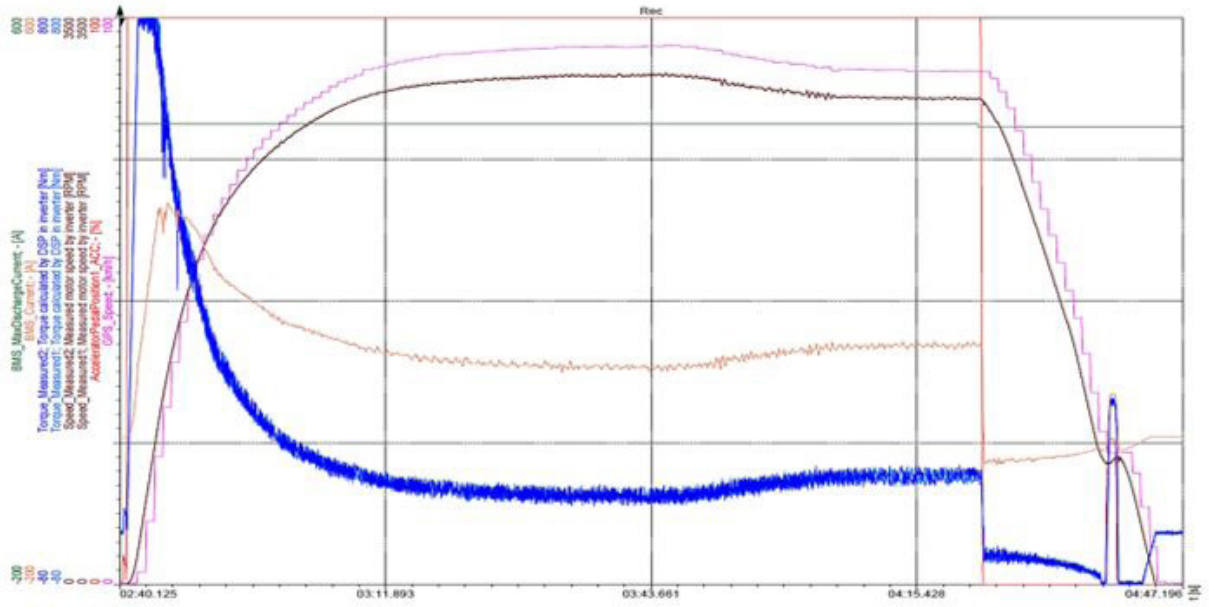


Figura 10. Velocidad máxima.

5.3. RF3. Autonomía

Tanto la autonomía como el consumo de un vehículo son extremadamente dependientes del ciclo de conducción que se realice con el mismo. Con el objetivo de objetivar esta información, las autoridades competentes en las diferentes partes del mundo se han ocupado durante décadas de encontrar un método lo más representativo posible para ofrecer esta información y permitir comparar las diferentes soluciones presentes en el mercado. En el ámbito de la defensa no existe un ciclo de estas características, de modo que se ha optado por realizar un ensayo de «peor caso».

El ensayo se ha dividido en dos partes: la determinación de la autonomía en eléctrico puro y la estimación de consumo y autonomía en modo HEVLow, ambos a velocidad máxima constante. Resulta obvio que la condición de velocidad máxima constante solo es representativa del uso en vías rápidas, si bien a falta de un ciclo estándar, es un ensayo muy sencillo de realizar en casi cualquier instalación y muy fácilmente extrapolable a otros casos. Además, de cara a evaluar un sistema de tracción eléctrico, es la condición en la que menos potencial de mejora tiene por dos motivos fundamentales: sus equivalentes en combustión dan sus mejores cifras en esas circunstancias (rpm constantes y marchas largas) y no hay ninguna concesión a la recuperación de energía mediante frenada regenerativa, pues no se produce ninguna (cero frenadas y pista llana). Para calcular la autonomía del vehículo en modo eléctrico puro, se circuló por el anillo de velocidad con un estado de carga inicial del 97 %. La prueba terminó cuando el SOC de la batería disminuyó por debajo del 20 %, momento en el que el coche pasa automáticamente a modo híbrido para mantener el estado de carga. El vehículo estaba ocupado por el conductor y tres ingenieros, el depósito de combustible lleno. En cuanto a los resultados de autonomía, se ilustran las variables más representativas en la figura 12. El pedal del acelerador está accionado a su máximo durante la prueba, y las velocidades oscilan en torno a los 85 km/h. Se observa cómo el estado de carga de la batería cae progresivamente (en este caso el valor reportado por la batería es el de profundidad de descarga, DOD, que es inverso al SOC). En el momento en que se pasó de modo eléctrico a híbrido, la distancia recorrida fue de 50 km, siendo esta la autonomía del vehículo en modo puramente EV bajo las condiciones descritas. A partir de ese momento, se recorren otros 100 km por la mencionada pista en modo HEVLow. Como consecuencia, el consumo de combustible en litros cada 100 km a los 50 km es 0, aumentando este paulatinamente según aumenta la distancia recorrida. Teniendo en cuenta que el depósito de combustible del vehículo tiene capacidad para 110 litros de combustible, los resultados obtenidos en función de la distancia recorrida han sido los que ilustra la figura 11. La autonomía máxima es de 622 km.

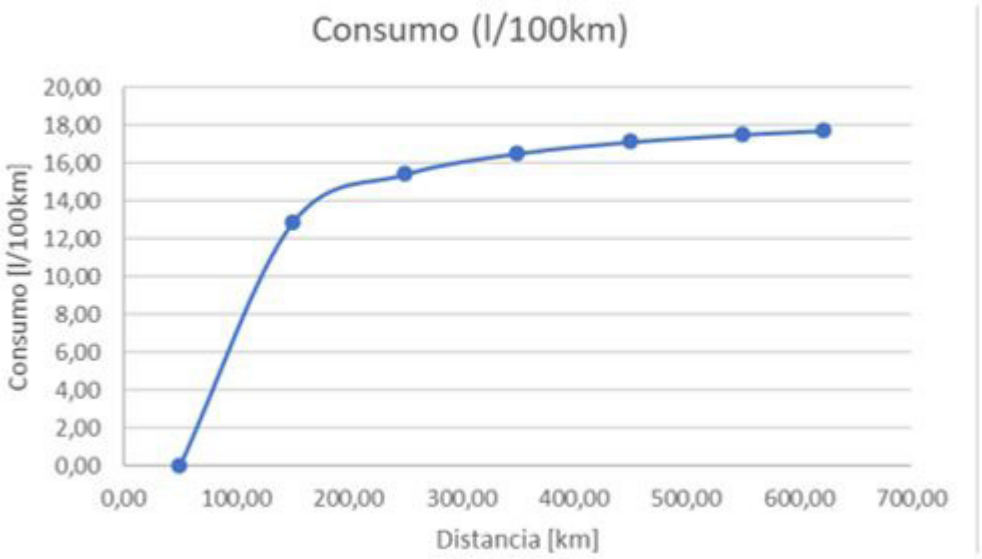


Figura 11. Consumo de combustible en función de la distancia recorrida.

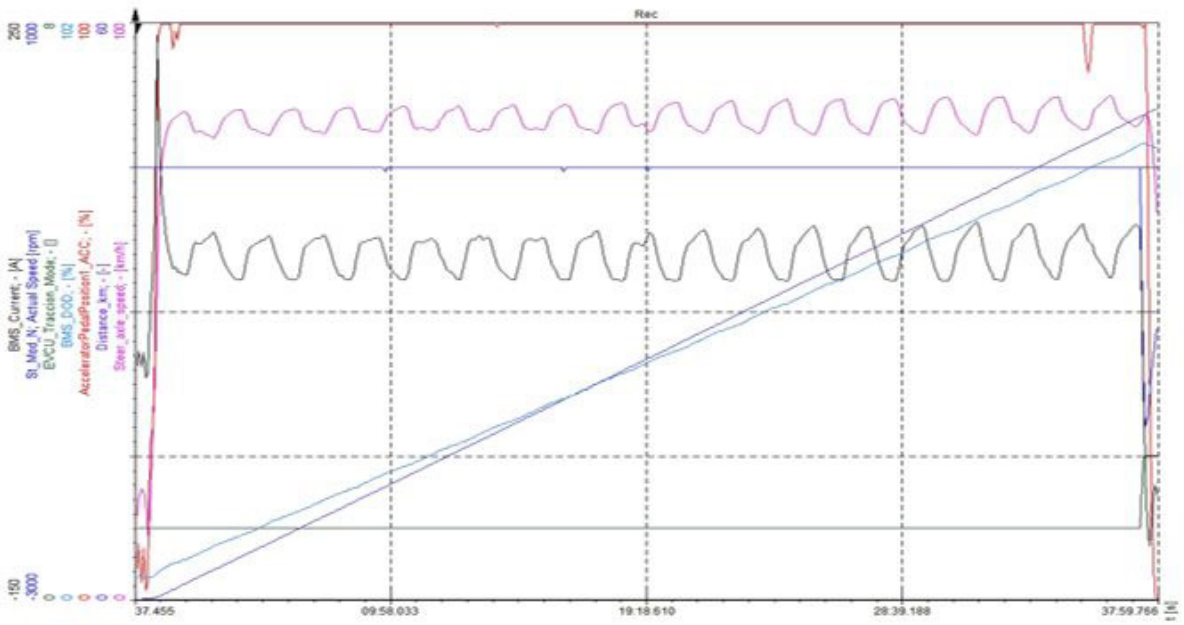


Figura 12. Autonomía en modo eléctrico.

6. Conclusiones

El proyecto ATTHEMTO ha dado como resultado el primer vehículo prototipo de transporte operativo militar realizado en España. Como principales conclusiones cabría destacar:

1. Las simulaciones realizadas durante el proyecto han sido validadas con los ensayos en pista. La representatividad de las mismas es muy elevada, siendo el modelo muy preciso.
2. El vehículo es capaz de subir la pendiente del 60 % sin necesidad de emplear todo el par disponible por los motores de tracción, por lo que sería posible subir una pista con una inclinación mayor.
3. La autonomía en modo eléctrico a velocidad máxima mantenida es de 50 km. En otras circunstancias representativas de otro tipo de conducción, como podría ser un ciclo de menor velocidad y con frenadas, esta autonomía sería superior ya que la frenada regenerativa permitiría recuperar parte de la energía en frenadas y deceleraciones.
4. El consumo a velocidad máxima mantenida oscila entre 12,8 y 17,7 l/100 km, en función de la distancia recorrida, y por tanto del porcentaje que supongan los 50 km en eléctrico puro. Al no haber podido contar con una unidad de pruebas equivalente en diésel, no ha sido posible valorar comparativamente este punto, si bien el orden de magnitud está en valores similares. Este resultado era el esperado teniendo en cuenta que el ensayo seleccionado (velocidad máxima constante) ha sido el de «peor caso» y no da lugar a recuperación de energía alguna.
5. La velocidad máxima del vehículo con la configuración del prototipo resulta algo escasa, algo ya previsto y conocido y que no se considera un grave problema desde el punto de vista de diseño, pues está previsto dotar a futuras unidades con cajas de reducción cuya relación en largas sea algo superior.
6. El funcionamiento silencioso de la unidad ha sido muy bien valorado para la aplicación.

Agradecimientos

Al Ministerio de Defensa, que a través de la DGAM ha financiado una parte de este proyecto.

A UROVESA, por su implicación en el proyecto y la financiación de otra parte del mismo.

Referencias

1. *Broy M.., Engineering Automotive Software, Proceedings of the IEEE. 2007;95 (2).*
2. *Schwer, L. E., Validation metrics for response histories: perspectives and case studies. Engineering with Computers. 2007; 23(4):295-309.*
3. *Wirasingha, S.G., Emadi, A., Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles. IEEE Trans. Veh. Technol. 2011 60(1):111–122.*
4. *N. Denis, M. R. Dubois, R. Dubé, and A. Desrochers, Blended power management strategy using pattern recognition for a plug-in hybrid electric vehicle. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 2016;14(2):101–114.*
5. *Hentunen, A., Suomela, J., Leivo, A., Liukkonen, M. and Sainio, P., Hardware-in-the-loop verification environment for heavy-duty hybrid electric vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010; IEEE, Lille, pp.1–6.*

Desarrollo de rodamientos *smart*, inalámbricos y autoalimentados

Muñoz Navascues, Oscar[1*], Casbas Giménez, Jesús[2*], Latapia Llinas, Jaime[3], Santo Domingo, Sergio[4], Gil Hernández, Daniel[5] y Sánchez Catalán, Juan Carlos[6]

1 Tecnalia Research & Innovation. oscar.munoz@tecnalia.com: (OMN

2 Tecnalia Research & Innovation. Jesus.casbas@tecnalia.com: (JCG).

3 Tecnalia Research & Innovation. jaime.latapia@tecnalia.com: (JLL).

4 Fersa Bearings. Sergio.santodomingo@fersa.com: (SSD).

5 Tecnalia Research & Innovation. Daniel.gil@tecnalia.com: (DGH).

6 Tecnalia Research & Innovation. Jcarlos.sanchez@tecnalia.com: (JCSC).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: (iniciales del autor).

Resumen

El proyecto Smart-Bearing ha sido desarrollado de manera conjunta entre FERSA y TECNALIA con objeto de analizar la viabilidad tecnológica para la integración de sistemas de monitorización autónomos en rodamientos industriales dentro del ámbito de la automoción. El objetivo del proyecto ha sido la encapsulación de un sistema de monitorización mínimo en un rodamiento a través de la cual se pudiesen extraer variables de estado del mismo de manera inalámbrica y autónoma.

Como resultado del proyecto se ha desarrollado un prototipo funcional de rodamiento inteligente con potencial de retransmitir medidas de estado de manera inalámbrica y el cual es capaz de autoalimentarse sin necesidad de baterías mediante el giro del elemento en un banco de ensayos desarrollado acorde con el contexto de funcionamiento de un vehículo pesado.

Palabras clave

Smart-Bearing, energy harvesting, wireless sensor network.

1. Introducción

Definiremos el concepto de *Fersa-Smart-Bearing*, (en adelante FSB), como el sistema embebido en rodamiento capaz de evaluar el estado de salud del mismo sin necesidad de conexiones eléctricas. Dicho concepto implica dos conceptos fundamentales, la comunicación inalámbrica para la captación externa de los datos y la capacidad de autoalimentación a través del giro del elemento.

Según los estudios de mercado disponibles [1], se puede observar la tendencia al alza del uso de rodamientos y la gran variedad de mercados en los que estos están presentes, así como la emergente necesidad de demanda de integración de sensores asociados. Este hecho ha provocado que empresas relevantes del sector orienten parte de sus investigaciones a la integración de instrumentación en componentes de este tipo y en especial en activos de gran valor añadido.

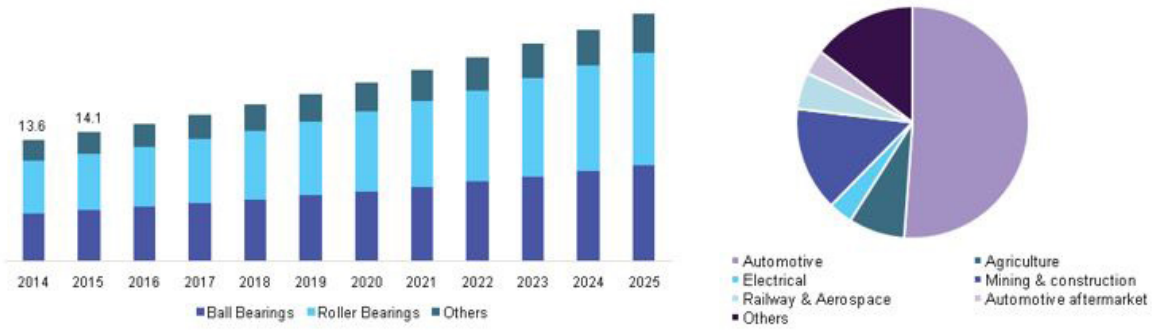


Figura 1. Evolución del mercado de rodamientos en Estados Unidos. Extraído de https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/bearings-market.

La utilización de rodamientos con tecnología FSB en vehículos de transporte puede suponer una mejor gestión de la seguridad y de los tiempos de mantenimiento de un vehículo. La detección temprana de la degradación del rodamiento puede evitar no solo la rotura del propio elemento sino la más que posible degradación de los componentes asociados evitando en consecuencia tiempos de inmovilización del vehículo elevados y costes de reemplazo adicionales.

2. Desarrollo del proyecto.

2.1. Descripción del rodamiento

El rodamiento utilizado es el modelo Fersa 300005. Se trata de un rodamiento asimétrico de doble hilera de rodillos cónicos, es específico para uso en camiones de transporte por carretera y puede ir montado

en ejes delanteros, traseros y tráilers. Se trata de un rodamiento sellado por lo que está exento de operaciones de mantenimiento asociadas a engrase.

2.2. Topología del sistema embebido

El sistema integrado FSB se compone de tres bloques fundamentales, el módulo de *energy harvesting*, el conjunto de sensores asociados y el módulo de operación del sistema. La función principal del módulo de alimentación autónoma, (*energy harvesting*), es aportar la energía eléctrica suficiente para la operación del conjunto del sistema a la vez que es posible extraer la información de la velocidad del elemento.

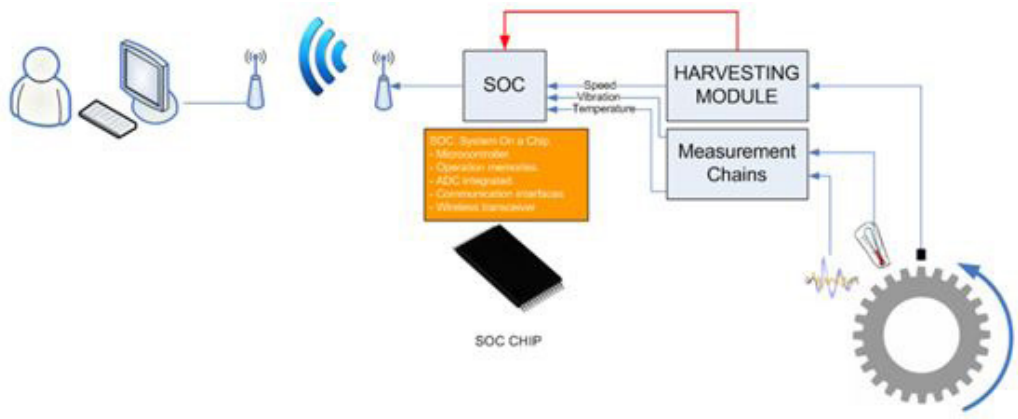


Figura 2. Topología del sistema integrado FSB.

El conjunto de sensores asociados la conforma tanto los sensores integrados como la electrónica necesaria para la correcta adquisición de los datos. El sistema cuenta por defecto con tres tipos de sensores básicos, temperatura interna del rodamiento, temperatura superficial de la carcasa y un acelerómetro triaxial de tecnología MEMS [4], para la monitorización de las vibraciones del elemento.

El módulo de operación del sistema o también denominado SOC, (*System On a Chip*), está compuesto por un único circuito integrado que engloba las capacidades de procesamiento, almacenamiento y comunicación inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.15.4. Este tipo de soluciones permite la integración en miniatura de la electrónica a la vez que un tiempo de desarrollo menor en conjunto con la mayor eficiencia de consumo del sistema [5].

2.3. Sistema de alimentación autónomo

Para la auto-alimentación del sistema se parte del aprovechamiento del giro del rodamiento para la generación de la energía eléctrica. Esto se consigue mediante un sistema electromecánico basado en un conjunto de imanes-bobina en donde el movimiento de los imanes dentro del campo de acción del captador inductivo provoca una fuerza electromotriz, (FEM), que refleja en la salida de la bobina una corriente eléctrica pequeña.

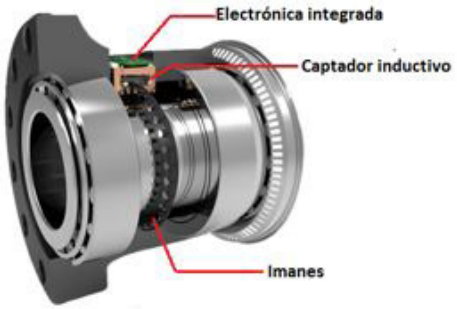


Figura 3. Sistema de alimentación autónomo.

El captador inductivo ofrece a su salida un voltaje alterno proporcional al giro del rodamiento el cual puede ser usado para la medición de la velocidad del elemento, la frecuencia de medición vendrá dictaminada por la siguiente fórmula.

$$F = \frac{1}{2} N \cdot \frac{RPM}{60} \qquad (1)$$

En donde F es la frecuencia presente en el captador inductivo, N el número de imanes y RPM las revoluciones por minuto del rodamiento.

La corriente eléctrica aportada por el captador inductivo, debido a su escasa amplitud, es adaptada a corriente continua a través de rectificadores ideales y almacenada posteriormente en un ultracapacitador de altas prestaciones el cual permite operar al sistema sin necesidad de baterías. El uso de este tipo de técnica no permite la medición del elemento en continuo, sino que es necesario que el rodamiento gire a unas revoluciones mínimas para la activación del sistema. En el caso a aplicar el sistema de recolección de energía se ha diseñado para operar a partir del equivalente a 50 Km/h en un camión comercial, lo cual permite la medición de los parámetros del rodamiento en un rango de uso del vehículo en carretera.

2.4. Integración del sistema

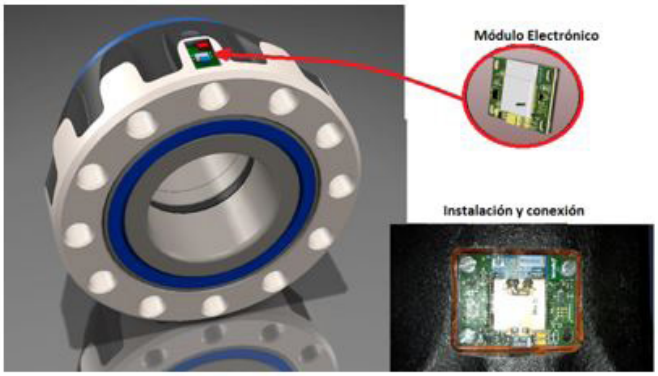


Figura 4. Integración del sistema de monitorización en rodamiento F300005.

La integración del sistema dentro del rodamiento se ha realizado mediante el cajeado del elemento y posterior inserción de la electrónica dentro del mismo de tal manera que una vez recubierta la apariencia del rodamiento no difiere de un rodamiento no instrumentado. La localización y dimensiones de la abertura del elemento han sido cotejadas con FERSA de tal manera que esta interfiera lo menos posible en las propiedades físicas del rodamiento.

Teniendo en cuenta la temperatura de operación del elemento y su posible colocación en un área próxima a un disco de freno, el encapsulamiento del sistema ha sido realizado a través de componentes epoxídicos de alto rendimiento para la protección térmica de la electrónica embebida.

2.5. Diseño del banco de ensayos

Figura 5. Diseño del banco de ensayos.

Para las pruebas de laboratorio se procedió al diseño de un banco de ensayos en las que poder simular las condiciones de operación de un rodamiento de automoción en entorno real. Para dicho propósito se dispuso de un conjunto variador-motor-reductor que permitiese modificar la velocidad del rodamiento para la programación de curvas de funcionamiento en función de la velocidad de un vehículo en carretera. Debido a que el ámbito del proyecto se orientó a la viabilidad tecnológica del sistema FSB, no se incluyó en el banco de pruebas un simulador de carga de rodamiento, (contacto asfalto-rueda).

3. Pruebas en laboratorio

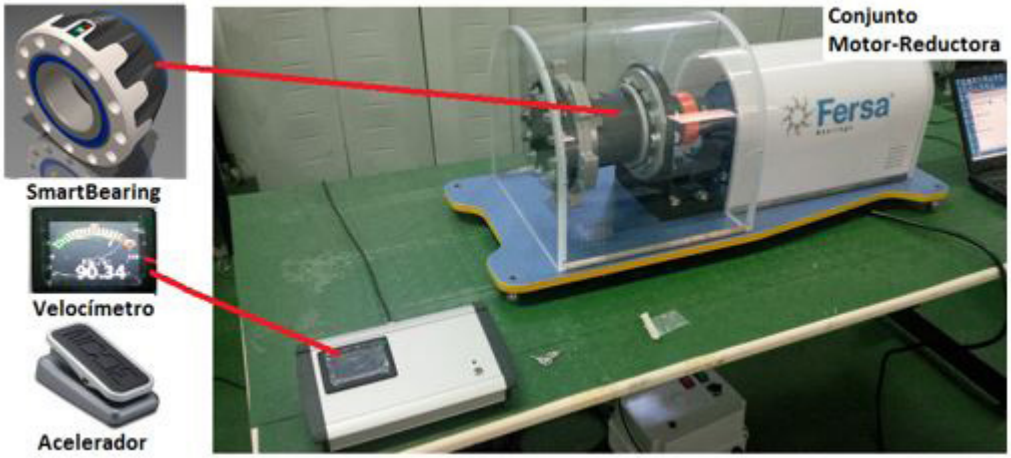


Figura 6. Banco de ensayos FERSA Smart-Bearing.

Durante las pruebas de laboratorio del sistema se realizaron ensayos relacionados con la auto-alimentación del sistema y con la medición de parámetros y cobertura de la electrónica embebida. Durante el primer ensayo se programó una curva de aceleración y desaceleración y se registraron los instantes de encendido y apagado de la electrónica mediante el monitoreo de la velocidad aportada por el rodamiento. Según los datos recolectados, la electrónica interna del rodamiento comenzó a retransmitir datos a una velocidad aproximada de 55 Km/h mientras que dejó de comunicar a una velocidad de 41 Km/h.

Figura 7. Funcionamiento del FSB en función de la velocidad.

La histéresis detectada viene condicionada con la capacidad de almacenamiento del ultracapacitador, de esta manera en el caso de que dicho elemento se encuentre cargado completamente y el sistema de

generación deje de aportar la energía suficiente, el sistema se irá alimentando del elemento de almacenamiento de energía hasta que este se descargue.

El ensayo de medición y cobertura se realizó a una velocidad constante de 70 Km/h durante un periodo de una hora, (3.600 segundos). A lo largo de este tiempo se pudo monitorizar la evolución de las temperaturas internas y de carcasa pudiendo validar que el sistema adquiría y retransmitía adecuadamente. Respecto a la cobertura del equipo, el receptor se dispuso a una distancia aproximada de tres metros aproximadamente siendo la calidad de señal, (RSSI), de unos aproximadamente -89dbm de un total de recepción de -105dbm.

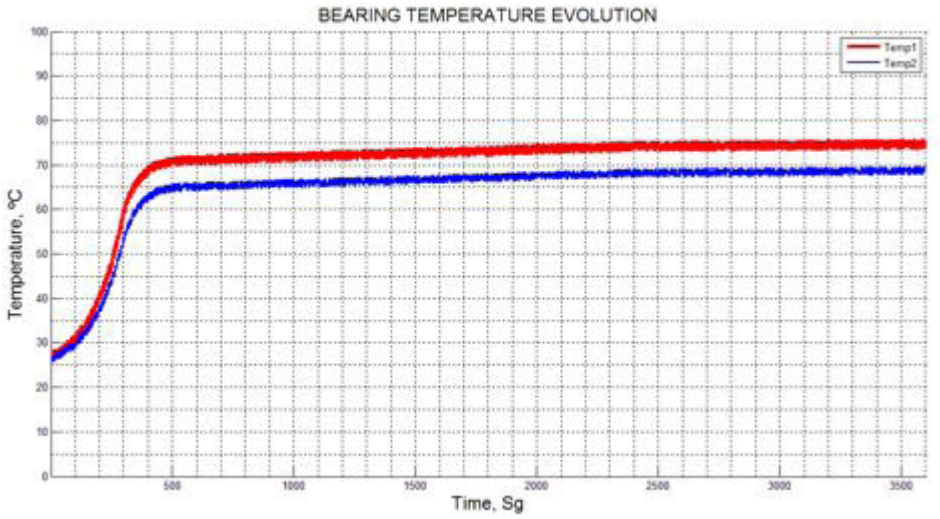


Figura 8. Evolución de la temperatura de rodamiento durante ensayo.

Debido a la disposición del banco de ensayos la lectura de los acelerómetros se descartó al no disponer de un simulador de carga variable en donde se pudiesen observar la evolución de dichos sensores.

Adicionalmente, con el fin de estudiar la viabilidad de incorporar sensores de medida de carga del elemento, se realizan pruebas en laboratorio simulando la distribución de cargas sobre el anillo externo del rodamiento. Para ello se somete al sistema a una carga puntual en cada uno de los puntos señalados en la figura 9.

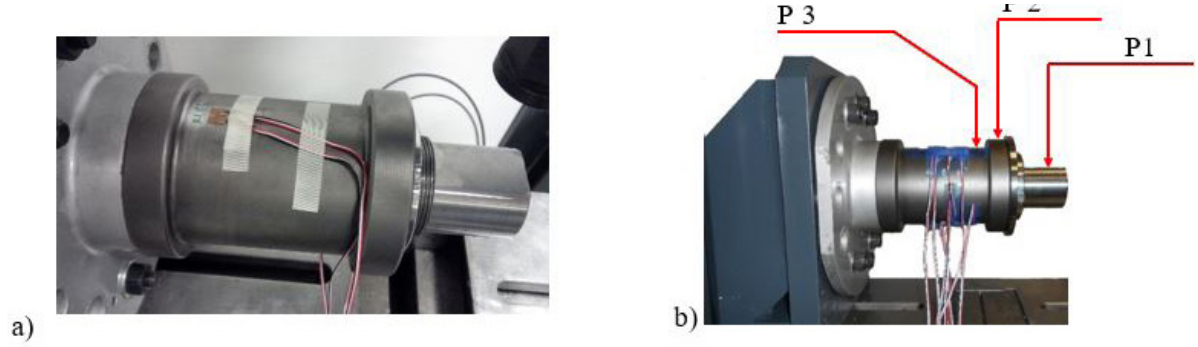


Figura 9. Diseño de montaje para pruebas de carga.

Para las mediciones de datos, se ha instrumentado el anillo externo del rodamiento mediante un montaje de medio puente con extensometría de 350Ω. Considerando dos puntos diferentes de medida. Uno centrado (C1, C2, C3) y otro en un extremo (E1, E2, E3).

La realización de la prueba ha consistido en someter al sistema a un aumento gradual de la carga a una velocidad de 500 N/min, realizando paradas con el fin de estudiar la estabilidad de la medida. Hasta una carga total de 10.000 N aprox.

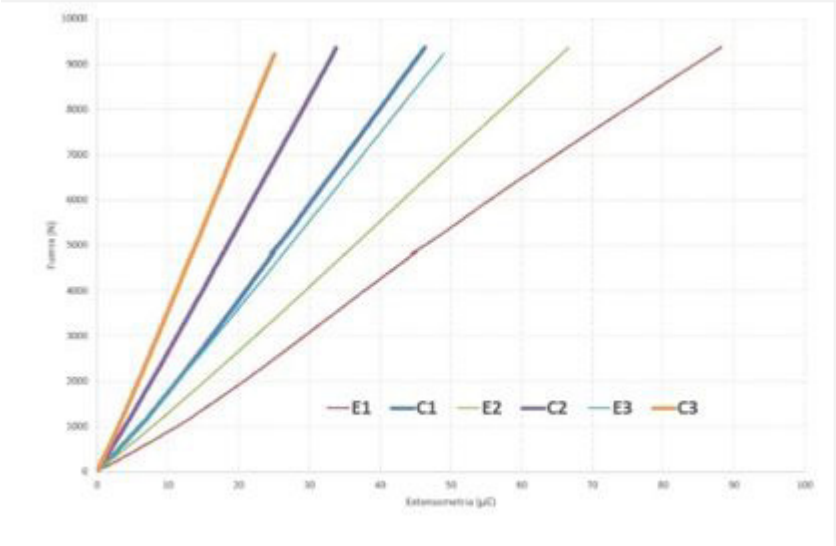


Figura 10. Comparativa de fuerza con extensometría.

4. Resultados y discusión

Después de los ensayos realizados se pudo validar la viabilidad tecnológica preliminar del sistema no sin antes evaluar los retos y debilidades del sistema actual. Cabe destacar que el aislamiento térmico implementado en esta prueba tecnológica debe de ser revisado y mejorado al no trabajar adecuadamente en régimen permanente con lo que la adición de nuevos materiales de aislamiento térmico es necesaria.

Las pruebas de cobertura de las comunicaciones se realizaron en un sistema abierto y no instalado en un vehículo real, con lo que en este último supuesto se estima que las comunicaciones sufrirán pérdidas de cobertura. Las acciones correctivas para una instalación real podrían ser el aumento de potencia de transmisión o en un caso extremo un cambio de tecnología de retransmisión a una banda inferior o un cambio de modulación.

El pilar del desarrollo sin duda ha sido la implementación de un sistema de auto-alimentación que permitiese funcionar una electrónica embebida. En este aspecto los resultados han sido positivos si bien caben mejoras en el sistema en lo relativo a la potencia generada. Se ha de destacar que la autonomía de sistemas embebidos y autoalimentados en elementos industriales no dependen únicamente de la fuente de alimentación, sino que un diseño adecuado de bajo consumo junto con políticas de funcionamiento adecuadas permitirá la integración de este tipo de tecnología.

5. Conclusiones

Dentro del ámbito de la automoción, la posibilidad de integrar soluciones de monitorización en elementos comerciales abre la puerta a multitud de aplicaciones relacionadas con el mantenimiento y correcto uso de los activos de automoción. El uso de elementos integrados y autónomos de monitorización reduce la complejidad de instalación de los sistemas y facilita información que hasta la fecha únicamente se podían obtener con sistemas complejos los cuales no son viables técnica y económicamente en una línea de producción.

Existe todavía un cierto recorrido para el uso extensivo de este tipo de desarrollos, aunque se prevé que tarde o temprano harán su aparición masiva. Actualmente la integración de sistemas de monitorización y procesamiento profundo embebidos, (con una mayor capacidad de adquisición y análisis), dependerá en gran medida del avance de la técnica en lo relativo al bajo consumo eléctrico y generación/almacenamiento de energía.

Agradecimientos

Los autores de este artículo desean agradecer a FERSA Bearings y a la Escuela Politécnica de La Almunia, (EUPLA), por la colaboración y conocimiento aportado en el desarrollo del proyecto.

Referencias

1. *Bearings Market Size, Share & Outlook | Industry Report, 2018-2025. (2018). Retrieved from https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/bearings-market/request*
2. *R. Freeland. Energy harvesting: A practical reality for wireless sensing, In press. 2011.*
3. *Bahareh Zaghari, Alex Weddell, Neil White, Imran Bashir, Terry J. Harvey and Ling Wang. Integrated Smart Bearings for next generation aero-engines. Part II: energy harvesting and wireless communications.*
4. *G S, Maruthi & Hegde, Vishwanath. (2015). Application of MEMS Accelerometer for Detection and Diagnosis of Multiple Faults in the Roller Element Bearings of Three Phase Induction Motor. IEEE Sensors Journal. 16. 1-1. 10.1109/JSEN.2015.2476561.*
5. *C. W. Wong, A. (2016). Ultra Low Power Wireless SoC Design for Wearable BAN. 239-254. 10.1007/978-3-319-21185-5_14.*

Sistema de misión de Indra para el VCR 8x8

Martín Villanueva, Vicente.

Indra Sistemas S.A. C./Joaquín Rodrigo 11, 28300-Aranjuez (Madrid).

vmvillanueva@indra.es

Resumen

El expediente para el «Desarrollo de los Programas Tecnológicos Asociados al Futuro Vehículo de Combate 8x8 (VCR 8x8)», o Programa VCR 8x8, es un complejo proyecto con objetivos a valorar, en primer lugar, desde el punto de vista de los vehículos demostradores a entregar como resultado del Programa, sobre los que el ET realizará posteriormente una evaluación operativa para concretar las especificaciones de una posterior serie; en segundo lugar, desde el punto de vista de la necesidad de un sistema de armas de altas prestaciones y capacidades, con características tales que permita mantenerlas o incluso mejorarlas, durante un ciclo de vida de muy larga duración. Entre los medios para alcanzar estos objetivos destaca el sistema de misión, desarrollado por Indra, que, a través de una arquitectura abierta, flexible y estandarizada, permite la integración óptima de subsistemas y equipos del vehículo, siendo clave en la mejora de las capacidades de movilidad, supervivencia, C4I, ISTAR (incluyendo LSAS), letalidad y sostenimiento. Sus características arquitecturales y tecnológicas proporcionan una gran flexibilidad para hacer crecer fácilmente las capacidades a futuro, incluyendo una gestión eficiente de obsolescencias. Igualmente permiten optimizar las actividades de mantenimiento y logística, abriendo las puertas a la implantación de conceptos avanzados de sostenimiento. El presente trabajo describe el sistema de misión del VCR 8x8, con el objetivo de mostrar cómo su nivel de integración funcional y operativa permite unas capacidades superiores a lo existente en servicio hasta ahora, así como asegurarlas de forma eficientemente sostenible a largo plazo.

Palabras clave

Sistema de misión, integración de sistemas, vehículo de combate sobre ruedas, flexibilidad operativa, mando y control, comunicaciones, ISTAR.

1. Introducción

El Programa VCR 8x8 está siendo ejecutado por la «UTE VCR 8x8», formada por Indra, GDELS-SBS y SAPA, en base a un contrato con la DGAM. Tiene como objetivo último la reducción de riesgos de cara a una posterior fabricación en serie del futuro vehículo de combate para el ET. Incluye seis programas tecnológicos, que proporcionarán soluciones y tecnologías plasmadas en cinco vehículos demostradores que estarán sujetos a una evaluación operativa del ET, y cuyo resultado permitirá concretar las especificaciones para la serie. Adicionalmente, existe un sexto vehículo utilizado como demostrador de movilidad, sin integración de capacidades CIS ni armamento. El conjunto de demostradores proporcionará capacidades representativas de las trece configuraciones definidas como necesidades operativas del ET, que en lo relativo a las capacidades CIS se corresponden con los niveles jerárquicos de la cadena de mando hasta el nivel de batallón o grupo táctico. Los requisitos contractuales definen un alcance muy retador, que se está abordando por medio de: **a)** Desarrollo de nuevas soluciones fundamentadas en la experiencia core de las empresas que conforman la UTE, dando un importante valor añadido al 8x8 respecto a otros vehículos (**i -** GDELS-SBS: plataforma resultante de adaptar el Piranha V a los requisitos del VCR 8x8, **ii -** SAPA: grupo motopropulsor y sistema de generación & gestión de electricidad, **iii -** Indra: sistema de misión, **iv -** Armamento: responsabilidad compartida entre Indra and GDELS-SBS) // **b)** Utilización de elementos consolidados comercial y operacionalmente que han sido considerados adecuados por la Oficina de Programa VCR 8x8 de la DGAM, tras un proceso de análisis de alternativas realizado por la UTE VCR 8x8.

Cada programa tecnológico está focalizado en un área funcional/capacidad operativa:

- **a.** PT1 - INCREMENTO DE LA SEGURIDAD: **i)** desarrollo de un sistema de alerta láser y detector de disparos // **ii)** desarrollo de una solución *add-on armour* para protección balística, un kit de protección contra RPG, y adaptación a la plataforma de un anclaje universal para un conjunto de implementos C-IED manejados desde el puesto del conductor // **iii)** análisis de alternativas de un sistema de protección activa y su preinstalación.
- **b.** PT2 - CONCIENCIA SITUACIONAL: sistema de visión panorámica 360º y sistema de ayudas a la conducción.
- **c.** PT3 - OBSERVADOR AVANZADO: sistema OAV y sistema de mando y control.
- **d.** PT4 - INTEGRACIÓN DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS, COMUNICACIONES E INFORMACIÓN: integración en el sistema de misión de los resultados de PT1, PT2 & PT3, del sistema de comunicaciones, del sistema C2IS (BMS-VCR), junto con la extensión para el combatiente a pie (C2IS-CAP), de la información de la plataforma, de un navegador vehicular y de inhibidores.
- **e.** PT5: grupo motopropulsor: motor, caja de transmisión binaria, generación y gestión de electricidad.
- **f.** PT0: integración en plataforma: **i)** entrega de 5 demostradores (D1 – D5) en diferentes configuraciones operativas (VCR, VEC, VCOAV, VCZ) y niveles de jerarquía en la cadena de mando, junto con el demostrador de movilidad (D0) // **ii)** integración en plataforma de los resultados de los programas tecnológicos PT1 – PT5 // **iii)** integración de torres y estaciones remotas de armas (torres de 30mm, tripuladas o de control remoto dependiendo del demostrador, y RCWS mul-

tiplataforma de armas –5,56 mm, 7,62 mm, 12,7 mm, y AGL 40 mm–, así como lanzadores de ingenios multipropósito y la capacidad de defensa contra carro).

En este marco, el sistema de misión es objeto fundamentalmente de los programas PT2, PT3, PT4, y en menor medida del PT1, completando su entidad como integrador de sistema de sistemas en el PT0.

2. Desarrollo

2.1. Arquitectura general

El sistema de misión del VCR 8x8 integra los subsistemas y equipos del vehículo (ajenos a plataforma, grupo motopropulsor y sistema de generación y gestión de energía eléctrica). Su composición por capacidades operativas (movilidad, supervivencia, C4I, ISTAR, letalidad) junto con los elementos de la infraestructura necesaria, es como se muestra en la figura 1. Se basa en el estándar NGVA [Ref. 1, 2, 3], que define las reglas para la arquitectura, la infraestructura de datos, el modelo de datos, los *displays* de la tripulación, la alimentación, y la seguridad. Se apoya a su vez en estándares abiertos y de uso reconocido, como SNMP [Ref. 4], PTP [Ref. 9], NTP [Ref. 5] y H.264 [Ref. 6]. Todo ello supone una arquitectura abierta y modular, que facilita el diseño del sistema y la integración de los subsistemas, la homogeneidad en la interfaz de usuario para la tripulación independientemente del subsistema, la integración de imágenes y vídeos de diferentes sensores, tanto vehiculares como extra-vehiculares (CAP & RPAS), proporcionando una capacidad óptima de conciencia situacional, y una fácil integración de aplicaciones externas de mando y control, como TALOS o BMS.

2.2. Arquitectura de red

La infraestructura se basa en una red Ethernet redundante de doble anillo, uno HSR [Ref. 7] y otro RTSP [Ref. 8], por la que se transmiten los datos necesarios para realizar el control de los diferentes subsistemas y los correspondientes a su estado, de acuerdo a los servicios DDS, junto con los de voz IP y de vídeo digitalizado según H.264 [Ref. 6]. La red está gobernada por una política QoS que asegura la ausencia de congestión, e incluye un conjunto de *switches* inteligentes con funcionalidad completa de la capa 3 del modelo OSI, que adicionalmente a la función de encaminamiento de información implementan los *gateway* para la conversión a DDS en el caso de subsistemas no nativos. Estos *switches* son la base para que la red Ethernet disponga de tramas sincronizadas por PTP [Ref. 9]. De esta manera, se consigue un flujo estándar para toda la información de/hacia los diferentes equipos, independientemente de su funcionalidad y características. El procesado de información a nivel sistema se realiza de forma distribuida entre dos procesadores, un servidor de misión y un servidor de grabación, así como en los *displays* de la tripulación.

2.3. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario es una de las claves en los que el sistema de misión sustenta sus características de flexibilidad, estandarización y homogeneización, para conseguir la mejora operativa. Cuenta con los siguientes elementos: **a)** puesto del JV: incluye dos displays de 10" inteligentes, con un procesador embebido, acordes con el estándar NGVA [Ref. 1, 2, 3]. En ellos son presentadas, bajo control del JV, las imágenes capturadas por los sistemas de visión panorámica 360º, ayudas a la conducción y visores de la dirección de tiro, así como la información del sistema de mando y control y la de estado de los diferentes sistemas. Desde estos *displays*, y de acuerdo al estándar NGVA [Ref. 1, 2, 3], el JV realiza el control de la operación de los diferentes sistemas del vehículo, así como del reparto de información de conciencias situacional a los *displays* del tirador y de la unidad embarcada. Igualmente, en caso de que la situación táctica lo requiera, puede asumir el control de la función que realiza el tirador desde sus *displays* // **b)** puesto del tirador: incluye dos displays de 10" inteligentes, con un procesador embebido, acordes con el estándar NGVA [Ref. 1, 2, 3]. En ellos se presenta la imagen capturada por los sensores de las torres o RCWS, permitiendo al tirador el control del armamento // **c)** puesto del conductor: incluye un display de 13" inteligente, con un procesador embebido, acorde con el estándar NGVA [Ref. 1, 2, 3]. En él se presenta la imagen generada por el sistema de ayudas a la conducción,

y desde él se realiza parte del control sobre dicho sistema // **d)** displays para la unidad embarcada: varían dependiendo de la configuración del demostrador. Para el caso más estándar de VCR de infantería, se integran tres displays de 7" y uno de 13". Están destinados a la presentación de información de conciencia situacional para la unidad embarcada, realizándose bajo control del JV // **e)** adicionalmente existen puestos específicos para la operación del OAV, constando de un puesto para el jefe de equipo del OAV y otro para el operador OAV. Cada uno de estos puestos incluye un display de 10" y otro de 13", idénticos ambos a los utilizados en los puestos de tripulación. El jefe de equipo del OAV accede en su *display* de 13" a la información capturada por los sensores del sistema OAV, y en el de 10" al BMS, controlando el sistema desde ambos *displays* junto con unos mandos específicos. El operador OAV accede en su *display* de 13" igualmente a la información capturada por los sensores del sistema OAV, y en el de 10" accede al sistema TALOS, controlando el sistema desde ambos *displays* y desde unos mandos específicos igualmente.

2.4. Movilidad

El sistema de misión es clave para las capacidades de movilidad del vehículo al integrar el sistema de ayudas a la conducción. Como sensores dispone de tres cámaras IR orientadas hacia el sector delantero (una central, más dos laterales para abarcar la zona de rodadura delantera), que complementan la visión del conductor a través del sistema de periscopio. A esto se añaden dos conjuntos orientados al sector trasero, cada uno con cámaras en espectro visible e IR, dando uno de ellos la imagen de la vertical del portón. Las imágenes de estos sensores son tratadas por un procesador de vídeo específico, que integra la información resultante en la red con el objeto de ser presentada en el *display* del puesto de conductor. Como medida de seguridad, el vídeo es enviado de forma redundante desde el procesador de vídeo directamente al *display* del conductor en formato HDMI. Adicionalmente, el sistema de misión cuenta con un navegador vehicular, que incorpora tanto tecnología inercial como GPS. Los datos de posición que genera son integrados para su uso y presentación.

2.5. ISTAR

Las capacidades ISTAR del VCR 8x8 son sustentadas por la capacidad LSAS del sistema de misión, que a su vez se distribuye entre el sistema de visión panorámica 360º y el de ayudas a la conducción (ver apartado 2.4 Movilidad), junto por el sistema OAV. La capacidad LSAS proporciona a la tripulación imágenes del entorno del vehículo, tanto en espectro visible como en IR. Estas imágenes son obtenidas por el sistema de visión panorámica 360º, que tiene una cobertura completa de 360º. Son complementadas por las imágenes generadas por el sistema de ayudas a la conducción, que, adicionalmente a su uso por el conductor, son integradas junto con las del sistema de visión panorámica 360º para proporcionar al JV una visión lo más global posible del entorno. A su vez el sistema de misión permite al JV controlar, adecuándose a la situación táctica, qué imágenes del entorno son visualizadas por el tirador y la unidad embarcada.

El sistema de visión panorámica 360º dispone como sensores de once cámaras en espectro visible y otras tantas IR, de las que comparte dos de cada tipo, situadas en la parte trasera del vehículo, con el sistema de ayudas a la conducción. Las cámaras están distribuidas en el perímetro del vehículo de forma que se consigue una cobertura de 360º, incluso con ciertos solapamientos para asegurar la ausencia total de zonas muertas. Las imágenes de estos sensores son tratadas por un procesador de vídeo específico, que integra la información resultante en la red para su distribución y presentación en los diferentes *displays* bajo control del JV. En los laterales del vehículo las cámaras se agrupan en conjuntos de tres en visible y tres IR, con una cobertura de 180º. Las imágenes de cada bloque son procesadas mediante un algoritmo inteligente de *stitching* en tiempo real, que permite la generación para cada lateral de una imagen única con cobertura de 180º, tanto en visible como en IR, manteniéndose el cosido de las imágenes de partida aun en condiciones de movimiento. Adicionalmente, las imágenes capturadas por los visores de las torres o RCWS, en visible y en IR, son integradas también en la red, por lo que no solo son presentadas en los *displays* del tirador, sino que pueden ser visualizadas con total flexibilidad en otros displays bajo control del JV, completando la capacidad LSAS. Por su parte, el sistema OAV tiene como objeto la vigilancia y la localización, adquisición y designación de objetivos, así como la evaluación de daños

en apoyo al fuego de artillería. La solución implementada incorpora sensores electroópticos sobre un pedestal giro-estabilizado instalado en un mástil telescópico, junto con sensores portátiles para observatorios fuera del vehículo, teniendo capacidad de captura de imágenes tanto en espectro visible como IR. La aportación del sistema OAV a la capacidad ISTAR del sistema de misión se consigue mediante la integración con el sistema de mando y control y el de comunicaciones.

2.6. C4I: mando y control

La capacidad C4I se basa principalmente en el BMS-VCR, que cuenta con la arquitectura *software/hardware* y las *interfaces* lógicas necesarias para interoperar con el sistema de comunicación del vehículo (y el sistema OAV en su caso), así como con otros sistemas de mando y control, nacionales o aliados, entre los que se encuentran el C2IS-CAP (sistema de mando y control del VCR 8x8 para el CAP), BMS-LINCE (sistema de mando y control del ET para unidades acorazadas basadas en Leopardo 2E, y unidades mecanizadas basadas en VCI/C Pizarro), el BMS-ET (sistema de mando y control del ET para unidades ligeras hasta nivel batallón o grupo táctico), el sistema TALOS (integrado solamente en la configuración VCOAV del VCR 8x8), el sistema de mando y control AMPS, sistemas de control UAS, el sistema de mando y control SIMACET, y sistemas de mando y control de países NATO de acuerdo a los estándares NFFI y NFFT.

2.7. Comunicaciones

El sistema de comunicaciones del VCR 8x8 se integra a través de un GESCOM, integrado a su vez con el sistema de misión, utilizando la red para el envío de voz IP a los diferentes puestos de la tripulación, de la unidad embarcada, o del CAP desembarcado, independientemente del medio de comunicación empleado. Igualmente el sistema de comunicaciones integra en el sistema de misión, voz IP, datos y vídeo procedente del sistema de mando y control. Como medios de comunicación integrados en el VCR 8x8, en todos los niveles de la cadena de mando se integran para la transmisión de voz y datos una radio de combate U/VHF con forma de onda ESSOR [Ref. 10], una radio de combate VHF *legacy* PR4G de Thales en servicio en el ET y una radio personal UHF para el CAP. Adicionalmente, en todos los niveles de la cadena de mando excepto en el vehículo de combate de pelotón, se integra una conexión *wifi* segura, para comunicación de datos según 802.11. En la configuración de puesto de mando de batallón, se integran además, para la comunicación de voz y datos de larga distancia, una radio HF, un terminal SATCOM militar, en banda X, y un terminal SATCOM civil, en Banda L.

2.8. Supervivencia

Para la supervivencia del vehículo, el sistema de misión integra los siguientes equipos de protección electrónica: detector de disparos, alertador láser e inhibidores de radiofrecuencia C-IED, incluyendo la preinstalación para un futuro sistema APS.

2.9. Letalidad

El armamento del vehículo también está integrado en el sistema de misión. Las imágenes procedentes de los sensores de la torre o RCWS, tanto en rango visible como IR, son integradas en la red y contribuyen tanto a la utilización del armamento como a la conciencia situacional general. Igualmente a través de la red le llega al sistema de misión la información de estado del armamento, y son enviados a la torre o RCWS los comandos y la información necesarios para su control (aparte del control que realiza el tirador desde los mandos específicos para el apuntamiento y disparo).

2.10. Sostenimiento

El sistema de misión integra un sistema HUMS de monitorización y registro de estado y utilización de todos los subsistemas y equipos del vehículo, así como un sistema de diagnóstico SDI que informa a

la tripulación de los eventos que puedan aparecer en relación a anomalías en los sistemas y situación de consumibles (combustible, munición restante, etc.). La explotación de toda esta información, junto con las capacidades para diseminarla mediante los medios de comunicación disponibles, permitirán, utilizando tecnologías avanzadas de procesado de datos, la mejora de los procesos de sostenimiento a corto, medio y largo plazo. Igualmente, el sistema de misión permitirá una fácil integración con futuros sistemas de simulación e instrucción.

3. Listas, figuras y tablas

Lista de acrónimos y términos

1) AGL: Automatic Grenade Launcher
2) AMPS: Automatic Mission Planning System
3) APS: Active Protection System
4) BMS: Battle Management System
5) C2IS: Command, Control, Information Systems
6) C4I: Command, Control, Communications, Computers, and Intelligence
7) CAP: Combatiente a Pie
8) CIS: Communication and Information Systems
9) C-IED: Counter Improvised Explosive Devices
10) DDS: Data Distribution Service
11) DGAM: Dirección General de Armamento y Material
12) ESSOR: European Secure Software Defined Radio
13) ET: Ejército de Tierra
14) FFTS: Friendly Force Tracking System
15) GDELS-SBS: General Dynamics European Land Systems – Santa Bárbara Sistemas
16) GESCOM: Gestor de Comunicaciones
17) HMI: Human Machine Interface
18) HSR: High-availability Seamless Redundancy
19) HUMS: Health and Usage Monitoring System
20) IDT: Interfaz de Datos Tácticos
21) Indra: Indra Sistemas S.A.
22) IR: Infrarrojos
23) ISTAR: Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance
24) JV: Jefe de Vehículo
25) LSAS: Local Situational Awareness System
26) NATO: North Atlantic Treaty Organization
27) NFFI: NATO Friendly Force Information
28) NGVA: NATO Generic Vehicle Architecture (STANAG 4754)
29) NTP: Network Time Protocol
30) OAV: Observador Avanzado.
31) OSI: Open System Interconnection Model
32) PDU: Power Distribution Unit
33) PT: Programa Tecnológico
34) PTP: Precision Time Protocol

35) QoS: Quality of Service
36) RCWS: Remotely Controlled Weapon Station
37) RPAS: Remotely Piloted Aircraft Systems
38) RPG: Rocket Propelled Grenade
39) RTSP: Real Time Streaming Protocol
40) SAPA: SAPA Placencia
41) SDI: Sistema de Diagnóstico Integrado
42) SIMACET: Sistema de Mando y Control del Ejército de Tierra para puestos de mando de grandes unidades (Brigada y superior).
43) SNMP: Simple Network Management Protocol
44) STANAG: Standardization Agreement
45) TALOS: Sistema de GMV para la Gestión y Control de Fuegos de Artillería y Morteros
46) UAS: Sistema para el control de Sistemas Aéreos No Tripulados
47) UTE: Unión Temporal de Empresas
48) VCI/C: Vehículo de Combate de Infantería/Caballería
49) VCOAV: Vehículo de Combate para Observador Avanzado
50) VCR: Vehículo de Combate sobre Ruedas
51) VCZ: Vehículo de Combate de Zapadores
52) VEC: Vehículo de Exploración de Caballería.

Figuras

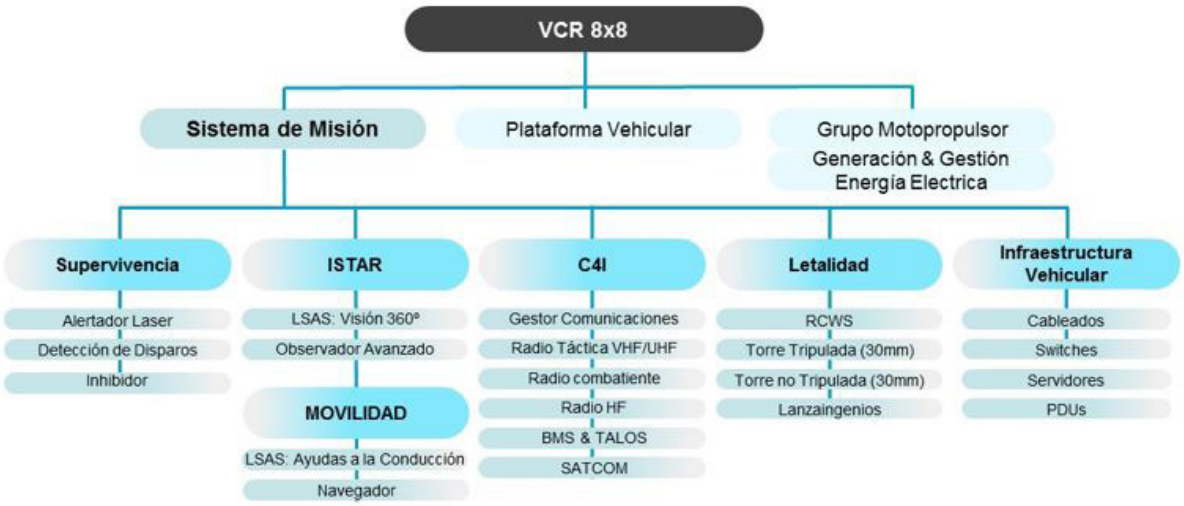


Figura 1. Sistema de Misión del VCR 8x8: composición.

4. Resultados y discusión

Los resultados del Programa VCR 8x8, y por tanto del sistema de misión, serán valorados en toda su extensión durante la fase de verificación del Programa, y especialmente en la evaluación operativa a realizar por el ET. En cualquier caso, la exigente metodología de ingeniería de sistemas y de gestión de proyectos bajo la cual se está ejecutando el Programa permite esperar una consecución positiva de los requisitos y objetivos marcados.

5. Conclusiones

El sistema de misión sustenta el principal valor añadido del VCR 8x8 para el ET, ya que introduce importantes mejoras operacionales tales como: **a)** facilidad de operación del vehículo de combate mediante la gestión homogénea de todos sus subsistemas, incluido armamento, acompañado de una mejora en la gestión de la situación táctica con una óptima conciencia situacional para la tripulación y la unidad embarcada, **b)** flexibilidad para hacer frente a futuras necesidades al poder integrar con facilidad nuevas capacidades, bien con subsistemas adicionales o bien reemplazando alguno previamente existente, todo lo cual permite a su vez una gestión de obsolescencias altamente eficiente, **c)** capacidad para monitorizar, registrar, procesar y diseminar información clave para el mantenimiento y el sostenimiento durante el ciclo de vida, lo cual supone una mejora de todos los procesos de sostenimiento en el corto, medio y largo plazo. Estas características hacen del sistema de misión de Indra para el VCR 8x8 una referencia para cualquier vehículo blindado o acorazado.

Agradecimientos

A los equipos de trabajo de todas las organizaciones que hacen posible este interesante Programa.

Referencias

1. *STANAG 4754, NATO GENERIC VEHICLE ARCHITECTURE (NGVA) FOR LAND SYSTEM (AEP 4754 Ed A). NATO: NSO. En proceso de ratificación por las Naciones. Información disponible en: https://natogva.org/*
2. *Study on a European Reference Open Architecture Standard for a modern Integrated Electronic Mission System in Military Land Vehicles (LAVOSAR II). Agencia Europea de Defensa (EDA). Información disponible en: https://www.eda.europa.eu/*
3. *Study on a Land Vehicle with Open System Architecture (LAVOSAR I). Agencia Europea de Defensa (EDA). Información disponible en: https://www.eda.europa.eu/*
4. *SNMP Protocol. Internet Engineering Task Force (IETF): Network Working Group. Información disponible en: http://www.snmp.com/protocol/*
5. *NTP Protocol. Internet Engineering Task Force (IETF): Network Working Group. Información disponible en: http://www.ietf.org/rfc/rfc1305.txt*
6. *Norma H.264: ITU-T Video Coding Experts Group (VCEG) & ISO/IEC Moving Picture Experts Group (MPEG). Información disponible en: https://www.itu.int/rec/T-REC-H.264/es*
7. *HSR Protocol (IEC 62439-3 Standard). IEC. Información disponible en https://webstore.iec.ch/publication/24447*
8. *RTSP Protocol. Internet Engineering Task Force (IETF): Network Working Group. Información disponible en: http://www.ietf.org/rfc/rfc2326.txt*
9. *IEEE 1588-2008 - IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. IEEE: PNCS - Precise Networked Clock Synchronization Working Group. Información disponible en https://standards.ieee.org/standard/1588-2008.html*
10. *ESSOR (European Secure Software Defined Radio) Programme. OCCAR: OCCAR-EA ESSOR Programme Division. Información disponible en: https://www.occar.int/programmes/essor*

3€. Plataformas navales

Buques inteligentes «sin tripulación»: adecuación de la normativa actual

Villa Caro, Raúl[1]

[1] Fundación para el fomento del conocimiento de la construcción naval y de las actividades marítimas (EXPONAV), Cantón de Molins s/n (Ferrol); email: rvilcar@exponav.org (RVC).

Resumen

El «Reglamento para prevenir los abordajes en la mar», o el convenio de «Guardias de mar SCTW» marcan las exigencias que deben cumplir en la actualidad las dotaciones y los buques para poder navegar por mares y océanos. Por ello, la llegada de los *smart ships*, los buques inteligentes sin tripulación, provocará, si se produce esa llegada, un fuerte impacto en el sector marítimo. Todos estos cambios exigirán realizar una gran re-adaptación de toda la normativa al respecto existente para poder fijar nuevas regulaciones que recojan la nueva filosofía de este tipo de buques. Por ello, las sociedades de clasificación deberán establecer nuevas normas para el diseño, construcción y mantenimiento de los nuevos buques autónomos, y por supuesto la OMI (Organización Marítima Internacional) y la IALA (Asociación Internacional de Ayudas a la Navegación Marítima y Autoridades de Faros) deberán ajustar toda su legislación a las nuevas necesidades. Los nuevos buques podrían suponer una reducción de costes para los armadores, pero seguro que se encontrarán con el enfrentamiento de muchos sectores del mundo marítimo. Por todo lo citado con anterioridad en este trabajo se pretende llevar a cabo un análisis de todos los factores que se deberían tener en cuenta y evaluar para llevar a cabo la adaptación de la nueva filosofía de buques «sin tripulación» a la reglamentación de buques existente en la actualidad.

Palabras clave

Buque, inteligente, sin tripulación, OMI.

1. Introducción

Para llegar a buen puerto en la singladura de la adecuación de la reglamentación marítima existente a los nuevos buques inteligentes y autónomos del futuro, se debe partir de una premisa fundamental, que consiste en que debe existir una clara y concisa definición de qué es un buque inteligente y autónomo. Por ello la Organización Marítima Internacional (OMI) ha bautizado a estos nuevos buques con las siglas MASS (*Maritime Autonomous Surface Ship*), y los ha clasificado en varios tipos dependiendo del grado de autonomía que posean. De esta forma existirán barcos autónomos e inteligentes tripulados parcialmente (con algunas operaciones en remoto) y barcos que serán completamente autónomos. Además, sin necesidad de que todo tenga que ser blanco o negro, se distinguirán diferentes grados de autonomía, dependiendo del grado de automatización de los buques. De esta forma tendremos buques inteligentes totalmente tripulados (similares a algunos de los barcos actuales ya existentes), buques parcialmente tripulados (con parte de su personal a bordo, y parte en tierra, operando en remoto, distinguiéndose diferentes niveles de automatización en función del grado de intervención humana requerido), y buques totalmente autónomos e inteligentes que se guiarán mediante algoritmos de programas de inteligencia artificial previamente definidos [1].

Algunas empresas y sociedades de clasificación (SSCC), como Bureau Veritas, DNV, o Lloyd's Register, ya han elaborado reglamentos para certificar la categoría MASS de estos buques, y han clasificado a los barcos en categorías dependiendo de su grado de autonomía y del porcentaje de intervención humana necesaria en ellos. Hay que tener en cuenta que la ausencia de la intervención humana tendrá su responsabilidad sobre el capitán, esté presente físicamente, o esté en remoto y a distancia, por lo que se debe llevar a cabo una intensa investigación para confirmar que la reducción de la tripulación será ventajosa para la seguridad humana y del medio ambiente. Además, a nivel de legislación nacional e internacional, se debe partir del hecho de que las tareas de seguridad del buque, se relacionan con las «buenas prácticas marineras» y con «el ojo marinero (el criterio de los marinos)» y por lo tanto con la presencia física de los tripulantes a bordo de los buques [2] [3].

A este respecto ya existen varios proyectos internacionales que han estudiado los MASS y la posibilidad de que naveguen a corto y medio plazo por nuestros mares (al menos por aguas restringidas y confinadas). Por un lado destaca el Proyecto MUNIN (*Maritime Unmanned Navigation trough Intelligence in Networks*), cofinanciado por la Comisión Europea, referente a objetivos concretos, y que finalizó el pasado junio de 2017. Este proyecto se ha dedicado a documentar y recopilar toda la información existente referente al cambio que exigirá la legislación marítima para poder adaptarse a la llegada de los MASS y poder de esta forma autorizar la navegación de los buques autónomos y no tripulados. Esta adaptación de la legislación obviamente deberá asegurar que los nuevos MASS posean el mismo grado de seguridad que los buques convencionales actuales [4].

Y por otro lado, y en lo referente a proyectos pioneros, se debe remarcar la iniciativa «AAWA» (*Advanced Autonomous Waterborne Applications*), proyecto liderado por la Agencia de Innovación de Finlandia (Tekes), junto con diferentes universidades de dicho país y la empresa Rolls-Royce. Esta iniciativa tiene la meta de conseguir que se pueda llevar a cabo la navega-

ción remota y autónoma (capitán virtual), de forma que los buques puedan navegar siendo operados, manejados, y controlados a distancia, desde estaciones de control en tierra. El capitán virtual será un oficial que deberá llevar a cabo las maniobras de atraque y desatraque del buque desde un puesto en tierra, y tendrá un puesto que todavía deberá ser muy desarrollado para poder adaptarse a las circunstancias especiales que rodean la vida de los barcos, tanto en los puertos como en la mar [5].

Figura 1. Capitán virtual (fuente: Rolls-Royce).

A nivel nacional se podría destacar en nuestro país el prototipo liderado por «Industrias Ferri» de Vigo. Consiste en un vehículo autónomo no tripulado, denominado «Victoria». Se trata de una embarcación de cinco toneladas de desplazamiento, doce metros de eslora y dos motores de 300 CV que le permiten alcanzar velocidades superiores a 50 nudos. Este buque nace de la colaboración entre la empresa Ferri y la Universidad de Vigo, socio en el desarrollo del *software* que posee el buque, y que sería adaptable a otro tipo de embarcaciones. La Victoria, que podría navegar tanto en remoto, como de forma autónoma, sería una buena solución para entornos *off-shore*, apoyando por ejemplo a parques eólicos, o incluso realizando misiones de patrulla y vigilancia. El prototipo de Ferri dispone de un sistema inteligente de navegación que trabaja bajo un ordenador industrial y genera la ruta idónea, obviamente libre de obstáculos, gracias a la información recibida de los diferentes sensores (AIS, radar, LIDAR, etc.). Esta ruta permite a la embarcación alcanzar el punto de destino, y siempre cumpliendo con las reglas de navegación que marca el reglamento de abordajes. Para ello el sistema corrige de forma automática la ruta en base a la información que va recibiendo de los diferentes sensores, sin necesidad de ninguna acción exterior. En cuanto al punto de destino, este puede ser un punto fijo, o un objetivo móvil, pudiendo el sistema desarrollar distintas funciones. Entre ellas se podrían destacar las de alcanzar el punto de destino, el seguimiento de un objeto en movimiento o el mantenimiento de la posición mediante navegación en círculos alrededor de un punto de destino, por ejemplo para casos de patrulla, combate o rescate. Además el buque cuenta con una cubierta diáfana que le convierte en una plataforma ideal para el trasporte de todo tipo de elementos y de equipos auxiliares. Por último destacar que la «Victoria» dispone de un PLC (*Beckhoff*) para el control de los sistemas del barco (servo y propulsión) que comunica estos sistemas directamente con el ordenador industrial. Este PLC posee capacidad adicional para poder controlar nuevos sistemas o equipos que se quieran instalar a bordo, y además, como ya se ha citado con anterioridad, cuenta con la posibilidad de poder conectarse a un sistema de control en tierra para controlar la embarcación a distancia y en remoto.

Figura 2. Victoria (fuente: Ferri).

2. Modificaciones al Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes (RIPPA) y al Convenio de Guardias de Mar (STCW)

La regla 2 del RIPPA referente a responsabilidad, otorga primacía al criterio del capitán al mando del buque, indicando que ninguna disposición del reglamento le eximirá de las consecuencias de cualquier negligencia en el cumplimiento del mismo, o de negligencias en observar cualquier precaución que pudiera exigir la práctica normal del marino. Por ello, la circunstancia de que el buque no esté tripulado obliga a redefinir la figura del capitán, y de su responsabilidad, debiéndose determinar quién será el responsable último del buque en el caso de los MASS [6].

Por otro lado, la regla 5, referente a la vigilancia, indica que los buques deben mantener en todo momento una eficaz vigilancia visual y auditiva, utilizando todos los medios de que dispongan para evaluar el posible riesgo de abordaje.

Observando las reglas anteriores vemos que el RIPPA focaliza muchas de las operaciones de los buques en base a lo que se denominan «buenas prácticas marineras», que parece que tienen que estar basadas en la supervisión de personas físicas a bordo de los buques. Y por otro lado tenemos el concepto de «gente de mar», de acuerdo con el convenio STCW (Convenio de Guardias de Mar) y con el convenio SOLAS (Convenio de seguridad de la vida humana en la mar), concepto que de acuerdo con ambos convenios parece difícil que sirva para equiparar a los operadores de los MASS en tierra con los tripulantes a bordo de los buques convencionales. Por todo ello parece difícil que se puedan trasladar las responsabilidades y obligaciones actualmente aplicables a los tripulantes de los buques convencionales, y en concreto a su capitán, a los operadores de los MASS en tierra. Como ejemplo se podría destacar el de los daños a la mercancía a bordo: ¿se podría culpar a los operadores de los MASS en tierra de daños a bordo?, ¿existiría alguna forma de exonerar de responsabilidad al porteador?

Cuantas más y más vueltas se da a toda la legislación internacional existente referente a los buques, siempre se llega a la conclusión de que toda la reglamentación está redactada bajo la óptica de que los buques se encontrarán tripulados físicamente, independientemente de que no esté redactado de forma expresa ese punto en todos los reglamentos. En cualquier caso, sí que existen muchas normas que exigen expresamente personas físicas embarcadas, tanto desde el punto de vista del ámbito del derecho inter-

nacional del mar, como del punto de vista de la seguridad de la vida humana en la mar (SOLAS, que establece las tripulaciones mínimas de seguridad), como desde el punto de vista laboral (el STCW exige que las guardias de puente sean presenciales) [7].

Y a todas estas incógnitas habrá que sumar la de la legislación referente a los pabellones de conveniencia que se caracterizan por poseer una legislación más relajada en materia de formación y condiciones de trabajo de los operadores. Si sus normas se amplían a los operadores terrestres, podría llegar a comprometerse la seguridad de los MASS.

Por último destacar que no se debe olvidar que el hecho de que un buque no esté tripulado, no exonera al capitán o armador de tener que cumplir la prestación comprometida (transportar la mercancía, el pasaje, un remolque, etcétera). Hay que recordar que la persona que asuma esa obligación deberá responder del perfecto cumplimiento de lo acordado (custodia de la mercancía, entrega en destino, entrega en plazo, etcétera), y el derecho dispondrá de soluciones para atribuirle la responsabilidad que le corresponda, independientemente de que se trate de buques autónomos [5].

3. El factor humano como causa de los accidentes marítimos. Causas que inducen el error humano

El factor humano en general y el error humano en particular son responsables de gran parte de los accidentes marítimos que se producen. Por ello la OMI a lo largo de su historia no ha sido ajena al problema de la seguridad humana en la mar. El Convenio Internacional de la OMI sobre Normas de Formación, Titulación y Guardias para la gente de mar (STCW 1978) fue el primer convenio acordado internacionalmente para abordar la cuestión de las normas mínimas de competencia aplicables a los marinos. En 1995, el Convenio STCW fue completamente revisado y actualizado para establecer mecanismos eficaces para la aplicación de sus disposiciones. La resolución reconoce la necesidad de una mayor atención en las actividades relacionadas con el hombre y la seguridad operacional del buque y la necesidad de alcanzar y mantener un alto nivel de seguridad y protección del medio ambiente con el fin de reducir los siniestros marítimos. La idea principal de este convenio es resolver los problemas relacionados con el factor humano para aumentar la eficiencia y así mejorar la seguridad y la protección marítima y la calidad del medio marino [8].

Este convenio, para cumplir su meta de reducción de accidentes, debe exigir que las reglas que afecten directamente a la gente de mar deban ser simples, concisas y completas, buscando promover y difundir una cultura de seguridad marítima y de protección del medio marino.

Siendo ya conocedores de la relevancia del factor humano en los accidentes marítimos, para conseguir avances en la prevención de estos, se debe considerar de vital importancia el poder elaborar una lista completa de las causas que inducen a los tripulantes a cometer errores. Hasta hace poco tiempo la mayor parte de estos errores eran calificados como «errores humanos», pero a fecha actual, y partiendo de la base de que las normas de seguridad deben estar correctamente establecidas, cualquier desviación de las mismas que se produzca, y con las nuevas tecnologías, conducirá al infractor a una zona de mayor riesgo en la que será más probable que se produzcan daños mayores.

En cualquier caso las infracciones a las normas de seguridad en el trabajo no solo se deben a actitudes de dejadez de quienes ejecutan las operaciones, sino también a infracciones deliberadas que subyacen bajo la psicología de las personas que están en contacto con el riesgo.

Finalmente, en el análisis de las causas que influencian el error humano, destaca la falta de habilidad, pericia y conocimiento, la personalidad (condiciones mentales, estados emocionales), la asignación de tareas en el momento del accidente, la condición física (ausencia de drogas, alcohol y fatiga), las condiciones de la mar, y la densidad de tráfico de buques.

4. Código de protección del buque y las instalaciones portuarias (código PBIB)

El código PBIB nace con el objetivo de establecer un marco internacional que canalice la cooperación entre Gobiernos y sectores navieros y portuarios a fin de detectar las amenazas marítimas para poder

adoptar medidas preventivas contra los sucesos que afecten a la protección de los buques o instalaciones portuarias. Para ello debe ofrecer una metodología para efectuar evaluaciones de la protección a fin de contar con planes y procedimientos que permitan reaccionar a los cambios en los niveles de protección, y a la vez garantizar la confianza de que se cuenta con medidas de protección marítima adecuadas y proporcionadas.

En concreto, el capítulo 7 del código PBIB analiza los sistemas de control de la actividad del buque y de su dotación basados en la protección y la seguridad. Para ello presenta tres aspectos críticos: el primero, económico; el segundo, de interpretación de las normas; y el tercero, el de imponer severas limitaciones a las salidas de la tripulación del buque y a las entradas de familiares y amigos ajenos a la tripulación. Además la investigación en seguridad marítima se plantea sobre dos modelos: la teoría de los accidentes, y la teoría del análisis de riesgos.

En definitiva, el código internacional para la protección de los buques y de las instalaciones portuarias, juega un papel fundamental para la prevención y control de actos terroristas que se podrían ejecutar en el futuro (tomando como ejemplo lo sucedido en el 20-S). Por todo ello habrá que estudiar con mucho detalle cómo se acondiciona el contenido de este código, a la llegada de los buques MASS sin tripulación, y qué estudios y formación se exige a los nuevos oficiales de los MASS [9].

5. Conclusiones

Las actuaciones derivadas del estudio del factor humano en la actualidad tratan de conseguir una mejor adecuación entre las personas y el ambiente en el que estas viven y trabajan. Esta labor adquiere gran relevancia en el sector marítimo, debido al riesgo inherente que genera la actividad marina. No cabe duda de que si esta tarea se lleva a cabo de manera efectiva supondrá un efecto positivo sobre la seguridad marítima y contribuirá a que se reduzcan los errores y los accidentes. El error humano directa o indirectamente, contribuye a la mayoría de los accidentes marítimos, derivándose de este hecho que la prevención del error humano es de vital importancia para reducir su número e impacto. En cualquier caso hay que tener en cuenta que muchos de los denominados errores humanos, a veces también dependen de la tecnología, por lo que también habrá que estudiar y evaluar que el aumento de la tecnología no vaya a desembocar en un aumento de los accidentes. Se deben diseñar equipos que apoyen a los tripulantes, o incluso les sustituyan, pero siempre sin olvidar que la meta final de los MASS debe ser la búsqueda de la seguridad de los tripulantes y del medio ambiente.

En la actualidad existen más de 65.000 buques mercantes navegando por los océanos del mundo, cifra a la que hay que añadir un número superior de buques pesqueros y un sinfín de embarcaciones de recreo (en España están matriculadas más de 200.000 embarcaciones). Indudablemente la mayor parte de esas embarcaciones nunca llegarán a la categoría de MASS, pero está claro que existe un crédito suficiente de buques como para tomarse muy en serio lo de la adecuación de la legislación internacional marítima existente a la llegada de los buques autónomos.

Evidentemente la llegada de los MASS debe producirse de una manera gradual. Seguramente primero aparezcan los buques parcialmente autónomos, para gradualmente ir avanzando hacia buques con mayor grado de automatización y autonomía, hasta llegar a los buques totalmente autónomos. Con ello es probable que poco a poco se vayan desplazando las tareas de las guardias de mar del personal de los buques, a los capitanes virtuales de las estaciones en tierra.

En cualquier caso todavía quedan muchas millas por navegar hasta que se alcance el grado de autonomía total, ya que el camino que debe seguir la adaptación de la legislación se presenta lento, complejo y farragoso.

Por otro lado tenemos el interrogante de si realmente son necesarios los MASS, referido a si la llegada de estos buques autónomos va a traer más ventajas que inconvenientes. Respecto a este punto, lo que está claro es que dejando de lado las posibles ventajas económicas que puedan existir, uno de los puntos más importantes y fuertes que estos MASS deben poseer, es el de la seguridad, tanto de personas como del medio ambiente.

Desde el punto de las responsabilidades, habrá que ver cómo se modifica la legislación para adaptar las responsabilidades del capitán al nuevo escenario de los MASS. Hay que tener en cuenta que a los MASS, aunque no vayan tripulados, se les exigirá lo mismo que al resto de buques convencionales.

Tampoco debemos olvidarnos del código PBIP, y de todos los planes de protección que exige, que a primera vista parece que va a chocar con la realidad de los buques MASS sin tripulación, manejados en remoto o totalmente autónomos.

Para finalizar estas conclusiones se podría remarcar que la tecnología necesaria para que los MASS naveguen, ya existe, pero no así la legislación necesaria para que esas singladuras se puedan llevar a cabo. Por lo tanto la llegada de buques completamente autónomos, controlados mediante algoritmos de inteligencia artificial, aun parece lejano, al menos en aguas transitadas por otros buques.

Referencias

1. *Bureau Veritas; Guidelines for Autonomous Shipping. Diciembre de 2017.*
2. *Lloyd´s Register; Unmanned Marine Systems Code. Febrero de 2017.*
3. *Cordero, M. (2017). Autonomía marítima: objetivo de las regulaciones. Recalada, 18-19.*
4. *MUNIN . (2016). MUNIN Project . Obtenido de http://www.unmanned-ship.org/munin/*
5. *Corte, J. d. (2017). Retos legales de la operativa de los buques autónomos. Recalada, 20-24.*
6. *Organización Marítima Internacional . (1972). Reglamento internacional para prevenir abordajes (COLREG). OMI.*
7. *Cruz, E. (2017). Buques autónomos: ha comenzado su regulación. Recalada, 9-11.*
8. *Filgueira, J. J. (2017). La tecnología que viene ¿acabará con el empleo en la mar? Recalada, 6-8.*
9. *Uriarte, J. I. (2017). Enseñanzas náuticas y los proyectos de buques autónomos. Recalada, 12-14.*

Control de los tráficos marítimos de contenedores a través del análisis de datos

Velasco Tuduri, Santiago

Capitán de fragata, Subdirección General de Cooperación y Defensa Civil, Dirección General de Política de Defensa, Ministerio de Defensa; sveltud@fn.mde.es: (SVT).

Resumen

El gran volumen de contenedores desplegados en el comercio marítimo mundial dificulta su control. Esta falta de control facilita que se recurra a este medio para el transporte de tráficos ilícitos, incluidos material de doble uso, o incluso armas de destrucción masiva.

El control de contenedores, a través de unos estándares de seguridad apropiados sin menoscabo de las necesidades de la cadena logística, es uno de los principales desafíos de la Estrategia Nacional de Seguridad Marítima.

Actualmente, con los medios existentes en los puertos (escáneres, inspecciones) solamente es posible controlar un pequeño porcentaje de los contenedores. Esta circunstancia supone un grave riesgo para la seguridad.

La solución que se propone en este artículo, para minorar el riesgo mencionado, es usar el análisis de datos para detectar, con una aproximación suficientemente válida, contenedores que pudieran suponer una amenaza y, además hacerlo en alta mar, sin esperar a que lleguen a puerto. Buques de la Armada realizan operaciones de seguridad marítima, tanto en el ámbito de la UE como de la OTAN, por lo que podrían realizar vigilancia sobre los tráficos que así se determinasen.

La tecnología a utilizar es el *big data* y la inteligencia artificial. Se trata de poner en valor los datos relacionados con los cargos marítimos que se puedan obtener a través de agencias oficiales, agentes, usuarios, fuentes abiertas y otros.

A través de la recopilación, integración, procesamiento y análisis predictivo de datos, de carácter marítimo y otros, que pudieran estar asociados a riesgos de cargos concretos, se obtienen perfiles gradados en función del riesgo por contenedor. Los contenedores que pasen de un umbral de riesgo establecido serán los que deberán ser sometidos a una vigilancia ya desde la alta mar.

Palabras clave

Control contenedores marítimos, big data e inteligencia artificial, gradación riesgo.

1. Introducción

Los datos son un recurso estratégico, que en muchos casos no se utilizan más allá de la gestión para la que son utilizados en determinados procesos, renunciando de esta manera a poner en valor los datos en relación con la seguridad.

El ámbito marítimo no es ajeno a esta situación y, concretamente, los aspectos que pueden afectar a la seguridad nacional y de nuestros aliados en el transporte marítimo por contenedor.

Se trata de determinar, a través de un sistema, basado principalmente en el análisis de datos, que probabilidad existe de que un contenedor marítimo contenga material que pueda afectar a la seguridad nacional. Al sistema se le denomina, para el propósito de este artículo Sistema automático de Riesgo Probable que Encierra un Contenedor (SARPEC).

El sistema que se pretende trabajaría, con una gran analogía, a lo que en las Fuerzas Armadas se denomina ciclo de inteligencia: obtención; análisis; evaluación.

2. Desarrollo

2.1. La localización de datos (obtención)

El primer paso es localizar dóinde están los datos que interesan al sistema, es decir, qué datos, tanto en el entorno marítimo, donde se mueven los contenedores, como fuera de ese entorno, que están relacionados con aspectos ligados a la seguridad y el control de tráficos ilícitos, se pueden usar para alimentar al sistema.

Esta localización de datos, es la base del funcionamiento del sistema automático de riesgo probable que encierra un contenedor.

Es necesario el conocimiento del entorno, marítimo y de seguridad, en el que se mueven los contenedores para poder localizar estos datos.

En una analogía con la inteligencia en una operación como antipiratería, cuyo escenario era bastante desconocido cuando se comenzó la operación ATALANTA, había que ir conociendo el entorno de la piratería, para saber qué datos buscar y dónde y cómo encontrarlos para alimentar la base de datos. A su vez los datos que se recogían aumentaban el conocimiento del entorno que, asimismo, ayudaba a aumentar el espectro de datos a buscar.

Por lo tanto, y volviendo a los contenedores, a medida que este proceso de localización crezca, mayor serán la cantidad de datos que puedan introducirse en el sistema y, por tanto, mayor será la eficacia.

A su vez, en similitud con lo referido para la operación ATALANTA, la localización de datos en el SARPEC es un proceso que se considera abierto por la complejidad del entorno marítimo, así como de los aspectos ligados a la seguridad y control de tráficos, al tratarse estos en un marco global. El conocimiento del entorno, necesario para la localización de datos, se realimenta con estos que, a su vez, generará nuevas líneas de acción para localizar más datos, y así sucesivamente.

En este artículo se relacionan unos datos, que podrían considerarse como una base, como mera indicación, del comienzo de este proceso de localización de datos.

2.1.1. Datos marítimos

Datos relacionados directamente con los contenedores o con el tráfico marítimo.

Si se analiza el movimiento de un contenedor, este tiene cinco tramos fundamentales: 1.- desde el lugar de carga al puerto/zona logística; 2.- movimientos en el puerto/zona logística; 3.- movimientos en la mar; 4.- movimientos en el puerto; 5.- puerto/zona logística descarga.

En lo que se refiere a puertos/zonas logísticas

Para todos los tramos si exceptuamos el 3.- (tramo en la mar), podría ser válido:

- Existen 250 puertos aproximadamente en el mundo que muevan portacontenedores.
- Un movimiento de exportación en un puerto español exige una serie de documentos (facturas comerciales, listas de contenido, conocimiento de embarque marítimo, carta de porte, Documento Único Aduanero, tránsito, etc.), emitidos por diferentes agentes (exportador, transitario, línea marítima, aduana, etc.), que deberían formar parte de los datos que un sistema de control de contenedores marítimos como el que se propone, necesita. Lo que se puede hacer extensivo a cualquier otro puerto del mundo.
- Al estar muchos puertos hoy en día informatizados, los datos mencionados existen, y se usan puntualmente en la gestión portuaria. Faltaría poner en valor esos datos, y otros que pudieran determinarse, más allá de la propia gestión portuaria, para el propósito del SARPEC.

Un ejemplo de gestión portuaria a través del uso de datos, puede ser lo que hace la empresa norteamericana NTELX en el puerto de *Aqaba* (Jordania), para la gestión del flujo de camiones (a través de un sistema denominado NAFITH TCS de análisis de datos).

A través de NAFITH TCS se tratan gran cantidad de datos de diferentes agentes (aduanas, transportistas, Gobierno jordano, operadores del puerto, etc.) que se usan para la gestión ordenada del flujo de camiones. Ver figura 1.

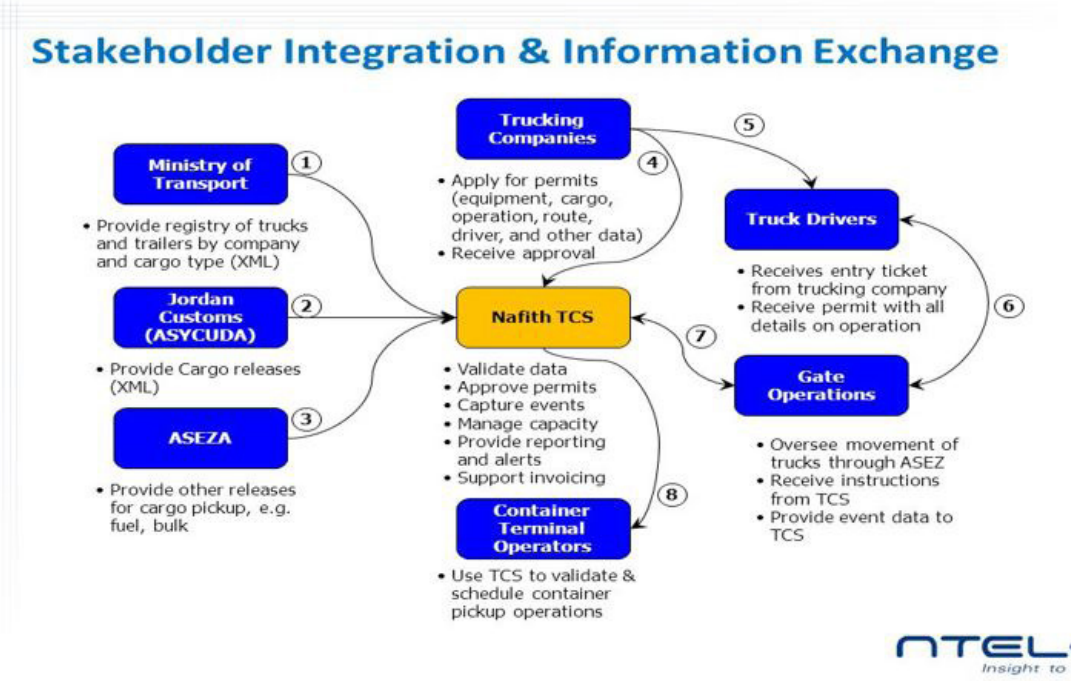


Figura 1. ASEZA es el equivalente a la autoridad portuaria; NAFITH es una empresa jordano-americana subsidiaria de NTELX; TCS son las siglas para Truck Control System. Sistema de control de tráfico de camiones, basado en un modelo predictivo por software que combina el análisis de diferentes datos para, a través de algoritmos, predecir la disponibilidad de capacidad de las infraestructuras y establecer rutas y horas de entrada para los diferentes camiones que solicitan un servicio en el sistema.

Los datos usados en este caso concreto para mejorar la eficiencia portuaria, a través del control del flujo de camiones, podrían ser perfectamente válidos, como parte de los datos para alimentar el sistema como el que se propone en este artículo.

NTELX es solo un ejemplo que puede ayudar a ilustrar lo que se puede hacer, con procesos que ya existen en diferentes puertos para la mejora de la eficiencia portuaria, y cuyos datos podrían aprovecharse para aumentar el control del tráfico marítimo de contenedores.

Por lo tanto, en la localización de datos del SARPEC, se deberían incluir los procesos en los puertos que a través de análisis de datos (en su defecto sistemas automáticos de gestión) mejoran la eficiencia portuaria. Además, en la medida de lo posible se debería fomentar la existencia de estos procesos, que son positivos tanto para la gestión portuaria como para la seguridad.

No solamente eso, si no que se deberían fomentar procesos de gestión más allá de la zona portuaria, de forma que tuvieran en cuenta a todos los agentes de la cadena logística, incluyendo la industria y las operaciones en los diferentes tramos de la cadena hasta llegar al puerto[1].

En lo que se refiere a movimientos en la mar

Un barco, al contrario de lo que le ocurre a una aeronave, navega libremente por la mar, así como una aeronave hace un plan de vuelo antes de despegar, un barco no hace plan de navegación, antes de salir a la mar. Esto implica que el tránsito entre dos puertos también es un riesgo a la seguridad, ya que no se conocen sus movimientos de antemano. Por lo tanto, es necesario introducir en nuestro modelo las variables que nos indiquen los movimientos del buque.

En consecuencia, uno de los ámbitos de la localización de datos, debe ser los movimientos de los buques. El movimiento de un barco en la mar puede ser controlado a través de datos:

- AIS, sistema que da la identificación del buque con rumbo y velocidad de manera automática. La transmisión está ligada a un sistema de satélites. Los datos se pueden obtener comercialmente.
- Estaciones de control marítimo, como el que existe en Tarifa y en Tánger, desde donde se controla el tránsito de buques por el estrecho de Gibraltar. Existen otras estaciones en el mundo.
- Aseguradoras, que en función de la ruta que siga el barco le cargarán más en el seguro o no. Es el caso de la piratería en la zona de Somalia, que por el hecho de que un barco tenga previsto pasar por esa zona el seguro automáticamente aumenta.
- Centros de control marítimo, como el que ha establecido la Unión Europea en la zona del Cuerno de África en apoyo a la operación Atalanta contra la piratería. Donde se da información comercial de los buques que transitan por la zona.
- Y otros que irán apareciendo a medida que vaya aumentando el conocimiento del proceso que se ha denominado «localización de datos».

Además, hay que tener en cuenta que también se pueden localizar datos en la industria y negocios ligados al transporte marítimo

Existen cinco compañías (líneas marítimas) portacontenedores que mueven el 43 % aproximadamente de las toneladas que se transportan por contenedor en el mundo[2].

Existen compañías aseguradoras, como la británica *Lloyds* que está presente en la mayoría de los puertos del mundo, incluidos los chinos.

---

1 En marzo de 2016, el *Think Tank Stimson Center,* con sede en Washington, puso en marcha su plataforma para un comercio seguro y eficiente (STEP por sus siglas en inglés) en el puerto de *Kigstom*, Jamaica, con la colaboración de la empresa norteamericana NTELX, el Instituto Marítimo Caribeño, y el programa de Naciones Unidas de implementación de la resolución 1540 para la región del Caribe. En Jamaica, STEP estudió la cadena logística relacionada con la exportación/importación de materiales peligrosos designados como precursores químicos de doble uso.

2 La italiana MSC, la danesa MAERSK, la francesa CMA, la taiwanesa Evergreen y la china COSCO. Además estas compañías poseen más de una cuarta parte del total de buques portacontenedores del mundo.

Además, se puede acceder a información de carácter marítimo relacionado con el tráfico de contenedores a través de diferentes redes, en forma de páginas web especializadas, etc.

También, se podrían localizar datos en programas y sistemas de Naciones Unidas

El sistema de información integrada de tráfico de la Organización Marítima Internacional (IMO por sus siglas en inglés), proporciona:

- Búsqueda de buques y compañías por número IMO.
- Información recibida de miembros de la IMO acerca de contenedores y mercancías peligrosas.
- Seguimiento de larga distancia (LRIT por sus siglas en inglés).

Además, existen programas de Naciones Unidas que también pueden proporcionar datos, como el programa de control de contenedores y el programa mundial contra los delitos marítimos.

2.1.2. Datos no relacionados directamente con el entorno marítimo

También, si bien no están directamente relacionados con el entorno marítimo, existen otros datos que pertenecen a agencias internacionales que deberían también tenerse en cuenta en el sistema:

- UNODC (*United Nations on Drug and Crime*), datos sobre rutas de tráficos ilícitos.
- Convención contra el crimen organizado transnacional
- Agencia Internacional de la energía atómica, (IAEA)
- Interpol
- Organización Mundial de Aduanas (WCO por sus siglas en inglés).

Los datos que se obtienen de estas agencias, y otras que pudieran determinarse, si bien no son de carácter marítimo, sí pueden relacionarse para el objetivo del SARPEC: vulneraciones a la seguridad en el transporte marítimo por contenedor.

2.2. Uso de los datos (análisis)

El contexto en el que debe trabajar el sistema, de grandes cantidades de datos (*big data*), es el siguiente:

- Existen en el mundo 2.500 buques portacontenedores aproximadamente.
- En el mundo se producen 550 millones de movimientos de contenedores al año aproximadamente.

Una vez realizada la localización y recolección de datos, es necesario realizar una correlación de datos, con las herramientas *software* apropiadas, para de los datos sacar otros datos. La correlación puede comparar millones de datos en cientos de diferentes bases, y, a la vez correlacionarlos con datos en diferentes redes, a través de programas de búsqueda y con el uso de inteligencia artificial.

El siguiente paso es analizar los datos, en base a los supuestos que se determinen.

El análisis de datos, se realiza a través de algoritmos que tienen en cuenta las variables y procesos lógicos y matemáticos que se consideren necesarios para la determinación de que un contenedor pueda contener material que ponga en riesgo la seguridad. (De esta manera se aproxima el conocimiento del oficial de inteligencia, siguiendo con la analogía con una operación como la operación ATALANTA, guiado por una lógica basada en acumulación y análisis de datos anteriores, a elementos lógicos y matemáticos).

Los algoritmos, que se les llama modelos, aprenden porque reciben la realimentación de las soluciones parciales.

De esta manera cuanto mayor sea el conocimiento del entorno mayor serán el número de datos que se puedan recoger, correlacionar, y enfrentarlos a los modelos (algoritmos) que se determinen, haciendo el sistema más eficaz.

Además, habrá que introducir en el SARPEC la inteligencia que diferentes agencias tengan y se consideren pertinentes para la determinación de tráficos ilícitos de contenedores.

2.3. Las soluciones del sistema (evaluación)

El último paso del sistema es evaluar (dar una probabilidad a algo de que ocurra: cierto; probable; posible; no posible). Es decir, un análisis predictivo.

El resultado final, tiene que ser una evaluación: aproximar la solución por probabilidades. En el caso de la piratería busco, qué probabilidades hay de que se produzcan secuestros por zonas. (Riesgo alto-riesgo, medio-riesgo, bajo-no hay riesgo), y de esta manera ayudar al jefe de la operación en la decisión del uso de los recursos disponibles de la manera más adecuada.

En el caso de la seguridad de un contenedor, la solución tiene que ser: qué probabilidades hay de que en el interior de un contenedor se esté llevando a cabo un tráfico ilícito que ponga en riesgo la seguridad.

La idea general es que cuando el sistema esté funcionando, las evaluaciones que se hagan sean en tiempo real o casi en tiempo real.

Uno de las ideas clave del sistema es usar los datos que puedan usarse, es decir, al principio si los datos que pueden obtenerse no son muchos la fiabilidad del sistema no será elevada, pero, no cabe duda que, a medida que se vayan introduciendo más datos en el sistema y este lleve más tiempo funcionando, la fiabilidad y validez del sistema será mayor.

En muchos casos, no se tratará de visualizar en la mar lo que el contenedor sospechoso lleva, ya que, el problema se agudizaría con el Derecho Internacional Marítimo (bandera del buque, consentimiento del estado, pérdidas comerciales etc.), sino alertar y controlar el tránsito de ese contenedor de manera que se puedan tomar decisiones en el nivel adecuado. El último paso sería la inspección (visualización) del contenedor que se haría, bien en la mar, si hubiera cobertura legal a través de alguna resolución de Naciones Unidas, o en puerto, por la agencia aduanera.

Del total de movimientos de contenedores en el mundo, el 13,2 % de los movimientos se producen en puertos europeos, el 9,6 % en puertos de América y el 72 % en puertos de Asia.

Por tanto, si se tratara de implementar el sistema en Europa, se tendrían en cuenta el 13,2 % de movimientos de contenedores en el mundo, si se quisiera hacer en España ese porcentaje se reduciría mucho más.

Por este motivo el sistema que se propone alertaría de la probabilidad, a través de una gradación del riesgo (riesgo seguro - alta-media - baja-no hay riesgo), de que un contenedor tuviera en su interior material que pudiese ser un riesgo a la seguridad, asignándoles un perfil, y dejando a las autoridades competentes la responsabilidad de inspeccionar o no el contenedor.

En cualquier caso, esta situación final que se pretende ya sería un paso importante, ya que hoy en día no hay nada no solamente en España sino tampoco en Europa. (Estados Unidos sí que tiene un sistema por el que controla más del 70 % de cargos de contenedores que se mueven por el mundo, que ha diseñado NTELX).

3. Conclusiones

Es clave en el sistema automático de riesgo probable que encierra un contenedor (SARPEC) la localización y recolección de datos, base del funcionamiento del sistema, los cuales deben ir definiéndose de manera progresiva, a medida que aumente el conocimiento del entorno que afecta al control de contenedores marítimos. Concretamente, para este propósito, en lo que afecta a los diferentes tramos de la cadena logística (desde la industria hasta los puertos), se deberían potenciar los procesos por análisis de datos.

En el diseño del sistema, deberían participar agencias e instituciones relacionadas con el entorno marítimo/de seguridad, incluidas instituciones académicas y de investigación, y empresas especializadas en procesos a través del análisis de datos e inteligencia artificial[3].

3 En España existe la Comisión de Inteligencia Artificial y BIG DATA de la Asociación de Empresas de Electrónica Tecnología de la Información y Comunicaciones (AMETIC) encuadrada en la Confederación Española de Organizaciones Empresariales, que celebró el I encuentro de inteligencia artificial en junio de 2018.

La solución por probabilidades (o perfiles), es una ventaja para el control del tráfico marítimo en la mar, al tener una aproximación de los posibles tráficos ilícitos en las zonas de patrulla/ navegación, lo que se convierte en un factor relevante en operaciones, por ejemplo, de vigilancia marítima o embargos marítimos.

Por otra parte, el SARPEC es un complemento a los sistemas de seguridad física que se realizan en los puertos (scanner/inspecciones), al poder dedicar los escasos recursos con más eficacia.

El sistema se puede habilitar a diferentes niveles: nacional; regional o global, en función de la zona geográfica que se pretenda proteger: España; Europa; otras zonas geográficas o el mundo. Este aspecto dependerá del nivel de ambición que se quiera/se pueda asumir.

Agradecimientos

Rob Quartel, CEO NTELX.

Enrique Serrano, CEO TINAMICA.

Sistema de mantenimiento predictivo y diagnóstico de anomalías para la propulsión naval: aplicación en motores diésel 2T

Jiménez-Espadafor, Francisco[1,*], Palomo Guerrero, Daniel[2]

[1,*] Departamento de Ingeniería Energética. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos, s/n. 41092 Sevilla. Email: fcojjea@us.es

[2,*] Departamento de Ingeniería Energética. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos, s/n. 41092 Sevilla. Email: danpalgue@gmail.com

Resumen

La alta eficiencia, su extensa vida útil y el bajo coste del combustible aseguran el liderazgo en el largo plazo de los motores diésel para la propulsión naval y la generación de potencia. Sin embargo, la naturaleza impulsiva del proceso de combustión, entre otras causas, hace que la disponibilidad de los grupos diésel sea menor que otras soluciones como las basadas en turbinas de gas. En esta línea, el mantenimiento de los elementos principales del motor como pistones, cilindros, bielas, segmentos, válvulas o inyectores se resuelve habitualmente a través del mantenimiento correctivo o lo sumo el preventivo, lo que no evita la pérdida de prestaciones de la planta propulsiva ni la existencia de fallos catastróficos que invalidan el buque para su misión.

Este trabajo presenta las prestaciones de un sistema de mantenimiento predictivo actualmente en servicio en 4 motores diésel 2T (10 cilindros en línea, 15 MW a 125 RPM) y en un motor diésel 4T (18 cilindros V, 12 MW a 500 RPM). El sistema captura y procesa la información proporcionada por un conjunto de sensores: un acelerómetro por culata, un acelerómetro por cada turbocompresor, un tacómetro por cada turbocompresor para la medición de rpm, un sensor inductivo para la velocidad instantánea del motor en el volante de inercia y un sensor de par instantáneo donde la señal se transmite por telemetría. El sistema de diagnóstico se basa en técnicas de modelado de sistemas del tipo *data driven* a partir de las magnitudes históricas correspondientes al motor en buena condición. Desde su puesta en servicio ha identificado más de 200 anomalías que, al ser corregidas, han elevado la disponibilidad de los grupos.

Palabras clave

iagnóstico de fallos, propulsión naval, motores diésel.

1. Introducción

Los motores diésel de velocidad media y baja utilizados en plantas de potencia y para la propulsión naval, se caracterizan por un rendimiento muy elevado, tanto a plena carga como a carga parcial, emplear combustibles de bajo coste y disponer de una larga vida útil [1]. Por otro lado, estos motores muestran una disponibilidad reducida (entre 90 % y 95 %) en comparación con las turbinas de vapor o, en menor grado, con las turbinas de gas [2]. Aunque los parámetros que generalmente se monitorizan en las centrales diésel y en los navíos son muy útiles para controlar el rendimiento del motor (presión de combustión, presión de admisión y temperaturas de entrada y de escape), no aportan información sobre el estado de componentes mecánicos como pistón, cilindros, anillos, válvulas o inyectores. Igualmente, se carece de información detallada sobre el estado del grupo de sobrealimentación (compresor-turbina).

Por las características del proceso de combustión (carácter pulsatorio del ciclo de trabajo, elevados gradientes térmicos, cargas de inercia alternativa), este tipo de motor sufre fallos que con frecuencia no pueden ser previstos por las herramientas disponibles por los operadores de plantas, siendo el mantenimiento comúnmente utilizado el preventivo. Son los componentes mecánicos así como el turbocompresor los principales responsables de las indisponibilidades de la planta propulsiva que muchas veces se presenta a través de fallos catastróficos; en el caso de las plantas de potencia provocan la interrupción del suministro eléctrico y en la propulsión naval anulan la operatividad de la nave, por lo que se entiende prioritario garantizar la operación del motor sin fallos imprevistos.

En el caso de las máquinas rotativas, la monitorización de la vibración es una herramienta válida para el diagnóstico de averías. Por el contrario, el análisis de vibración de los motores de combustión interna es complejo, principalmente debido al carácter pulsatorio de la combustión y de los eventos del motor. El espectro típico de la vibración produce líneas de frecuencia a múltiplos de la velocidad de giro en motores de dos tiempos y de la mitad de esta en el caso de motores de cuatro tiempos, que se mezclan con amplitudes espectrales no armónicas.

En este trabajo se muestra el rendimiento y las principales características de un sistema de diagnóstico no intrusivo basado en el análisis de vibración que actualmente está en servicio en 5 generadores diésel, 4 de dos tiempos turbo-sobrealimentados que desarrollan 15 MW a 125 RPM y en un motor diésel 4T de 12 MW a 500 RPM. Tres motores están ubicados en la Central Térmica de Mahón en Mahón (islas Baleares, España) y uno está en la Planta de Diésel Punta Grande en Lanzarote (islas Canarias, España) y el de 4T en la Central Térmica de Melilla. El sistema captura y procesa la información proporcionada por 16 sensores: un acelerómetro por culata, un acelerómetro por cada turbocompresor, un captador por cada turbocompresor para la medición de rpm, la velocidad instantánea del motor y un sensor de par instantáneo formado por galgas extensométricas ubicadas en el eje entre el motor y el generador. Esta metodología actualmente en servicio y el sistema propio del motor/propulsor son susceptibles de integrarse en una estrategia de mantenimiento combinada basada en la condición [3].

2. Descripción del sistema

La figura 1 muestra el esquema del grupo generador y la ubicación de los sensores para el caso de un motor 2T. Se pueden identificar los elementos para medir el par (16-17-18) y la velocidad instantánea (14-15) en el lado del generador del motor, los acelerómetros ubicados en cada culata (1-2- ... .10), los

acelerómetros situados en la carcasa de los turbocompresores (T1-T2) y los sensores de medición de la velocidad del turbocompresor (RPM1-RPM2). La figura 2 muestra la configuración del sistema instalado en la Central Diésel de Punta Grande donde los datos procesados se guardan en la base de datos, siendo la unidad de diagnóstico la que realiza el análisis del sistema. El sistema funciona según el ciclo del motor y el análisis se realiza en un ciclo completo con una duración de 0,48 s por ciclo. Las mediciones se inician en el momento en que se detecta la llegada del borde ascendente del triger con una frecuencia de adquisición de 100 kHz, siendo todos los canales capturados simultáneamente, almacenándose del orden de dos mil ciclos de motor por día de operación. La tabla 1 presenta las características del motor sobre el que se ha implementado el sistema.

Los datos se analizan frente a la potencia del motor porque se ha identificado una gran dependencia de la magnitud de la vibración con esta. De hecho, las desviaciones de la evolución de la curva potencia-vibración son una herramienta valiosa para el diagnóstico del estado de los componentes del motor.

Tabla 1. Parámetros nominales del motor

	magnitud	unidades
Número de cilindros	10 - línea	--
Velocidad de giro	125,00	rpm
Diámetro del pistón (*D*)	0,67	m
Longitud biela (*L*)	2.538	m
Carrera (2·*R*)	1,70	m
Velocidad media del pistón (*c*)	7,10	m/s
Número de segmentos por pistón (*nc*)	5	--
Ancho segmento (*e*)	18	mm
Potencia máxima	15,50	MW
Rendimiento máximo	48,00	%
Presión media efectiva	12,40	bar
Orden de encendido	1-9-4-6-3-10-2-7-5-8	--

a. Culata

En cada culata se instala un acelerómetro con frecuencia de resonancia superior a 45-50 kHz según se muestra en la figura 2. Estos acelerómetros proporcionan información relacionada con la válvula de escape, el estado del cilindro, los segmentos de pistón y los inyectores. Además, la información de estos sensores permite conocer, por cada cilindro, el ángulo de cierre de la válvula de escape, el inicio del ángulo de inyección y la duración de la inyección.

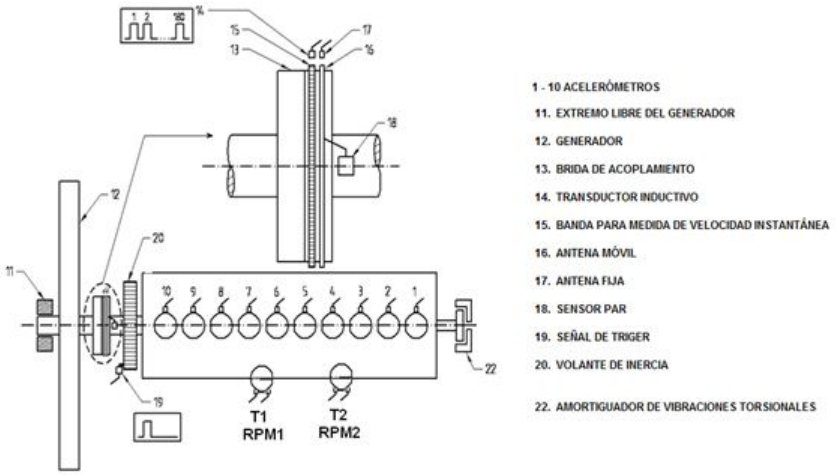


Figura 1. Esquema del sistema de sensores instalado en cada motor.

Figura 2. Instalación de acelerómetro en culata.

2.1. Par instantáneo

La señal de par generada por un dispositivo basado en galgas extensiométricas se transmite por un sistema de telemetría que proporciona el par instantáneo del motor transmitido al alternador (o la hélice). A partir de esta señal y la velocidad de giro del motor se conoce la potencia mecánica absorbida por el alternador, lo que permite clasificar la información en base a clases de potencia. El principio de medición para el par se basa en la relación entre el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal para la torsión pura. Para un torsor puro, la tensión principal es máxima a 45° con respecto al eje del eje y, por lo tanto, las galgas extensométricas están orientadas en esta dirección [4]; la ecuación que relaciona la deformación y el par torsor viene dada por (1):

$$\varepsilon = \frac{M}{\pi G r^3} \qquad (1)$$

Siendo $\mathcal{E}$ la deformación (adimensional), M el par torsor, r el radio del eje y G el módulo de elasticidad transversal que para el acero vale 80 GN/m^2. La figura 3 muestra un detalle de la instalación del sistema de telemetría en el motor.

Figura 3. Instalación de sistema de telemetría en eje motor-alternador.

2.2. Turbocompresor

Este motor presenta dos turbocompresores gemelos, siendo suficiente un acelerómetro por turbocompresor ubicado en la carcasa exterior para obtener toda la información vibratoria relacionada con la dinámica del eje, los rodamientos y los álabes. La señal de velocidad también se ha incluido para caracterizar el patrón vibratorio de los turbocompresores.

Por otro lado, el trabajo específico del compresor y la turbina son función cuadrática de la velocidad del eje del turbocompresor por lo que la relación entre la evolución de la potencia del motor y la velocidad del turbocompresor a lo largo de su vida operativa es un parámetro significativo para evaluar el estado de turbocompresor.

3. Generación de parámetros para el diagnóstico

La medida de la vibración por ciclo de motor permite discriminar los procesos por ciclo que se producen en el motor que se dividen en: cierre de válvula de escape, carreras de compresión-expansión, inyección, apertura de escape y de lumbreras de admisión. La figura 4 muestra la medida simultánea de la presión de combustión, presión de inyección y vibración en la culata de un cilindro.

3.1. Cierre de válvula de escape

Este motor es de barrido uniflujo, con el escape en la culata y las lumbreras de barrido en la parte inferior del cilindro. La válvula se abre con un pistón de accionamiento oleo-hidráulico que empuja el vástago de la válvula y se cierra con un pistón de accionamiento neumático. El impacto de cierre de la válvula de escape con su asiento produce una alta vibración que es recibida por el acelerómetro. La alta relación señal/ruido para este proceso permite establecer una relación empírica entre los eventos de cierre y el estado de la válvula. El ángulo de cierre de la válvula de escape se obtiene igualmente a partir de la señal de aceleración aplicando un detector de envolvente.

La figura 5 muestra uno de los fallos característicos de la válvula de escape, identificado como una gran reducción de la señal de aceleración en el momento correspondiente del cierre de escape. Igualmente se aprecia el cambio de tendencia en la curva vibración-potencia, apreciándose una desviación de aproximadamente el 100 %.

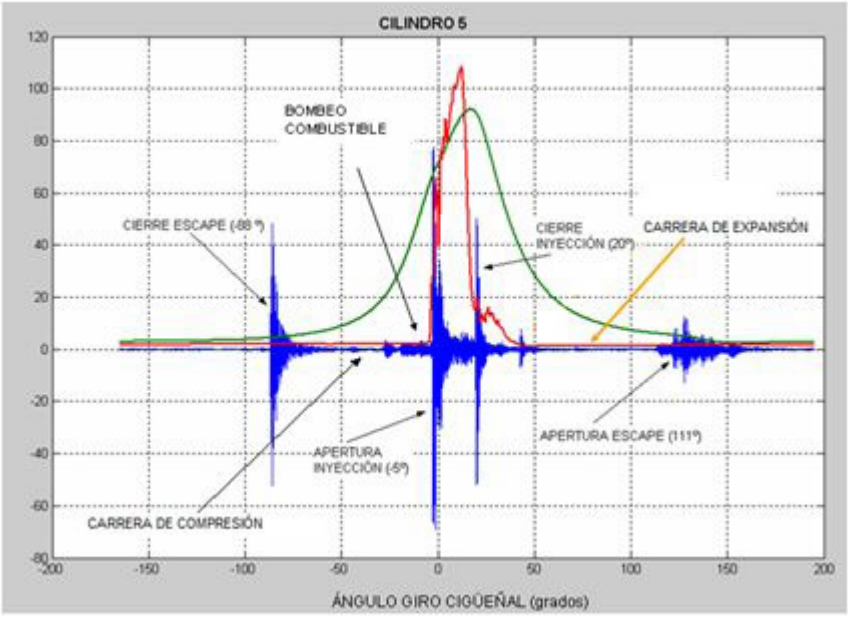


Figura 4. Identificación de los eventos del motor 2T en un ciclo.

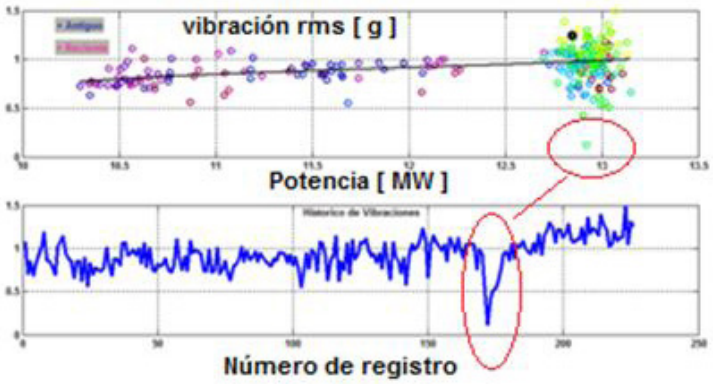


Figura 5. Fallo en el cierre de la válvula de escape: la válvula queda abierta retrasando el cierre.

3.2. Inyección

El levantamiento de la aguja provoca el choque de esta con la carcasa del inyector, generando una vibración de alta frecuencia que permite identificar el ángulo del levantamiento e indirectamente la presión de inyección de apertura. La comparación de la señal de vibración en el diagrama potencia - amplitud proporciona información incuestionable sobre el estado del sistema de inyección. La figura 6 presenta una falla del inyector del cilindro 1, donde se puede observar una gran reducción de la amplitud de la señal de vibración. Este fallo se ha producido en un ciclo de motor y, por lo tanto, los sistemas instalados en la planta basados en valores medios no pueden detectar este problema.

3.3. Apertura de escape y lumbreras de admisión

La válvula de escape y la lumbera de admisión abren a 111º y 132º después del pms. Debido a que estos eventos son muy cercanos, las ventanas utilizadas para el diagnóstico incluyen ambos. La apertura de la válvula de escape produce una gran aceleración de flujo y vibración de alta frecuencia. Esta ventana es muy efectiva en la identificación de rotura de segmentos. Este motor tiene 5 anillos y con frecuencia algunos de ellos se rompen, lo que aumenta la fuga de gases (*blowby*), reduce la eficiencia del motor y aumenta el riesgo de explosiones en el cárter. Cuando ocurre esta falla, aumenta la amplitud de aceleración en esta ventana, la línea de tendencia histórica amplitud-potencia del cilindro supera a los otros cilindros y la señal es más caótica. La figura 7 muestra esta anomalía en el cilindro número 10. En la figura superior derecha se presenta la magnitud de la aceleración bruta en g donde se puede ver una gran diferencia de amplitud entre este cilindro y el resto. En la imagen del medio, claramente la vibración en esta ventana para el cilindro 10 es más alta que el resto del cilindro para cualquier carga del motor. Finalmente, en la figura 7 se puede apreciar el comportamiento errático a lo largo de 18 horas de funcionamiento continuo del motor y el elevado nivel de vibración rms del cilindro 10 al compararlo con el resto de cilindros, indicando la rotura de segmentos.

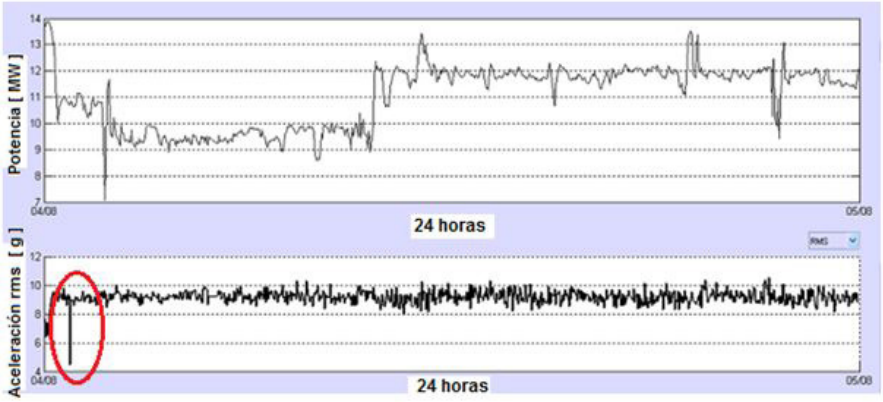


Figura 6. Alteración del patrón por fallo de inyección.

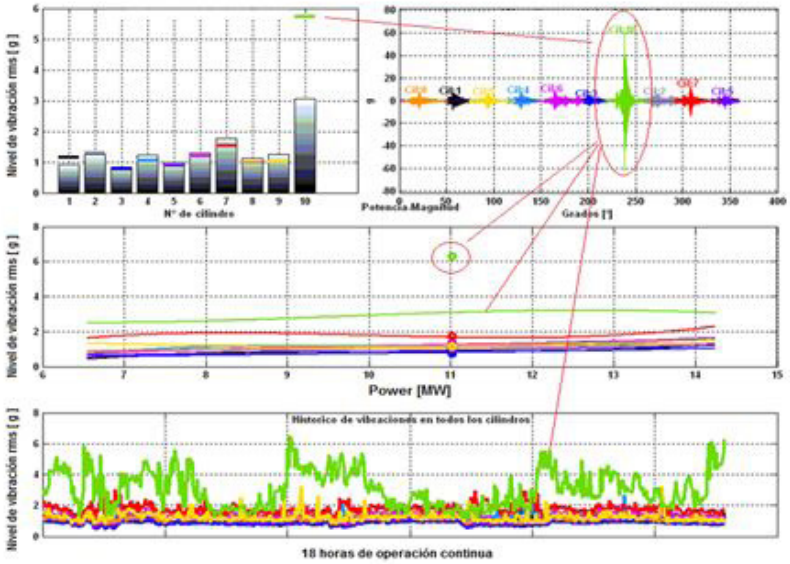


Figura 7. Rotura de segmento en el cilindro 10.

4. Resultado

La figura 8 presenta un resumen de los fallos detectados durante cuatro años de funcionamiento continuo del sistema sobre 5 motores. Las anomalías relacionadas con el cilindro, el pistón, la válvula de escape y los inyectores aumentan el consumo de combustible y pueden provocar, si no se corrigen, el fallo catastrófico del motor.

Figura 8. Clasificación por tipología de las anomalías identificadas.

5. Conclusiones

Se ha presentado un sistema basado en la monitorización de vibraciones que muestra su efectividad para el diagnóstico de fallos en grandes motores diésel de dos y cuatro tiempos. El sistema se basa en el análisis de la firma de la señal de vibración ciclo a ciclo que permite la asociación de la señal vibratoria

a los eventos del motor tales como inicio y fin de la inyección, combustión, apertura y cierre de la válvula de escape, apertura de escape y de lumbrera de admisión. Por otro lado, el análisis simultáneo de la velocidad y vibración de los turbocompresores han demostrado ser un método válido para la extracción de características que, combinado con la tendencia histórica, permite la identificación de la degradación del turbocompresor (ensuciamiento/rodamientos/álabes) y la determinación del periodo óptimo para realizar el lavado del compresor y de la turbina.

Referencias

1. *Tabla 1 – Parámetros nominales del moto F. Jiménez Espadafor, M. Torres García, J. Becerra Villanueva, J. Moreno Gutiérrez, The viability of pure vegetable oil as an alternative fuel for large ships, Transportation Research Part D: Transport and Environment 14 (2009) 461–469.*
2. *Tabla 1 – Parámetros nominales del moto Gas Turbine World. 2012 GTW Handbook (2011), Pequot Publishing, Inc.*
3. *Tabla 1 – Parámetros nominales del moto Condition Based Maintenance of the 2-Stroke Propulsion Engine, by O. Toft, BW Fleet Management, Norway, H. Rolsted, MAN Diesel & Turbo, Denmark, P. Samuelsson, Federal Mogul, Sweden. 27th CIMAC World Congress, Shangai May 2013.*
4. *Z.M. Bulatovic, M.S. Stavljanin, M.V.Tomic, D.M.Knezevic, S.Lj.Biocanin, Measurement and analysis of angular velocity variations of twelve-cylinder diesel engine crankshaft, Mechanical System and Signal Processing 25 (2011) 3043-3061.*

Diseño de un prototipo de USV como blanco naval de alta RCS

Nuñez Ortuño, José María[1,*], Casqueiro Placer, Carlos[2] , Rodríguez Giner, Manuel[3] y Rossi Vargas, Ignacio[4]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Marín. Escuela Naval Militar. Plaza de España s/n. 36920 Marín, Pontevedra. jnunez@cud.uvigo.es (JMNO).

[2] Centro Universitario de la Defensa de Marín. Escuela Naval Militar. Plaza de España s/n. 36920 Marín, Pontevedra. ccasqueiro@cud.uvigo.es (CCP).

[3] Novena Escuadrilla de la FLOAN. Base Naval de Rota, Cádiz; mrodgin@fn.mde.es (MRG).

[4] TEAR. Primer Batallón de Desembarco. San Fernando, Cádiz; irosvar@mde.es (IRV).

* Autor principal y responsable del trabajo; jnunez@cud.uvigo.es (JMNO).

Resumen

La Novena Escuadrilla de la Armada dispone en su arsenal de armamento, de bombas JDAM (*Joint Direct Attack Munition*) guiadas con un sistema inercial asistido por GPS y láser respectivamente. Los pilotos se adiestran en el lanzamiento de este tipo de bombas en el polígono de tiro de las Bárdenas Reales donde, debido a las dimensiones del polígono, únicamente puede ser usado desde una altura y distancia que limitan su uso al mínimo alcance efectivo de las armas. Si el lanzamiento se realizase en la mar, podría emplearse la máxima distancia y altura posibles lo que permitiría un adiestramiento más realista de los pilotos.

Este trabajo plantea el uso de un vehículo USV (*Unmanned Surface Vehicle*) que actúe como blanco naval. El blanco es una embarcación ligera y rígida, de un solo uso y no recuperable, por lo que su coste es muy bajo. Sobre el vehículo se sitúa un reflector radar de alta RCS (*Radar Cross Section*) que aumenta la superficie equivalente radar del blanco de forma que pueda ser localizado por la aeronave mediante radar previamente al lanzamiento. El vehículo posee un sistema de navegación basado en GPS que le hace llegar a su destino y mantener la posición de forma totalmente autónoma durante un tiempo determinado. No obstante, desde una estación de control situada en tierra o a bordo de un buque, es posible comandar el USV de forma remota y cambiar en tiempo real sus parámetros de misión.

Palabras clave

USV, blanco naval, radar, RCS, GPS, bomba guiada.

1. Introducción

En el escenario estratégico actual es frecuente el uso de aeronaves en acciones desarrolladas en zonas urbanas donde la población no combatiente es usada para dificultar la identificación y la neutralización. Con el objetivo de reducir al mínimo los daños colaterales, es obligado el uso de armamento de precisión, necesario para atacar objetivos puntuales.

El adiestramiento en el uso de este tipo de armamento, como las bombas GBU-38 y la GBU-12B, empleadas por la Novena Escuadrilla de la Armada, requiere sin embargo de un área restringida de notable extensión que resulte segura en caso de fallo en el guiado de los proyectiles. Actualmente estas tareas se realizan en el polígono de las Bardenas Reales, si bien deben realizarse con ciertas limitaciones.

Como alternativa se plantea la realización de ejercicios de tiro en el mar, donde la consecución de un área sanitizada lo suficientemente grande, es decir, un área restringida a la navegación bajo vigilancia de unidades de la Armada española, resulta factible. Para ello debe disponerse de un blanco capaz de mantener su posición en dicho entorno, por lo que se plantea el uso de un vehículo USV capaz de navegar hasta la posición deseada y mantenerse estacionario en la misma con un elevado grado de precisión.

De esta manera se pretende dotar a la 9.ª Escuadrilla de capacidad de entrenamiento de su armamento en condiciones de máximo alcance y altura, requeridos en combate para garantizar un disparo seguro, manteniendo la aeronave fuera del alcance de las armas que la amenazan.

En este trabajo se plantea únicamente el establecimiento de requisitos del vehículo y el blanco de alta RCS que porta, así como un diseño preliminar de los mismos.

2. Requerimientos

Para el diseño del vehículo no tripulado es necesario establecer previamente una serie de requisitos que garanticen su capacidad operativa como blanco geoposicionado para su empleo en el adiestramiento en el uso de bombas guiadas:

1) El blanco de superficie debería ser una plataforma/embarcación flotante ligera, rígida o semirrígida dotada de un sistema propulsor que le permita mantener la posición de forma automática durante un tiempo máximo de 60 minutos.
2) Debería tener un tamaño y forma que lo mantenga a flote con seguridad en condiciones de estado de la mar 2 e inferiores y que le permita ser remolcado o izado y arriado desde una cubierta de un buque en servicio actualmente en la Armada, en este caso, un BAM (buque de acción marítima).
3) En cuanto a su estructura, sería conveniente que tuviera, al menos, una superficie equivalente radar (RCS) similar a la de un patrullero, para poder ser localizado vía radar e identificado gracias a la cámara incluida en el contenedor de búsqueda de blancos AN/AAQ-28(V) LITENING. Dicha identificación debe poder realizarse a una distancia de 15 millas. A su vez, el blanco deberá tener una forma y un color que permitan que sea fácilmente identificado visualmente desde un avión a una distancia de 3 millas náuticas.
4) El vehículo será de un solo uso, no recuperable y con un coste muy reducido.

3. Diseño de un blanco de alta RCS

Si bien el vehículo empleado tiene una serie de requerimientos que condicionarán su diseño, la capacidad de portar un blanco de alta RCS (*Radar Cross Section*) según los valores requeridos determinará en gran medida otro conjunto de requerimientos por lo que el diseño de este elemento es el primero que debe abordarse.

El blanco se empleará como blanco de tiro para aeronaves de la 9.ª Escuadrilla que está formada por aviones Harrier AV-8B Plus, dotados con un radar AN/APG-65 que trabaja en la banda X (8–12 GHz). Teniendo en cuenta la frecuencia de operación del radar, el requisito de que el blanco posea una RCS equivalente a la de un pequeño patrullero y las restricciones de peso hacen que nos decantemos por una combinación de reflectores radar con facetas triangulares en esquina como el de la figura 1. Se trata de una pirámide de base cuadrada formada por 8 caras triangulares separadas entre sí 45º con 8 direcciones de apuntamiento principales.

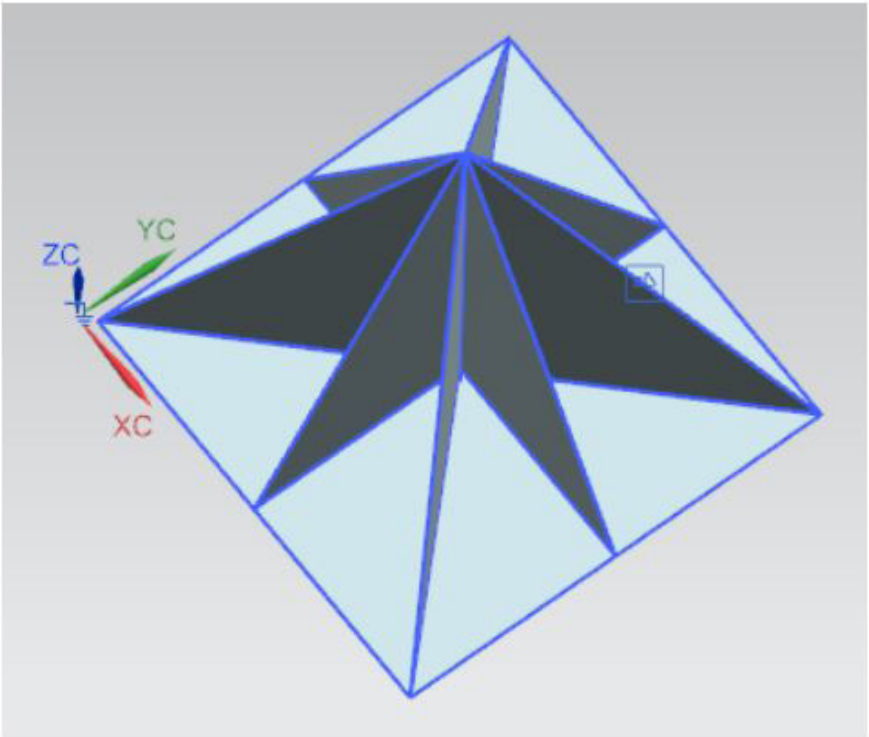


Figura 1. Blanco de alta RCS de facetas triangulares empleado en el diseño.

El análisis electromagnético de un reflector triangular simple [1] permite obtener su valor de RCS aproximado según la expresión (1)

$$\sigma(\theta,\phi) \approx \frac{4\pi}{\lambda^2} l^4[\cos\theta + \sin\theta\,(\sin\phi + \cos\phi) - 2[\cos\theta + \sin\theta\,(\sin\phi + \cos\phi)]^{-1}]^2 \quad (1)$$

El reflector de la figura 1 es un blanco complejo formado por múltiples reflectores triangulares simples. El análisis de este tipo de reflectores es también más complejo y precisa de herramientas de análisis electromagnético para la obtención de la RCS. En este caso, la RCS se ha obtenido empleando la herramienta de análisis electromagnético basada en la aproximación de óptica física POFACETS [2] que corre bajo entorno MATLAB®. Como resultado del análisis, se obtiene la RCS mostrada en la figura 2 en la que se aprecia cómo se garantiza una RCS mínima de 30 dBsm para un margen angular de unos 15º.

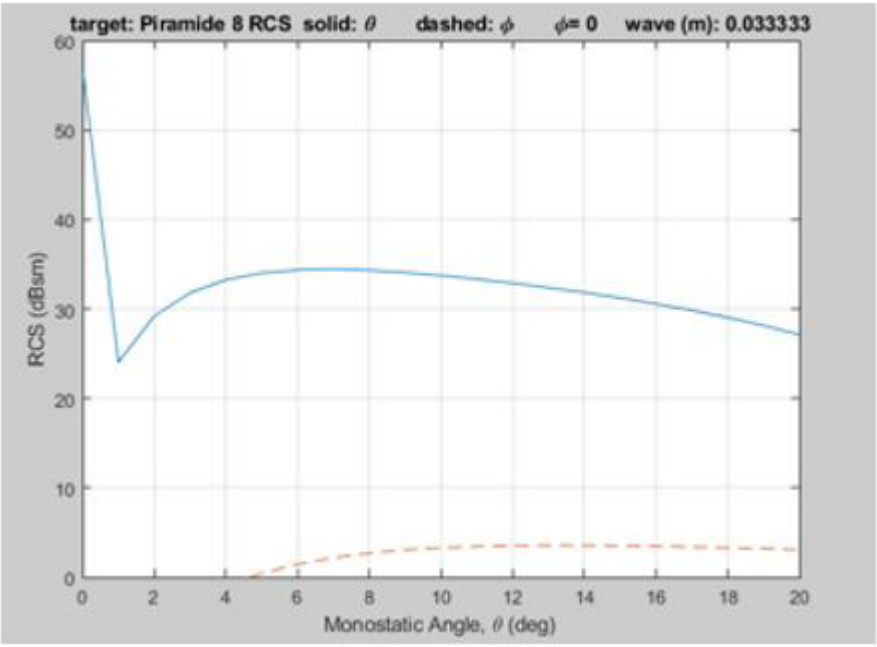


Figura 2. RCS del blanco en función del ángulo de incidencia.

4. Diseño de la plataforma naval

Una vez se ha definido la forma y dimensiones del elemento que procurará la RCS deseada, es posible abordar el diseño de la plataforma naval, que incluirá el diseño del casco, del sistema de propulsión y del sistema de control.

4.1. El casco

Dadas las dimensiones del blanco propiamente dicho, se ha optado por el diseño de un casco de tipo catamarán (figura 3) que permite dotar al buque de una elevada flotabilidad y estabilidad, primordial esta para mantener una orientación adecuada que permita ofrecer la imagen radar prevista bajo las condiciones de mar impuestas.

Se ha establecido un valor de la manga dado por el tamaño del blanco de alta RCS. En cuanto a la eslora, y realizando un diseño basado en diferentes catamaranes comerciales se estableció un valor aproximado de 6 metros. El material elegido es la aleación Magnealtok 45 – EN AW 5083, la cual está específicamente indicada para construcción naval, en espesor de 1,5 mm. Estas planchas serán utilizadas a su vez para la construcción del reflector en esquina.

Cada uno de los patines del catamarán estará diseñado para dotar al buque del total de la flotabilidad necesaria, de manera que el daño en uno de los patines no suponga el hundimiento de la nave. Por simplicidad en el diseño se han elegido superficies del casco planas y el interior estará dotado de cuadernas que dotan al casco de la rigidez necesaria. Las diferentes planchas se unen entre sí mediante soldadura TIG.

Ambos patines deben ser unidos de forma rígida, para lo que se añadirá una estructura capaz de soportar los esfuerzos de navegación portando el blanco de alta RCS así como los correspondientes a las maniobras de izado y arriado mediante maniobra con la grúa GH 230 suministrada por los buques de acción marítima de la Armada española. La función estructural la proporcionará un conjunto realizado en tubo comercial ranurado, de fácil ensamblaje mediante tornillería Allen M8x20 y escuadras de 90x90, realizado en aleación AW 6106 y el izado se realizará mediante eslingas sujetas a codos de aluminio 5083, de 180º, dispuestos según los requerimientos geométricos y de funcionamiento de la grúa y teniendo en cuenta la presencia del voluminoso reflector en esquina sobre la estructura.

El análisis de la resistencia estructural se decidió realizar el estudio de 3 situaciones, dos de ellas correspondientes a situaciones exigentes de navegación y la tercera correspondiente a la maniobra de izado/arriado. Para ello, los 3 estudios se realizan mediante la herramienta de análisis NX Nastran que implementa el análisis FEM. En todos ellos se utilizará un mallado tetraédrico 3D, para realizar un análisis estructural con solución estático lineal con utilización de un proceso de cálculo iterativo de elementos. En todos los casos se comprobó un adecuado grado de rigidez con bajas deformaciones del conjunto, y un coeficiente de seguridad satisfactorio.

Dada la presencia de requerimientos en relación a la capacidad de navegación del buque, se realizaron también los correspondientes cálculos justificativos, relativos a los criterios de estabilidad inicial (para ángulos de escora pequeños, menores de 10º), y la representación de las curvas hidrostáticas, las curvas cruzadas KN y las curvas de brazo adrizante. De entre los resultados obtenidos cabe destacar que el barco tiende a adrizarse para escoras de hasta 70º mientras que la ola correspondiente a las condiciones de mar requeridas le generará algo menos de 15º garantizando la estabilidad del buque incluso en condiciones más exigentes.

El cálculo de la resistencia al avance de la embarcación se realizó mediante el método de Slender Body [4], para velocidades de hasta 15 nudos con vientos en contra de 10 nudos. Los cálculos resultantes proporcionan un valor de 1,121 kW para la potencia requerida.

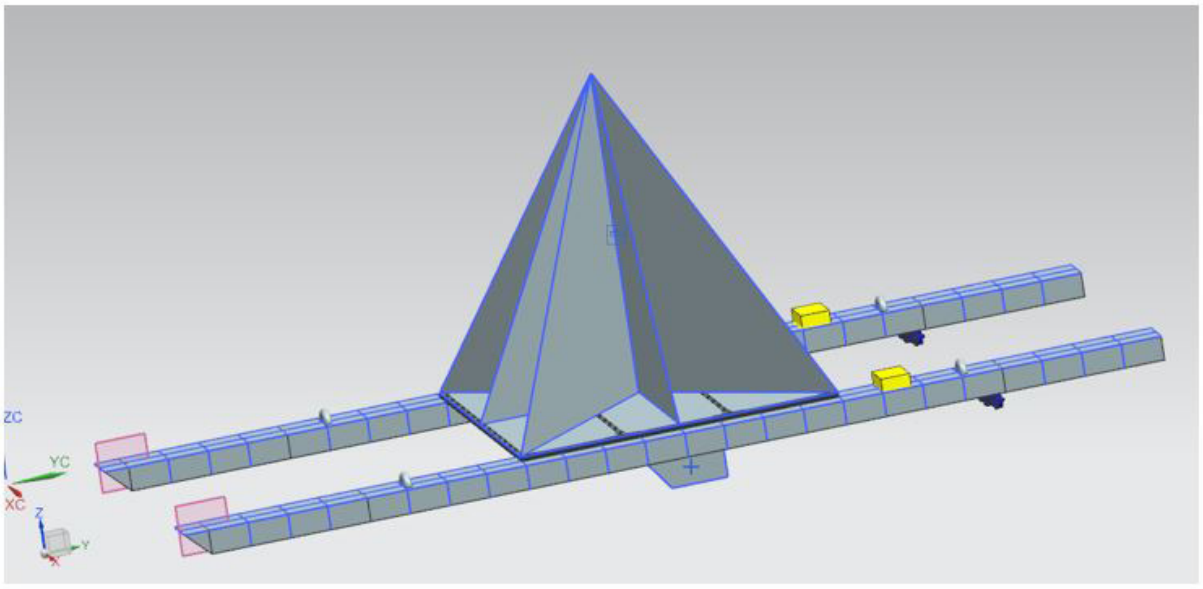


Figura 3. Diseño preliminar del USV usado como blanco naval.

4.2. Sistema de propulsión

Para la propulsión del vehículo se consideraron dos factores: la potencia debe permitir la navegación en las condiciones de mar deseadas desde donde se realice la suelta por el buque nodriza hasta el punto deseado y el sistema debe permitir el posicionamiento estacionario del vehículo. Para satisfacer ambos condicionantes se planteó un diseño dotado de al menos 2 propulsores que permitan funcionar en ambos sentidos y así facilitar la maniobra de mantenimiento de posición. La opción elegida por su robustez contrastada fue el modelo T200 de la casa Blue Robotics, que ofrece una potencia máxima de 350 W. Por este motivo, se requiere el montaje de dos motores en cada lado de la embarcación, alcanzando en conjunto una potencia de 1,5 kW que supera la requerida (+ 33 %).

Para la alimentación de los motores se disponen dos baterías de polímero de litio (LiPo) en paralelo, cada una de ellas de 4 celdas y una capacidad unitaria de 16.000 mAh de manera que se disponga de una autonomía de unos 35 minutos a máxima potencia, considerando que para mantener la posición en

las condiciones de mar requeridas la potencia es sensiblemente inferior lo que permite alcanzar los 60 minutos requeridos en posición.

4.3. Sistema de control

El sistema de control definido se basa en la plataforma abierta Ardupilot, que entre sus opciones dispone la de control de vehículos de superficie, bajo el epígrafe Rover. La arquitectura empleada se puede ver en la figura 4 y posee como elemento principal una controladora de navegación Pixhawk sobre la que corre el *software* de navegación Ardupilot. La controladora envía órdenes a los *drivers* o controladores de los motores, que a su vez permiten acelerar o frenar e incluso invertir el sentido de giro de estos. Por otro lado, la controladora recibe instrucciones de la estación de control mediante un sistema de comunicación radio con capacidad de transmitir datos de telemetría, y decide las acciones oportunas en función de la posición GPS en cada instante y su comparación con las instrucciones recibidas desde la estación de control.

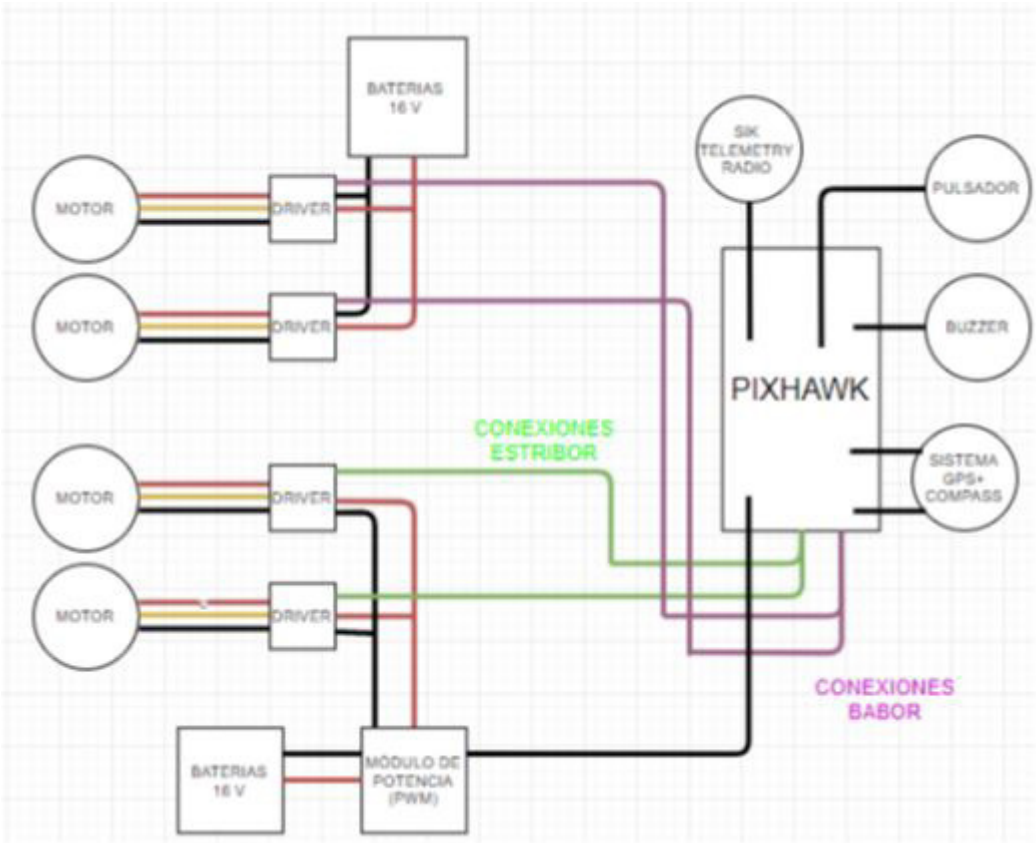


Figura 4. Diagrama de conexiones del sistema de propulsión y control.

Como estación de control se emplea un PC, tablet o teléfono móvil que permita ejecutar un *software* de control como *Mission Planner* [5] en el que se definen las tareas a realizar, los trayectos a seguir y los parámetros con que han de ejecutarse, y se comunica con la controladora Pixhawk mediante el protocolo MAVLink. En este caso se emplea un ordenador portátil, conectado con la Pixhawk vía radio.

Se dispone asimismo de un sistema manual de control remoto cuyo receptor se conecta con la controladora y le transmite instrucciones concretas acerca de la velocidad y radio de giro deseados, que la controladora simplemente traduce en las acciones requeridas que comunica a cada motor a través de los correspondientes *drivers*. El sistema manual se emplea como elemento de seguridad y tiene prioridad sobre las instrucciones recibidas desde la estación de control.

5. Conclusiones

En este trabajo se han expuesto los requisitos operativos y el diseño preliminar de un blanco naval de superficie de alta RCS para el adiestramiento de pilotos de la 9.ª Escuadrilla en el uso de bombas JDAM en condiciones de máximo alcance y altura. Esta solución supone una alternativa al uso del polígono de las Bárdenas Reales donde el lanzamiento de dichas bombas debe realizarse con ciertas limitaciones.

El vehículo diseñado es capaz de navegar hasta la posición deseada y mantenerse estacionario en la misma con un elevado grado de precisión.

Si bien en esta primera versión del vehículo, no se incorporaría carga de pago alguna (excepto el propio reflector radar), pero en el futuro se podrían incorporar elementos radiantes de calor o emisores de radio frecuencia, que permitirían el empleo del USV como blanco para una mayor variedad de armamento y otros equipos para realizar pruebas sobre sistemas de guerra electrónica y radar.

Referencias

1. *Keroglou, E. Analysis and design of retroreflectors. Naval Postgraduate School. Monterey, California; 1997.*
2. *File Exchange MathWorks: POFACETS 4.1 David Jenn [Internet]. [visitado Sept. 2018]. Disponible en: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35861-pofacets4-1*
3. *Navantia. Programa BAM: Análisis técnico de mantenimiento. Grúa electrohidráulica cubierta de trabajo; 2015.*
4. *Newman, J.N. Marine Hydrodynamics. MIT Press, 2018.*
5. *Mission Planner [Internet]. [visitado Sept. 2018]. Disponible en: http://ardupilot.org/planner/*

Sistema colaborativo multifuncional de vehículos híbridos no tripulados submarinos de alta autonomía y altas prestaciones, multimisión y basado en pilas de combustible (AUV SIROCO)

Ramos Castro, Hugo[1], Martínez Martínez, Ángel[2], Álvarez Abad, Juan[2] y Lopez Peña, Fernando[3]

1 ROBDOS; SRL, Avda Alcalde Ramírez Bethencourt 17, 35015 Las Palmas de Gran Canaria. España Email: hugo.ramos@robdos.com (hrc).

2 JALVASUB Engineering, SL, C/ Kálamos n.º 26 4-2.º-4, 28232 Las Rozas de MADRID. España Email: a.marmar@jalvasub.com (amm); jalvarez@jalvasub.com (jaa).

3 Universidad de la Coruña. Grupo Integrado de Ingeniería, Edificio de Talleres Tecnológicos - Campus de Esteiro, 15403, Ferrol (A Coruña). España Email: flop@ude.ces (flp).

* Autor Principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: "mailto:omar.gomez@upm.es" omar.gomez@upm.es (OGO)

Resumen

El «AUV SIROCO» es un sistema naval formado por vehículos no tripulados submarinos de alta autonomía y altas prestaciones, que podrán trabajar simultáneamente y de forma colaborativa, en todas las actividades que conforman las misiones MCM, ISR, SAR o investigación oceanográfica.

El sistema dispondrá de al menos dos vehículos submarinos híbridos, ligeros y fácilmente reconfigurables según la misión a desempeñar, con la posibilidad de integrar un patín en su plataforma para realizar maniobras robóticas asociadas a operaciones tales como la neutralización de minas u otras amenazas.

El vehículo se considera híbrido porque integrará en una única plataforma las capacidades propias de un vehículo no tripulado autónomo (AUV), y las de un vehículo remotamente operado (ROV), facilitando así la interoperabilidad entre las unidades submarinas y su multifuncionalidad.

Cada vehículo contará con un nuevo sistema de propulsión formado por módulos de generación de energía independiente del aire (AIP), basados en la integración de nuevas tecnologías disruptivas de generación integrada *in situ* y a demanda de oxígeno e hidrógeno y pilas de combustible tipo PEM de bajo coste y alta eficiencia, que le proporcionará una autonomía muy superior a la actualmente disponible.

Esta iniciativa tecnológica, liderada por las dos PYMES españolas ROBDOS SRL y JALVASUB Engineering SL y en la que participan otras PYMES, Universidades y Centros de Investigación españoles, está recogida por la ETID 2015, dentro del Área de Actuación 3.- «Plataformas», en las Metas Tecnológicas MT-3.1.5 Almacenamiento de energía y MT-3.4.3 Vehículos no tripulados de ámbito naval. Asimismo, también está recogida dentro de las prioridades de la EDA para tecnologías duales: «XXII. Autonomía persistente de sistemas marítimos no tripulados».

Palabras clave

Vehículos no tripulados submarinos híbridos, AUV, ROV, propulsión independiente del aire (AIP), alta autonomía, hidrógeno y pilas de combustible.

1. Introducción

Durante los últimos 30 años hemos sido espectadores de los grandes cambios tecnológicos ofrecidos por la robótica de campo en todos los sectores incluido el de la defensa y la seguridad. En el presente documento centraremos nuestra atención en las aportaciones que la robótica de campo y en concreto un sistema como el AUV SIROCO puede hacer a la operativa de la Armada y de otras Marinas.

Un sistema robótico como herramienta estratégica en el sector naval tiene la función de proveer al operador, de la información necesaria para de forma directa o a través del procesado de la misma poder tomar decisiones estratégicas y efectuar actuaciones. Para ello el operador del sistema robótico utiliza como herramientas una serie de sensores y equipos de carga de pago que son operados en el espacio designado para el desarrollo de la misión por medio de un vehículo o plataforma no tripulada.

Esta plataforma tiene que ser previamente programada por el operador mediante una serie de herramientas *software* que definen los principales aspectos de la misión (puntos de ruta, configuración de la carga de pago, procesamiento de datos, hitos o eventos, etc.). Así mismo la plataforma debe ser monitorizada en forma remota gracias a su capacidad de comunicación, mediante el correspondiente módulo *software* de monitorización y seguimiento, el cual permite mediante sus diferentes herramientas de evaluación determinar cuál es el estado de la misión, de la plataforma y tomar decisiones operativas críticas como el abandono o el cambio de misión.

Por lo tanto un aspecto clave de un sistema robótico es su capacidad de comunicación entre las plataformas desplegadas y la estación de mando y control, y la capacidad de evaluación y ejecución de acciones sobre las plataformas autónomas que integran el sistema. La capacidad y flexibilidad de integración por parte de la plataforma autónoma así como por parte de la estación de mando y control de operar distintos sensores y equipos de carga de pago y las herramientas *software* facilitadas por los desarrolladores y fabricantes de estas cargas de pago es un aspecto clave para la operatividad, adaptabilidad y actualización de un sistema robótico.

El actual avance del estado del arte entorno a la robótica marina busca crear sistemas colaborativos, persistentes en el medio y de gran autonomía, al mismo tiempo que innova en las capacidades singulares de cada plataforma mediante el desarrollo de nuevas cargas de pago y capacidades de procesamiento embarcado.

El sistema AUV SIROCO que se presentará a lo largo de este artículo, cumple con los distintos requerimientos expuestos a lo largo de los anteriores párrafos, avanzando sobre el estado del arte mediante la adaptación de sistemas de producción de energía eléctrica bajo demanda (basados en tecnologías de pila de combustible), mediante el desarrollo de una tipología de plataforma no tripulada con una alta capacidad de adaptación a distintas configuraciones (tanto a nivel *software* como *hardware*), y mediante el desarrollo de un centro de mando y control capaz de operar e integrar plataformas y datos estratégicos de fuentes externas.

2. Sistema AUV SIROCO

El sistema, cuyo diagrama de bloques se muestra a continuación en la figura 1, se trata de un **sistema colaborativo multifuncional** de vehículos **híbridos (AUV/ROV)** no tripulados, submarinos con **alta autonomía y altas prestaciones**, con capacidad multimisión para adaptarse fácilmente a misiones tanto de tipo civil como militar.

El sistema trabajará simultáneamente y de forma colaborativa, en todas las actividades que conforman una misión MCM (búsqueda, detección, identificación y neutralización de minas, munición química vertida al mar, municiones sin estallar, adquisición de parámetros ambientales necesarios, etc.), una misión ISR (adquisición de inteligencia, vigilancia, reconocimiento y rápida evaluación del entorno), misiones SAR en torno a cualquier efectivo (aeronave, submarino o buque) siniestrado en el océano, o una misión de investigación oceanográfica.

Cada vehículo AUV SIROCO irá dotado con una propulsión eléctrica independiente del aire (AIP) basada en novedosas tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible, mucho más eficiente, más compacto y de menor coste que los que actualmente se están desarrollando, dotado con la **mayor persistencia posible en la mar,** que denominamos AIP HYCOGEN.

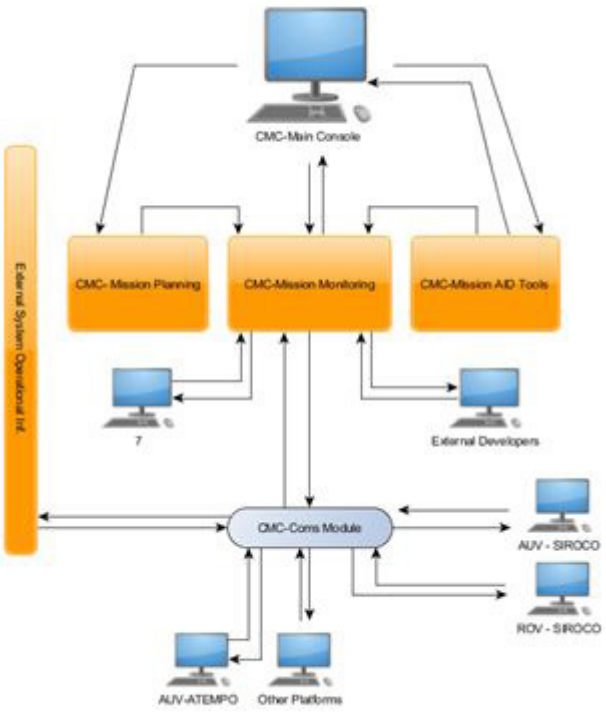


Figura 1. Diagrama de bloques sistema AUV.

A continuación, se detallan los componentes principales y capacidades del sistema.

2.1. Vehículo AUV SIROCO

El sistema incluirá un vehículo submarino **híbrido** (con posibilidad de funcionar bien en modo remoto o en modo autónomo, denominados recientemente como *Hybrid Autonomous Underwater Vehicles* «H-UV»), ligero y fácilmente reconfigurable según la misión a desempeñar, y con posibilidad de integrar un patín en su plataforma para realizar maniobras robóticas asociadas a operaciones tales como la neutralización de minas u otras amenazas. Con ello, se facilita la disposición a bordo del buque nodriza de una plataforma para acometer con garantía todas las actividades asociadas a las distintas misiones, que

gracias a su alta autonomía evita la cercanía del buque nodriza a la zona de amenaza y que mejora la persistencia de los vehículos en operación.

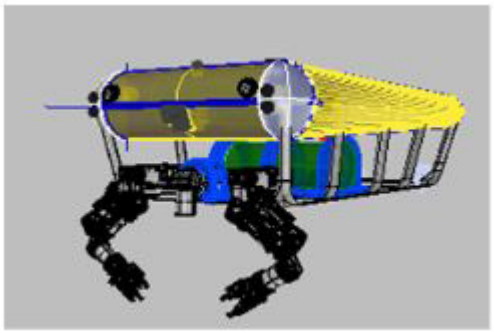


Figura 2. Vehículo AUV SIROCO con patín.

Como principales cargas de pago para el desarrollo de las misiones asignadas a este innovador sistema será capaz de integrar equipos de dos tipologías diferentes:

- Las cargas de pago de tipología reconocimiento y caracterización, como por ejemplo sonar de apertura sintética, cámaras acústicas, hidrófonos, sondas oceanográficas tipo CTD, oxígeno disuelto y fluorometría.
- Las cargas de pago tipo actuación mecánica, como sondas de medición ultrasónica, brazos robóticos, herramientas de corte y en general herramientas de actuación mecánica submarina.

2.2. Otras plataformas integrables

Dada la concepción abierta del SW de mando y control utilizado, se facilita la integración en el sistema de otras posibles plataformas para realizar actividades con el resto de los vehículos de forma colaborativa. Entre ellas, podemos destacar la posible integración del vehículo híbrido existente «H-AUV A-TEMPO». Se trata de un vehículo modular, propiedad del Grupo Integrado de Ingeniería de la Universidad de la Coruña, y desarrollado por el equipo técnico que actualmente dispone ROBDOS SRL, de 1,4 m de eslora, 0,7 m de manga y 0,8 m de puntal, actualmente propulsado eléctricamente con baterías de alta capacidad para su operación en modo AUV, pero con posibilidad de montar en su patín un módulo AIP HYCOGEN que maximice su autonomía. Este vehículo está actualmente operativo desempeñando operaciones relacionadas con la inspección y mantenimiento de instalaciones *off-shore*.

Figura 3. H-AUV ATEMPO.

2.3. Propulsión AIP HYCOGEN

El vehículo estará equipado con un nuevo sistema de propulsión formado por módulos de generación de energía eléctrica independiente del aire (AIP), fácilmente desmontables e intercambiables, basados en la integración de nuevas tecnologías disruptivas de generación integrada *in situ* y a demanda de oxígeno e hidrógeno y pilas de combustible tipo PEM de bajo coste y alta eficiencia, que dotarán al vehículo de una autonomía objetivo superior a las 16 horas.

Conforme a los estudios llevados a cabo por la OTAN en el 2014 y cuyos resultados se incluyen en el informe «STO TECHNICAL REPORT TR-SET-173-PART-II «FUEL CELLS AND OTHER EMERGING MANPORTABLE POWER TECHNOLOGIES FOR NATO WARFIGHTER – POWER SOURCES FOR UNMANNED APPLICATIONS (2014). CHAPTER 4 – UNMANNED UNDERWATER VEHICLES (UUVS)», las tecnologías más prometedoras, eficientes y seguras para su integración a bordo de vehículos no tripulados submarinos son:

- La generación de hidrógeno a partir de metales alcalinos, alcalino térreos (litio, sodio, magnesio, y sus aleaciones, etc.) que al reaccionar con el agua de forma exotérmica producen hidrógeno hidratado de alta pureza.
- La generación de oxígeno a partir de la reacción catalítica de una disolución industrial de peróxido de hidrógeno, que de forma exotérmica produce agua y oxígeno, con una capacidad de almacenaje comparable al almacenamiento del hidrógeno a 300 bares de presión. Estos sistemas ya se están utilizando en sistemas aeronavales para la propulsión de cohetes y torpedos.

La generación a bordo de hidrógeno a partir de metales alcalino, alcalino térreos, evita los problemas técnicos, operativos y logísticos que conlleva su almacenamiento a alta presión o en forma líquida, además de aportar una solución totalmente limpia y fuera del ciclo de carbono por definición.

Dos de las barreras tecnológicas que también están dificultando el uso de pilas de combustible en sistemas móviles compactos tales como los vehículos ligeros no tripulados submarinos son:

- El necesario uso interno de catalizadores basados en metales nobles (platino).
- La configuración actual de apilamiento de las placas, que dificulta su compactación y reducción de pesos, y condiciona sus prestaciones eléctricas.

La propulsión AIP HYCOGEN integra las tecnologías siguientes, que dan solución a los problemas tecnológicos expuestos:

- Sistema de generación de hidrógeno a demanda e *in situ*, basado en la tecnología patentada METALIQ, desarrollado y patentado por la PYME española Drage&Mate International, y que está basada en la reacción exotérmica de un reactivo (formado primariamente por mezclas de metales alcalinos y alcalino-térreos) con agua. El reactivo se integra en un cartucho desmontable y recargable por misión.

Los sistemas METALIQ se encuentran actualmente en un alto estado de madurez tecnológica para su integración en vehículos no tripulados aéreos, triplicando la capacidad energética de las actuales baterías de alta capacidad que se están utilizando.

- Sistemas de pilas de combustible de alta eficiencia y bajo coste, que denominaremos ULPHE-PEM, basados en las tecnologías patentadas por el Laboratorio de física de fluidos de la UNED, que incluyen:
    - un novedoso y patentado proceso de fabricación y deposición del catalizador por electrospray, que reduce en más de 20 veces el platino a utilizar;
    - una novedosa y patentada configuración de apilamiento de celdas, que disminuye en más de 3 veces el peso y volumen de las pilas PEM actuales y mejora las prestaciones eléctricas.

Actualmente se dispone de demostradores tecnológicos de pilas ULPHE-PEM de suficiente tamaño, que han sido ya evaluados en paralelo por instituciones de elevado prestigio, como el DLR alemán, quedando demostrada su modularidad, capacidad de crecimiento y prestaciones.

- Sistema de generación de oxígeno a demanda e *in situ* (que denominamos GENOX), basado en la reacción catalítica y exotérmica de disoluciones acuosas industriales de peróxido de hidrógeno. El GENOX integra novedosas tecnologías catalíticas que actualmente está desarrollando JALVASUB Engineering con el Grupo de Hidrógeno y Pilas de Combustible del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC.

Un esquema de funcionamiento del AIP HYCOGEN se muestra a continuación en la figura 4.

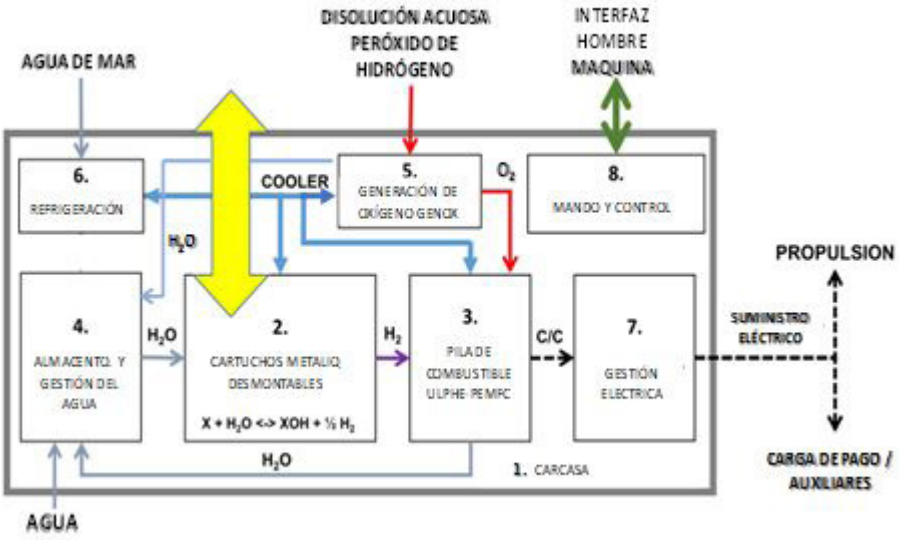


Figura 4. Esquema del AIP HYCOGEN.

Gracias a la integración funcional entre los diferentes subsistemas que conforman el módulo AIP, se consigue maximizar la eficiencia del sistema, obteniendo una densidad energética en peso superior a los 600 W.h/Kg, que es más de 3 veces superior a las que actualmente se pueden obtener con los sistemas de propulsión eléctrica basados en baterías de alta capacidad.

2.4. Mando y control. Robótica colaborativa

A nivel *software* el sistema SIROCO basa su operación en una arquitectura SW de sistema completamente modular, jerárquicamente distribuida en capas, en función de la criticidad y grado de adaptabilidad. Esta arquitectura permite la alta modularidad operativa y de *hardware* de la plataforma y se refleja en un paquete *software* distribuido en dos partes, SW embarcado y SW de estación.

El SW de estación de mando y control incluye: las herramientas de tele-operación para modo ROV, herramientas de planificación de misión con sus distintos módulos en función de los sensores de carga de pago, herramientas de seguimiento de misión, herramientas de evaluación de situación y replanificación de misión tanto para un solo vehículo como para un enjambre.

El SW embarcado en la plataforma autónoma incluye: el *firmware* de control de la plataforma en sus distintas configuraciones HW (modo AUV y modo ROV), módulo *software* de comunicaciones, *software* de gestión de carga de pago, módulo de ejecución de misión, funciones avanzadas de navegación y control, módulo de misiones cooperativas en enjambre.

2.5. Capacidades del sistema

La capacidad de búsqueda, detección, recogida de datos, identificación y neutralización de amenazas, así como la de operación colaborativa de los vehículos, estará basada en las capacidades y experiencia desarrollados por la PYME española ROBDOS SRL y el Grupo Integrado de Ingeniería de la Universidad de la Coruña.

El sistema estará compuesto por una plataforma híbrida submarina de altas prestaciones (capaz de ser adaptada a un perfil operativo tipo AUV o ROV de forma directa y simple, mediante operaciones de mantenimiento sencillas y ágiles). Para la operación del sistema desde línea de costa o desde una embarcación nodriza, el sistema dispondrá de una estación de mando y control desde la cual se articularán las capacidades operacionales del sistema.

En su **perfil AUV** el sistema dispone de un perfil hidrodinámico de alta eficiencia, tres grados de libertad (avance, guiñada e inmersión) con capacidad de mantenimiento de la posición o *hoover*, una profundidad de operación de al menos 500 m y un sistema de propulsión AIP cuya generación energética está basada en el sistema HYCOGEN. Estos aspectos dotan al sistema de una autonomía superior a cualquier otro sistema similar presente en el mercado. En este modo de operación el sistema desarrollará misiones de caracterización y estudio de grandes superficies de océano; el *software* embarcado permitirá desarrollar estas misiones de forma versátil mediante funciones avanzadas de navegación, como por ejemplo el mantenimiento de distancia a la superficie o al lecho marino.

También en este modo de operación contará con un módulo de comunicaciones con cuatro capacidades en función de la distancia y demanda del operador.

En una primera aproximación, el operador del sistema puede programar la plataforma para realizar la misión en un entorno de extensión y profundidad limitada, para poder monitorizar la plataforma mediante conexión directa de un umbilical de comunicaciones en F.O o mediante un sistema de boya de comunicaciones *WiFi bridge*, o *WiFi* punto a punto, que es conectada y remolcada por la plataforma autónoma.

En una segunda aproximación, el operador puede operar sin el umbilical y apoyarse para la monitorización de la plataforma autónoma en comunicaciones acústicas, aunque presente capacidades limitadas de monitorización y actuación (capacidad de recibir un vector de estado, y de ejecutar un comando pre-programado en el S.W embarcado).

En una tercera aproximación, se podrá actuar de forma completamente autónoma, sin monitorización desde la estación de mando y control. En este modo solo se comunica información con la estación al inicio de la misión y en los momentos de emersión. Para ejercer estas comunicaciones se integrará un módulo de comunicaciones WiFi bridge, o WiFi punto a punto (en caso de encontrarse en rango), o un módulo de comunicaciones satélite (cuando no esté en rango de link *WiFi*).

A nivel de seguridad pasiva, debe destacarse que el vehículo contará con flotación positiva y con una baliza de radio y luz, que permite su localización y recuperación ante un potencial *black out* de la plataforma autónoma.

En su **perfil ROV** el sistema SIROCO presenta la capacidad de montar un patín inferior para la disposición de sensores y equipos que apoyen y ejecuten labores de actuación mecánica. En este perfil operativo, la plataforma autónoma también puede disponer en este patín de propulsores extra que la doten de una mayor maniobrabilidad como, por ejemplo, poder compensar desplazamientos laterales debidos a corrientes marinas, o compensar o producir cabeceo bajo demanda del operador. En este modo de operación se podrá disponer de ayudas avanzadas a la tele-operación, como funciones de *auto-heading*, compensación de roll o balance, y funciones de mantenimiento de distancia a la superficie y lecho marino o a elementos estructurales continuos sumergidos.

Para ejecutar misiones en este modo de operación el vehículo estará dotado de un cable umbilical de datos y potencia, que permitirá alimentar elevadas demandas de energía a herramientas de actuación mecánica, al mismo tiempo que se ejecuta la monitorización y tele-operación del sistema.

El cambio o adaptación de un perfil AUV a un perfil ROV del sistema SIROCO se realizará a nivel *hardware* mediante operaciones simples de mantenimiento y actualización que se acometerán por parte del operador. A nivel *software* se deberá realizar una selección o cambio de modo de control en función de las herramientas, sensores y propulsores, añadidos al patín inferior.

3. Aplicaciones militares del sistema AUV

A la vista de lo expuesto se considera, que los principales beneficiarios de los sistemas AUV SIROCO en el ámbito de la seguridad y defensa deberían ser las unidades que desempeñan, entre otras, las operaciones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR), medidas contraminas (MCM), guerra antisubmarina (ASW), salvamento y rescate (SAR), investigación oceanográfica y arqueología submarina.

4. Conclusiones

El sistema descrito en este artículo supone una nueva concepción de sistema de vehículos no tripulados submarinos, cuyas principales ventajas son la **versatilidad, la capacidad de colaboración y la alta persistencia en la mar**. Gracias a ello, son sistemas:

- que pueden operarse alejados de costa o de su buque nodriza, minimizando así, en este último caso, su exposición a la amenaza;
- fácilmente reconfigurables en función de la actividad a llevar a cabo dentro de una misión, evitándose así la profusión a bordo de diferentes vehículos únicamente especializados en una actividad y difícilmente integrables para una acción colaborativa.

Referencias

1. *López Peña, F. Universidad de La Coruña;, Ramos H. Ixion Indurtry&Aerospace, Madrid. «A hybrid ROV/UAV vehicle for underwater inspection and maintenance of offshore structures».*
2. *Dirección General de Armamento y Material. Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación. Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID-2015.*
3. *Barreras F, Lozano A, LITEC, CSIC- Universidad de Zaragoza. «Hidrógeno. Pilas de Combustible de Tipo PEM».*
3. *Drage & Mate International -CONAMA 2014 «Tecnología Química para Sistemas Avanzados de Propulsión y Almacenamiento de Energía usando Hidrógeno» http://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/TFs%202014/1998969712_ppt_AGarrido.pdf*
4. *A. Mendez , T. J. Leo and M. A. Herreros; Current State of Technology of Fuel Cell Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles, Energies 2014, 7, 4676-4693.*

Herramienta de análisis de dotaciones para buques de la Armada

Martínez Calle, Miguel Angel[1,*]

[1] Gabinete de Investigación Militar Operativa y Estadística de la Armada. «gimoe@fn.mde.es»

* Autor principal y responsable del trabajo. «mmarc34@fn.mde.es»

Resumen

Una de las principales características de los buques de guerra de nueva generación es una mayor automatización de sus sistemas, lo que conlleva a su vez, una notable disminución del número de miembros que habrán de conformar sus futuras dotaciones. Asociada a dicha disminución, surge la necesidad de asegurar que los buques de guerra con dotaciones reducidas sean capaces de completar las misiones asignadas dentro de los límites de eficacia y seguridad establecidos. Así pues, desde un punto de vista de ingeniería concurrente, durante las primeras fases de diseño será necesario evaluar la dotación propuesta como si de un sistema más, del nuevo buque se tratara. En este sentido, una metodología que ayudara a analizar su desempeño durante una misión típica contribuiría a un eficaz diseño de dichas dotaciones.

En el Gabinete de Investigación Militar Operativa y Estadística de la Armada (GIMOE) se está desarrollando una herramienta estocástica de simulación que permitirá recrear una misión en la mar con la que se podrá analizar distribuciones y cargas de trabajo, así como el nivel de fatiga de cada uno de los miembros de la dotación, pudiendo de esta manera detectar tanto puestos críticos como sobredimensionados.

La herramienta de simulación de dotaciones de la Armada se ha desarrollado utilizando el lenguaje de programación C#, constando de módulos para carga de datos de configuración, creación de calendarios de sucesos, evaluación de niveles de fatiga, y simulación. El análisis de los resultados, no obstante, se está realizando con el lenguaje de programación para análisis estadístico R.

En este artículo se expondrá conceptualmente el funcionamiento de cada uno de los módulos de la herramienta de simulación haciendo especial hincapié en la metodología adoptada para la evaluación de los niveles de fatiga y explicando qué es lo que se espera de ella.

Palabras clave

Simulación, distribución de cargas de trabajo, factores humanos.

1. Introducción

A la hora de analizar la dotación propuesta para un nuevo buque de guerra se plantean una serie de cuestiones previas, entre las cuales cabe destacar:

1. ¿Existirá personal suficiente para acometer cada uno de los eventos que conforman un perfil de misión?
2. ¿Se encontrará disponible dicho personal?
3. ¿Se acometerá la misión dentro de los requisitos de seguridad y eficacia establecidos?

Las dos primeras se responden afirmativamente cuando en el diseño de la dotación se ha contemplado que existe el personal necesario para cada uno de los eventos que puedan acaecer durante un periodo de navegación estipulado y unos horarios de actividades determinados. Dichas cuestiones pueden verificarse mediante herramientas que simulen la distribución del personal en los diferentes eventos entre las fechas de inicio y fin de la navegación.

No obstante, el hecho de que las dos primeras cuestiones se cumplan no implica el cumplimiento de la tercera. Para que esto ocurra debe verificarse el hecho de que los horarios de actividades de todos los miembros de la dotación aseguren un mínimo y correcto descanso, de tal manera que los niveles de fatiga a lo largo del periodo de navegación no interfieran negativamente en las tareas que tengan asignadas.

Así pues, es deseable que la herramienta utilizada para analizar la dotación de un buque de guerra sea capaz de evaluar no solo una correcta distribución del personal sino también el nivel de cansancio que acumula cada uno de sus miembros a lo largo del periodo de navegación.

En el caso de los buques de guerra, se da la circunstancia adicional de que la forma típica de navegar para la mayoría de su personal es «a vigilancias», lo que en ocasiones implica turnos rotativos en los que cada día varía el horario de actividades y en consecuencia sus periodos de descanso, como es el caso de las navegaciones «a 3 vigilancias», donde se establecen ciclos de tres días con horarios diferentes para cada unos de ellos, en los que el personal se encuentra en un estado de *jet lag* continuado.

La herramienta de análisis de dotaciones de la Armada desarrollada en el GIMOE contempla esta situación en su módulo para el cálculo del nivel de fatiga, teniendo en cuenta la evolución de los ritmos circadianos y su incidencia en los cambios de horario.

2. Módulos

La herramienta consta de cuatro módulos desarrollados en C# y un módulo adicional de análisis de resultados desarrollado en R.

Figura 1. Estructura de la herramienta de análisis.

2.1. Módulo de carga de datos

La carga inicial de los datos necesarios para realizar la configuración de la herramienta se realiza a través de un módulo en el que mediante una estructura de base de datos se incorpora la siguiente información:

1) Datos de filiación de los miembros de la dotación *(ID personal, n.º plan de combate, empleo, servicio, destino, puesto administrativo, vigilancia asignada)*.
2) Eventos de perfil de misión *(tipo de eventos de perfil de misión, parámetros de distribuciones de probabilidad de eventos, listados de personal con cometidos en eventos)*.
3) Equipos y sistemas *(listado de equipos, parámetros de distribuciones de probabilidad de averías, frecuencia de mantenimientos, listados de personal con cometidos en averías y mantenimientos)*.
4) Compartimentos *(listado de compartimentos, frecuencia de limpiezas, listados de personal con cometidos en limpiezas de compartimentos)*.
5) Horarios *(horarios de actividades y vigilancias)*.
6) Prioridades *(relaciones de prioridad entre eventos)*.

2.2. Módulo generador de sucesos

El módulo generador de sucesos, implementa a partir de los datos de distribución de probabilidad tanto de eventos de perfil de misión (denominados «situaciones especiales») como de averías de equipos y sistemas, un calendario de sucesos aleatorios distribuyéndolos entre las fechas de inicio y fin de navegación.

Dicho calendario, en combinación con los datos de periodicidad de mantenimientos y limpiezas (calendario de sucesos periódicos) constituye el calendario global de sucesos de toda la navegación.

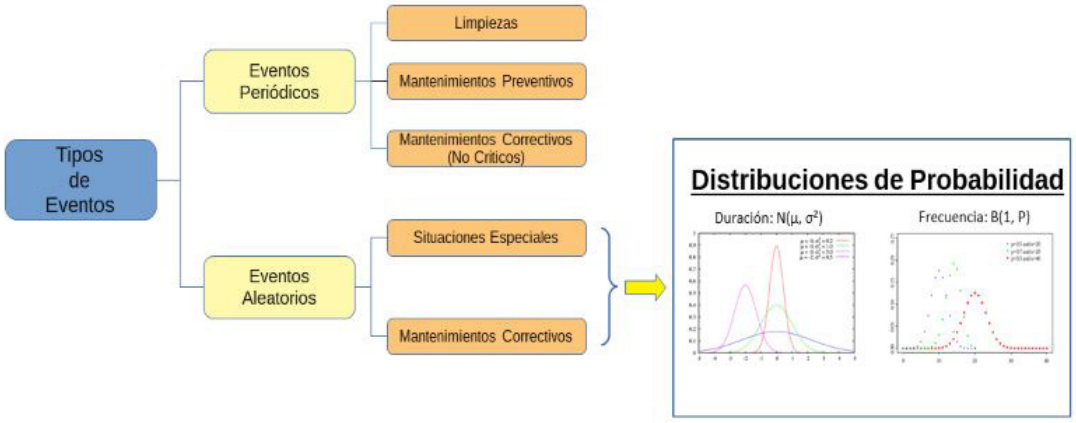


Figura 2. Tipos de eventos.

La herramienta diferencia entre mantenimientos correctivos críticos y mantenimientos correctivos no críticos. En el primero de los casos la reparación de la avería se acometerá de forma inmediata, mientras que en el segundo, al tratarse de una avería en un equipo o sistema «no crítico», se acometerá durante el horario de mantenimientos y limpiezas.

2.3. Módulo curva de fatiga

Para la evaluación de los niveles de fatiga de los miembros de la dotación se ha optado por un modelo sencillo basado en la combinación de dos curvas.

La primera de las curvas representa la degradación del estado de alerta durante el periodo de vigilia y su recuperación durante el periodo de descanso. Se han tomado inicialmente los valores de 960 y 480 minutos respectivamente para ambos periodos, iniciándose el primero de ellos a 08:00 horas. La parte correspondiente al periodo de degradación del estado de alerta se representa linealmente, mientras que la parte correspondiente al periodo de recuperación adopta forma parabólica.

La segunda curva representa la evolución del ritmo circadiano durante un periodo de 24 horas de acuerdo con la ecuación:

$$NF_{Circa} = n_0 + A\ \cos(\frac{2\pi x}{1440}) \qquad (1)$$

Siendo:

$$n_0 = -1.9\ \ Unidades\ de\ Fatiga \qquad (2)$$

$$A = 2.2\ \ \ Unidades\ de\ Fatiga \qquad (3)$$

La suma de ambas curvas genera una tercera que es utilizada para el cálculo del nivel de fatiga. Puede observarse una representación gráfica de todas ellas en la figura 3.

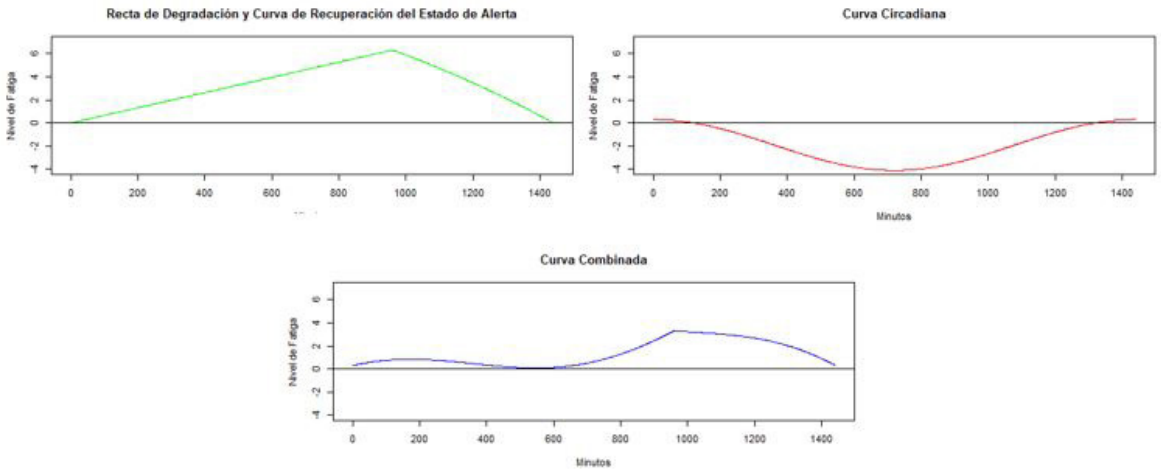


Figura 3. Curvas «nivel de fatiga».

2.4. Módulo de simulación

El módulo de simulación se nutre tanto de los datos de carga iniciales como de los datos proporcionados por el módulo generador de sucesos (eventos periódicos + eventos aleatorios).

La simulación se efectúa en dos etapas, una primera en la que para cada minuto de simulación se comprueban «eventos lanzados», «eventos en cola» y «eventos en curso» y en la que de acuerdo con la relación de prioridades entre eventos y la disponibilidad de miembros de la dotación para cada unos de ellos,

se modifica la situación de los eventos y se designa al personal involucrado en los mismos quedando registrada toda la información actualizada en diferentes archivos de datos.

En una segunda etapa, se realiza la evaluación de los niveles de fatiga para cada uno de los miembros de la dotación a partir de los datos registrados durante la primera etapa de simulación y los datos de configuración del módulo de nivel de fatiga, incorporando la nueva información generada en los archivos de datos.

2.5. Módulo de análisis

El análisis de los datos generados por el módulo de simulación y registrados en los correspondientes archivos es realizado mediante algoritmos de extracción de información creados utilizando el lenguaje de programación R.

En dichos archivos se encuentran registrados entre otros, los siguientes datos:

REGISTRO DE DATOS	
Eventos	Minuto en el que un evento es lanzado
	Minutos en los que un evento entra en cola
	Minutos en los que un evento entra en curso
	Minuto en el que un evento es finalizado
Personal	Evento en el que se encuentra involucrado
	Minutos totales involucrados en evento
	Franja de actividad en la que se encuentra
	Nivel de fatiga

Tabla 1. Registro de datos

Gracias a los datos generados es posible obtener información sobre: eventos fallidos, eventos completados, identificar personal crítico, detectar destinos con carencia de personal o cuantificar el tiempo que ha dedicado cada persona a cada uno de los eventos en los que se ha encontrado involucrado.

En lo que respecta a los niveles de fatiga de cada uno de los miembros de la dotación, la herramienta proporciona además, gráficas que permiten visualizar el estado de los mismos en cualquier momento de la navegación.

En la figura 4 se representa la evolución de los niveles de fatiga de un miembro de la dotación que no navega a vigilancias y en consecuencia mantiene un mismo horario durante los 20 días que dura la simulación. Puede apreciarse que los niveles máximos de fatiga son constantes, como cabría esperar en situaciones en las que el personal disfruta de periodos iguales de descanso siempre a la misma hora.

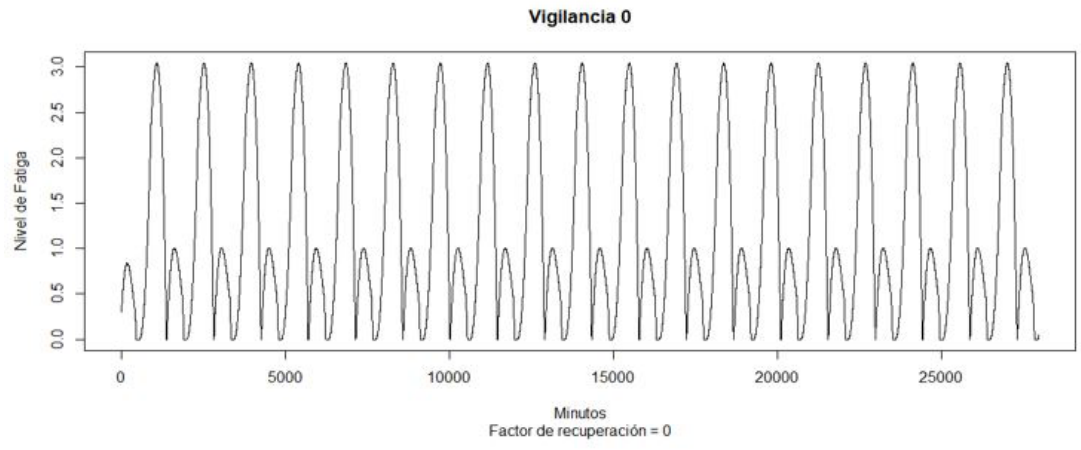


Figura 4. Curva de fatiga. Personal «no vigilancias».

La figura 5, no obstante, representa el nivel de fatiga de un miembro de la dotación que navega a «3 vigilancias». Puede observarse cómo al inicio de la navegación los niveles de fatiga aumentan abruptamente manteniéndose sus máximos dentro de unos determinados límites.

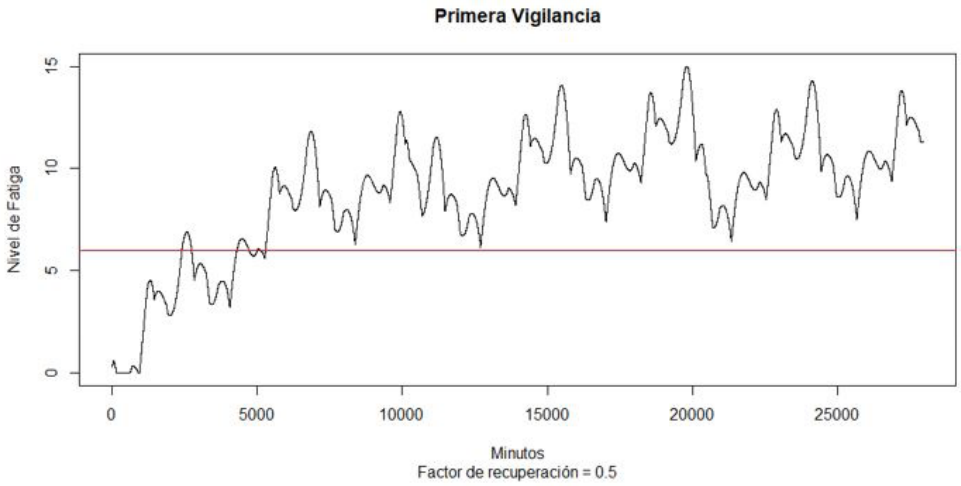


Figura 5. Curva de fatiga. Personal «3 vigilancias».

3. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos durante las primeras pruebas realizadas, puede asegurarse que herramientas de este tipo pueden servir de gran ayuda a la hora de diseñar las dotaciones de los nuevos buques de la Armada. No solo eso, sino que también pueden ser utilizadas para el análisis de unidades en servicio ya existentes y adoptar en consecuencia las medidas y correcciones que se estimen oportunas, ya sean de carácter orgánico o doctrinal.

Dentro del ámbito del GIMOE, se espera seguir desarrollando y evolucionando la herramienta. Uno de los campos de estudio que se abren es el de desarrollo de modelos basados en la experimentación a bordo de buques durante periodos prolongados de navegación para la obtención de curvas de fatiga en situaciones específicas.

Referencias

1. *Johnson JA, Osborn DB, Previc FH, Prevost GL II. Human systems integration/manning reduction for LHD-Type ships. Technology Review Journal. 2005. Fall/Winter.*
2. *Hursh SR, Redmond DP, Johnson ML, Thorne DR, Blenky G, Balkin TF, Storm WF, Miller JC, Eddy DR. Fatigue models for applied research in warfighting. Aviation, Space and Environmental Medicine.2004. Vol. 00, N.º 0.*
3. *Fiorica V, Higgins EA, Iampietro PF, Iategola MT, Davis QW. Physiological response of man during sleep deprivation. Journal of Applied Physiology. 1968 24(2):169-175.*
4. *Costa G. The problem: Shiftwork. Chronobiol. Int, 1997 14(2):89-98.*
5. *Comperatore C, Bloch C, Ferry C. Incidence of sleep loss and wakefulness degradation on a U.S Coast Guard Cutter under exemplar crewing limits. Technical Report for Coast Guard Research and Development Center. 1999.*
6. *DiDonato L, Famme JB, Nordholm A, Lemon A. A total ship-crew model to achieve human systems integration. Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (I/ITSEC).2004. Paper N.º 1564.*

Caracterización del flujo aerodinámico sobre la cubierta de vuelo de una fragata

Ogueta-Gutiérrez, Mikel[1], Riola, José María[2], Gómez Ortega, Omar*[1], Meseguer-Garrido, Fernando[1], Perez-Álvarez, Javier[1], Franchini Longhi, Sebastián[1]

[1] Instituto Universitario de Microgravedad Ignacio da Riva. Correos electrónicos: mikel.ogueta@upm.es (MOG), omar.gomez@upm.es (OGO), fernando.meseguer@upm.es (FMG), javier.perez@upm.es (JPÁ), s.franchini@upm.es (SFL).

[2] DGAM-MINISDEF. Correo electrónico: josemaria.riola@upm.es (JMR).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: omar.gomez@upm.es (OGO).

Resumen

Las operaciones con helicópteros en los buques de guerra tipo fragata pueden volverse críticas con un alto estado de la mar. Debido al flujo no estacionario y los grandes gradientes de velocidad media, la envolvente para las operaciones de vuelo está limitada, siendo la aproximación a la cubierta de vuelo una de las maniobras más complejas y arriesgadas que se puede realizar con un helicóptero.

En general, las cubiertas de vuelo de las fragatas se sitúan en su popa, por lo que el flujo aerodinámico en esta zona se encuentra definido por la estela que produce la obra muerta o superestructura del buque. Dicha estela se caracteriza por ser altamente turbulenta y por la aparición de intensos torbellinos que dependen de la geometría del barco corriente arriba de la cubierta de vuelo. La caracterización de este complejo flujo afecta directamente a la seguridad en la operación de la aeronave y permite definir los límites para los que la cubierta de vuelo puede estar operativa o ser certificada.

En este trabajo se presentan resultados parciales de una extensa campaña de ensayos en túnel aerodinámico sobre un modelo a escala de una fragata F-110, cuyo objetivo es caracterizar el flujo en el entorno de la cubierta de vuelo de esta fragata. Para ello se han realizado ensayos de visualización del flujo con técnicas de penacho de lana y humo, anemometría de hilo caliente, anemometría láser por imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés). Todos los ensayos se han realizado en las instalaciones de aerodinámica experimental del Instituto Universitario «Ignacio Da Riva» de la Universidad Politécnica de Madrid.

Palabras clave

Aerodinámica, ensayos, cubierta de vuelo, anemometría, optimización estructural.

1. Introducción

La optimización de la cubierta de vuelo de una fragata es un proyecto en sí mismo, que necesita de simulaciones y ensayos con modelos a escala en un túnel de viento. Esta necesidad sigue manteniendo nuestra atención cuando nos encontramos con accidentes como el del helicóptero MH-60S Knighthawk, que participaba en la Operación *Enduring Freedom*, en la cubierta de vuelo del USS William P. Lawrence, el 22 de septiembre de 2013, tras recibir una *rogue wave* justo después de que el helicóptero hubiera aterrizado en la cubierta de vuelo. La combinación entre la ola, la velocidad del barco y la caída del rumbo que mantenía el buque colocaron a este en *quartering seas* causándole una gran escora que permitió que las olas alcanzasen su cubierta y lo deslizara fuera de la cubierta.

Figura 1. Helicóptero MH-60S Knighthawk (fuente: US Navy).

Otro ejemplo preservativo fue el accidente del helicóptero U.S. Army H-60 que sufrió un duro golpe contra la cubierta de vuelo del Military Sealift Command (MSC), US Red Cloud (T-AKR-313), dejando 7 heridos durante el ejercicio llevado a cabo el 12 de agosto de 2015 a unas 20 millas al este de Okinawa, Japón.

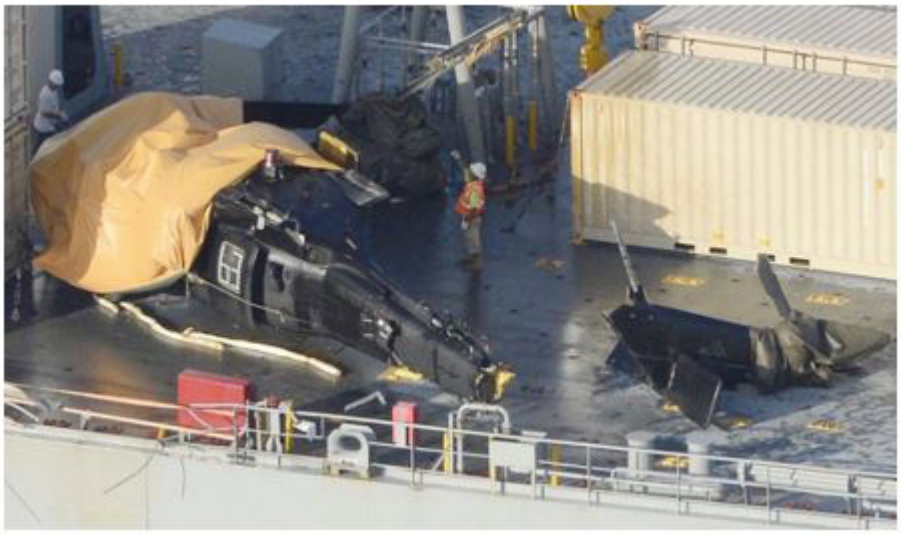


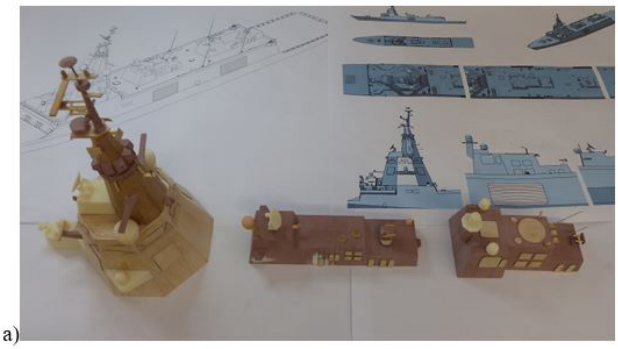
Figura 2. Restos del H-60 sobre la cubierta del US Red Cloud (fuente: US Navy).

Estos ejemplos muestran la necesidad de estudiar y optimizar la seguridad de los diseños de las cubiertas de vuelo para facilitar lo más posible las tomas y despegues sobre ellas. En el presente artículo, se ha estudiado la aerodinámica de la cubierta de vuelo de la futura serie de fragatas tipo F-110 en base a una completa batería de ensayos en las instalaciones de aerodinámica experimental del Instituto Universitario «Ignacio Da Riva» de la Universidad Politécnica de Madrid.

2. Montaje experimental

El modelo de ensayo se ha fabricado a una escala de 1:80, y se han empleado diferentes técnicas de modelismo para ensayos, componentes en madera, impresión 3D y fresado por control numérico. Para ello, se han empleado diferentes tipos de materiales: plástico ABS+ para la impresión 3D, una resina isotrópica (marca comercial Necuron) para el fresado por control numérico y diversos tipos de madera para la carpintería. La figura 3 presenta dos imágenes en una etapa intermedia de la construcción del modelo.

a)



b)

Figura 3. Dos imágenes del proceso de construcción. Arriba, elementos de la superestructura ensamblados, abajo, elementos durante el proceso de ensamblado y parte del casco.

2.1. Cargas globales sobre la fragata

El modelo de fragata se ha colocado sobre dos células de carga modelos F/T Sensor Gamma ATI SI-130-10. Estos sensores permiten conocer con detalle las fuerzas y los momentos que sufre la fragata en tres ejes.

Simultáneamente se ha medido la presión dinámica, mediante un tubo de pitot y una cápsula de presión diferencial. Mediante estas medidas, se pueden calcular los coeficientes aerodinámicos de la fragata. De acuerdo con la nomenclatura empleada normalmente en cargas sobre barcos (ver (1)), tales coeficientes se calculan de la siguiente forma:

$$c_X = \frac{f_x}{q_\infty A_f} \qquad (1)$$

$$c_Y = \frac{f_y}{q_\infty A_s} \qquad (2)$$

$$c_K = \frac{m_x}{q_\infty A_s (A_s/L_{oa})} \qquad (3)$$

$$c_N = \frac{m_z}{q_\infty A_s L_{oa}} \qquad (4)$$

donde f_i es la fuerza en cada uno de los ejes $i=x,y$; m_i; es el momento en cada uno de los ejes $i=x,z$; q_∞; es la presión dinámica; A_f es la proyección del área frontal; A_s es la proyección del área lateral; L_{oa} es la eslora de la fragata, y c_X, c_Y, c_K y c_N y son los coeficientes de fuerza longitudinal, transversal y de momentos longitudinal y vertical, respectivamente. El eje x va en dirección popa-proa, apuntando hacia esta última, el eje y va en dirección babor-estribor, apuntando a este último y el eje z apunta hacia abajo, formando un triedro a derechas. Esta elección de ejes se ha realizado para ser coherente con otras referencias consultadas en la literatura (2, 3).

En estos ensayos se ha variado el ángulo de guiñada, β, de la fragata respecto al viento. Se ha estudiado el comportamiento a lo largo de los 360º, con pasos de 5º. El caso de β=0º corresponde al viento incidiendo por proa, β=90º corresponde al viento incidiendo por el costado de babor β=180°, corresponde al viento incidiendo por popa y β=270º corresponde al viento incidiendo por el costado de estribor. Para ello, todo el conjunto, modelo y sensores, se han colocado sobre un posicionador capaz de controlar la posición angular con gran precisión.

Además, de cara a evitar la posible presencia de la capa límite del túnel, todo el conjunto se ha montado elevado. La figura 4 presenta una imagen del modelo montado en el túnel aerodinámico.

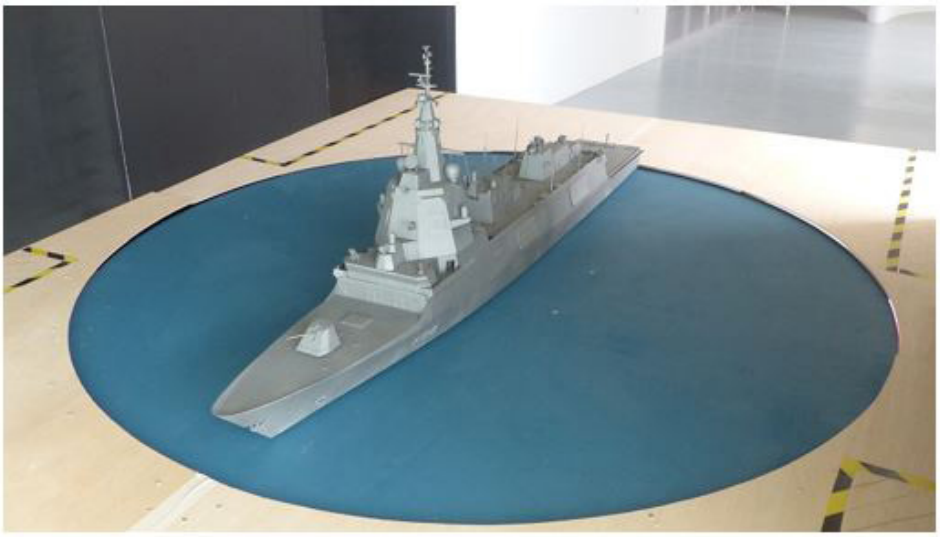


Figura 4. Modelo de la fragata montado en el túnel aerodinámico.

2.2. Visualización del flujo

Para realizar la visualización del flujo, se han empleado penachos de lana, que se han adherido a la zona del helipuerto, donde la caracterización del flujo es más relevante. Dichos penachos permiten visualizar si la corriente presenta fenómenos particulares (torbellinos, zonas de desprendimiento, flujo adherido…). También se ha empleado la técnica de visualización por humo, que se ha generado mediante el calentamiento de glicol, técnica muy empleada con este objetivo.

3. Resultados

3.1. Cargas globales sobre la fragata

La figura 5 presenta los resultados de los coeficientes de fuerzas en función del ángulo de guiñada, mientras la figura 6 presenta los resultados de los coeficientes de momentos en función del mismo ángulo. Como es de esperar, las cargas transversales (c_Y, c_K),) aumentan considerablemente cuando el viento sopla de babor o de estribor, donde se alcanzan los valores máximos.

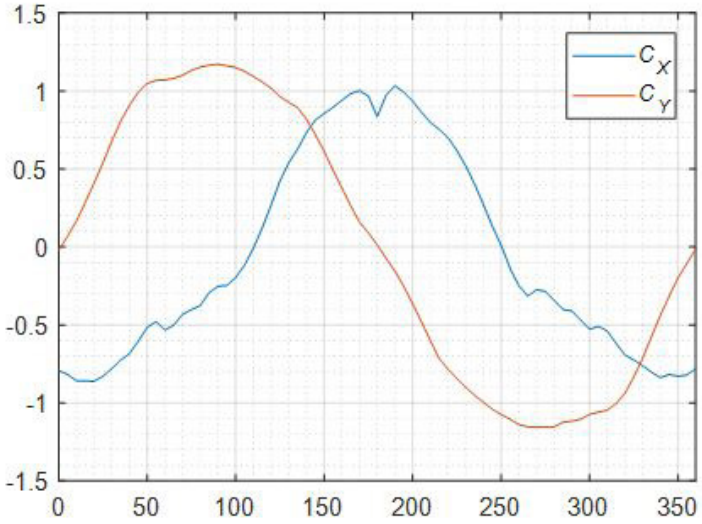


Figura 5. Coeficientes de fuerza frente al ángulo de guiñada.

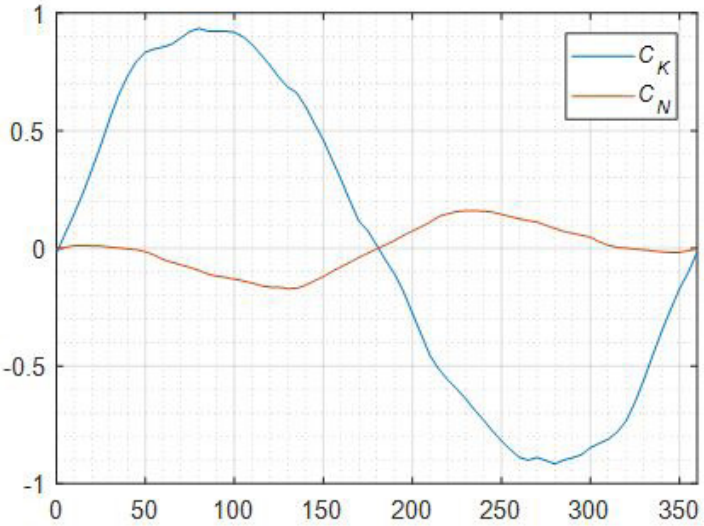


Figura 6. Coeficientes de momento frente al ángulo de guiñada.

3.2. Visualización del flujo

La figura 7 presenta una imagen de la visualización realizada con penachos de lana. En dicha figura, se puede ver cómo las lanas más cercanas a la popa se mantienen adheridas, mientras que las más cercanas al castillo tienen un comportamiento más variable. Por lo tanto es de esperar que en esa zona haya un flujo desprendido o una burbuja de recirculación, que hay que caracterizar correctamente para ver la influencia que puede tener sobre un helicóptero en una maniobra de aterrizaje.

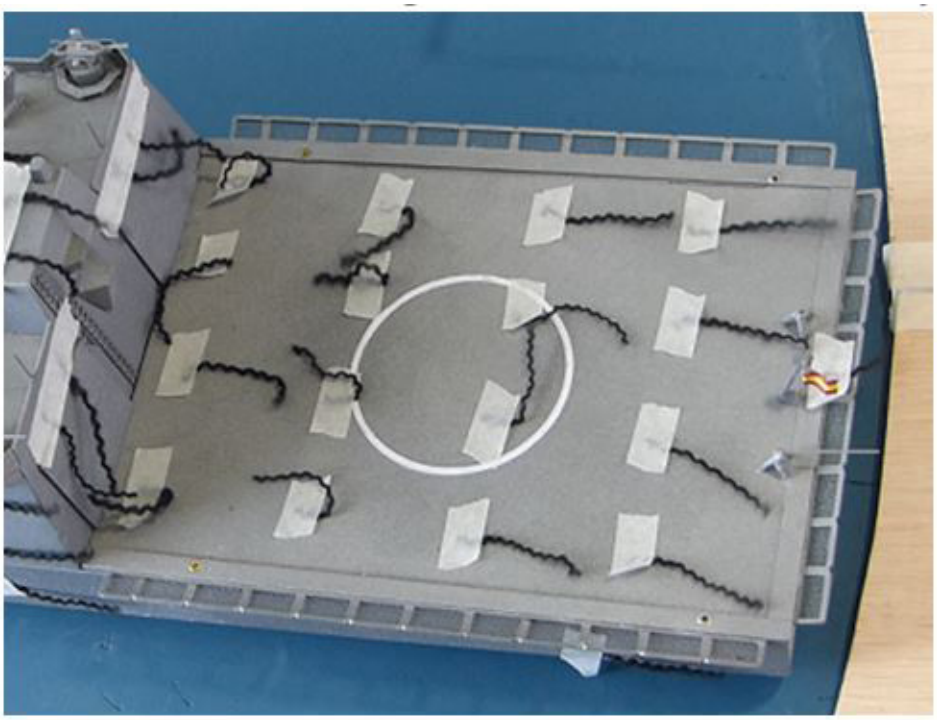


Figura 7. Visualización del flujo mediante penachos de lana.

La forma de la burbuja de recirculación se puede ver también en la figura 8. En dicha figura se aprecia que la capa de cortadura que se desprende del castillo se readhiere, aproximadamente, a mitad del helipuerto. Las flechas muestran, aproximadamente y de forma promediada, el comportamiento del flujo. La flecha roja indica la zona de recirculación y creación de torbellinos, mientras la flecha azul indica la parte del flujo que se readhiere al helipuerto. Estos resultados son consistentes con lo observado en la visualización del flujo mediante penachos de lana.

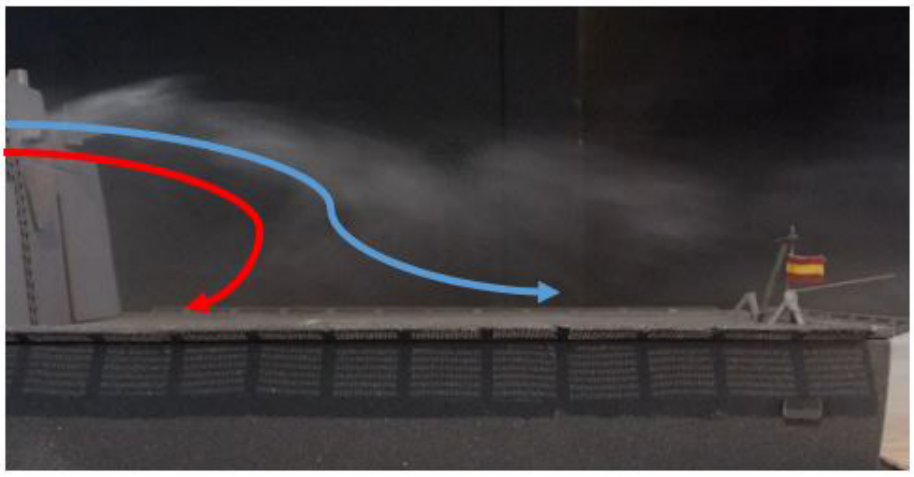


Figura 8. Visualización del flujo mediante humo.

4. Conclusiones

Se ha podido comprobar las importantes cargas aerodinámicas que aparecen sobre la fragata. Estas cargas son muy importantes en las fases de diseño del barco, y ayudan a un dimensionamiento correcto de la estructura. Además, se ha visto que el comportamiento aerodinámico es complejo en la zona del helipuerto, por lo que se realizarán nuevos ensayos de visualización y de caracterización del flujo mediante anemometría de hilo caliente.

5. Trabajo futuro

Se están realizando más ensayos sobre la nueva fragata. Entre ellos, cabe destacar la caracterización del flujo en el entorno del helipuerto mediante anemometría de hilo caliente y la medida de las cargas que sufre un helicóptero tipo en la maniobra de aterrizaje. De este modo, se podrá caracterizar de forma más completa el comportamiento aerodinámico de la fragata, y entender mejor las cargas que puedan presentar un helicóptero que esté aproximándose a la misma.

Referencias

1. *Ueno M, Kitamura F, Sogihnara N, Fujiwara T. A Simple Method to Estimate Wind Loads on Ships. Acem. 2012;(2005).*
2. *Aage C, Hvid SL, Hughes PH, Leer-andersen M. Wind Loads on Ships and Offshore Structures Estimated by CFD. In: Proceedings of the 8th International Conference on the Behaviour of Offshore Structures, BOSS'97. 1997.*
3. *Blendermann W. Parameter identification of wind loads on ships. J Wind Eng Ind Aerodyn [Internet]. 1994 May;51(3):339–51. Available from: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0167610594900671*

Sistema para la gestión de recursos embarcados y evacuación de un buque de guerra

Caparrós Jiménez, Jose Julio[1,*], Noguero Torres, Óscar[1], Coronel Toro, Antonio[1], Riola Rodríguez, Jose María[2], Pérez Villalonga, Francisco Javier[3]

1 GHENOVA Ingeniería. Ingeniero Telecomunicaciones (JJC), Ingeniero Naval (ONT), Ingeniero Industrial (ACT). Emails: jose.caparros@ghenova.com (JJC) autor principal, oscar.noguero@ghenova.com (ONT), antonio.coronel@ghenova.com (ACT).

2 ETS de Ingenieros Navales. Doctor Ingeniero Naval. Capitán de fragata: josemaria.riola@upm.es (CRR).

3 Jefe OSCP BAM. Doctor Ingeniero Naval. Capitán de fragata: fpervil@fn.mde.es (PPV).

* Autor principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: "mailto:omar.gomez@upm.es" omar.gomez@upm.es (OGO).

Resumen

De la experiencia en buques de pasaje por parte de GHENOVA, se identifican carencias relativas a los sistemas de evacuación ya desde la fase de diseño incluso en la propia normativa, y dicha incertidumbre por indefinición es aún mayor al hablar del apoyo operativo de la evacuación real del buque. Por la también dilatada experiencia en proyectos de buques militares, es inevitable entrar en comparativas, siendo evidente que en el ámbito militar se presentan escenarios de evacuación completamente diferentes a los recogidos en la normativa aplicable a los buques civiles. La progresión en los últimos años en los sistemas de información ha permitido plantear soluciones basadas en *hardware* y *software* que hace una década no habrían sido viables. Como solución a lo anterior se define un sistema jerárquico distribuido para la gestión de información de recursos embarcados y como base para los sistemas de evacuación del buque. Se define una arquitectura de control, con propuestas de *hardware* y *software* para la ayuda a la evacuación, incluyendo desarrollos en simulación de averías, simulación de fuego y humo, así como algoritmos propios para la simulación de comportamiento humano. Asimismo, se introducen diferentes sistemas de señales dinámicas como parte del proceso de optimización de rutas. Se realizan pruebas, protocolos de pruebas y se desarrollan especificaciones para la militarización del sistema, que se espera sea utilizado en la futura serie de fragatas F-110.

Palabras clave

EMERBUQUE, SIG2EM, gestión, evacuación, localización.

1. Introducción

Los sistemas embarcados han evolucionado en las últimas décadas en aras de un mayor control y automatización de los buques, especialmente los militares donde se ha realizado un gran esfuerzo para la reducción de sus dotaciones a bordo. En un buque militar están presentes una multitud de sistemas, desde genéricos del mundo naval hasta los más sofisticados sistemas de combate. Teniendo en consideración la experiencia adquirida de los implicados en diseño, construcción y operación de buques civiles y militares, la capacidad tecnológica y de computación actual, así como la tendencia a digitalizar la realidad en busca del llamado gemelo digital, se propone un sistema para la gestión de los recursos del buque y evacuación en buques de guerra.

El *objetivo* de la tecnología propuesta en este artículo es proporcionar un sistema de gestión de medios y recursos embarcados, no solo para atender las condiciones de combate o de emergencia del buque, sino también con fines de monitorización de la dotación y del personal embarcado ajeno a la dotación, también de formación y entrenamiento, así como de apoyo a las tareas de mantenimiento, inspección y ciclo de vida en general. El reto de la digitalización de la realidad va mucho más allá de la representación 3D de un espacio, incluye la necesidad de localización en tiempo real de recursos embarcados, tanto materiales como humanos, resolviendo las muchas restricciones y condicionantes, algunas propias de las operaciones del buque, otras derivadas del compartimentado como estibas en pasillos hasta mamparos que separan zonas de fuego, también las relativas a sistemas de comunicaciones cableadas ó *wifi*, las que provienen de los escenarios posibles de fuego y humo, y también las propias de un entorno en movimiento como son el asiento y escora del buque por citar algunas de ellas.

Los buques civiles deben cumplir con las reglas aplicables por las sociedades de clasificación (SSCC), con las notas de clase que se le exijan al buque, así como los códigos, convenios, recomendaciones y circulares adoptadas por la OMI. En buques militares se toman gran parte de estas normas como reglas de diseño además de otras propias como el *Naval Ship Code* (NSC), que aun con unos principios similares ofrece un enfoque más apropiado para cumplir los fines de dichos buques.

En base a sus objetivos funcionales se describen los requisitos operativos y para estos se dictan las soluciones para atenderlos, dedicando el capítulo VII a regular todo lo concerniente a escape, evacuación y rescate. Se destaca que el uso de soluciones HW/SW como la presentada deben cubrirla en todos sus puntos, aunque pueda superarla en otros. De hecho, la propia OMI regula esta circunstancia, MSC.1/Circ.1238 para el análisis de la evacuación de buques de pasaje, tanto para la validación como uso de métodos avanzados de análisis y cálculo de tiempos de evacuación mediante herramientas de simulación.

Desde hace años, muchas de las herramientas de diseño naval se han ido integrando como módulos de las principales *suites* de trabajo como FORAN, AVEVA, INTERGRAPH, NUPAS… al final, estas *suites* compiten por ofrecer soluciones integrales con la particularidad común de tener bases de datos interrelacionadas entre los diferentes módulos dentro de cada *suite*. El detalle de un modelo y sus características, con sus bases de datos asociadas cada vez más interrelacionadas y con mayor cantidad de campos, son

un punto de partida excepcional para, desde la fase de ingeniería, sentar las bases para la gestión de recursos materiales.

Los campos, metadatos, catálogos, especificaciones, localizaciones, árboles de producto… son términos comunes para los ingenieros y técnicos del sector naval desde hace años. La automatización y prefabricación en construcción naval es de hecho posible gracias a la implantación por parte de los astilleros de las dichas *suites*, para las que se disponen de pasarelas de información con las que se proporciona no solo ficheros de corte de chapas, isométricas de fabricación, secuencias de soldadura, por citar algunos sino también toda la información estructurada para el ensamblado de piezas y equipos en forma de árboles de producto.

El NSC en su Ch.VII Rg.4 recoge las directrices de inspeccion y manteniento relativos a escape, evacuación y medios de rescate, detallando incluso las periodicidades semanales y mensuales de inspección periodica de los medios de salvamento embarcados; pero el NSC no es prescriptivo sino que tiene una naturaleza basada en objetivos, se caracteriza en «qué» debe cumplirse más que «cómo» hacerlo. Los elementos dispuestos a bordo están etiquetados con placas rótulo, bridas o timbrados entre otros métodos identificativos. Es evidente la identificación digital de todos los elementos que emiten o reciben señales para su operación pero todavía hoy existe un gran número de elementos que se sabe que van a bordo sin réplica digital: dispositivos de salvamento, equipos de protección personal y estibas diversas, además de las propias personas embarcadas.

2. Estado del arte

Del análisis realizado, se deduce que el enfoque recomendable es el basado en agentes, que predice el movimiento de individuos discretos (personas virtuales) a través del espacio tridimensional. Esto contrasta con la vieja generación de modelos de partículas/personas como un flujo continuo. Permiten el análisis de congestiones, cuellos de botella y densidades excesivas de personas. Un agente es una entidad capaz de percibir su medio ambiente con la ayuda de sensores y actuar en ese medio, más concretamente, un agente es un ente computacional diseñado con un conjunto de acciones para funcionar bajo ciertas condiciones, que le permitan desenvolverse en un entorno virtual tomando decisiones por cuenta propia sin la intervención humana o de otros sistemas para cumplir un objetivo no necesariamente alcanzable. Las acciones programadas en el agente podrán afectar su entorno y se ejecutarán si se cumplen las precondiciones estipuladas en el diseño.

Muchos de los métodos de simulación de multitudes derivan del método propuesto por Dirk Helbing basado en la existencia de fuerzas sociales que repelen a los individuos condicionando su movimiento. Su mayor ventaja radica en la posibilidad de simular un comportamiento realista incluso cuando se produce contacto entre agentes, y por otra parte, cuando el agente se encuentra en una multitud con gran densidad de personas, este parece vibrar. Este enfoque es el principio de los llamados *modelos basados en fuerzas*. También existe la posibilidad de modelar el comportamiento humano de un individuo de acuerdo con una serie de reglas, y de ahí surgen los llamados *modelos basados en reglas*, donde el espacio puede dividirse en celdas, y cada celda tiene una probabilidad diferente de ser ocupada dependiendo de factores ambientales o sociales. Cuando dos agentes pretenden ocupar la misma celda, el de mayor velocidad será el que la ocupe y el otro intentará esquivarlo o se detendrá hasta que la celda se desocupe. Las celdas irán siendo ocupadas de acuerdo con reglas que determinan la probabilidad que tiene cada una de ser ocupada. Este modelo basado en reglas contempla la posibilidad de variaciones de la velocidad a lo largo del proceso de evacuación debidos a la variación de la densidad del flujo, existencia de un peligro o factores psicológicos que afecten a su movimiento.

Los sistemas de localización no ofrecen una solución única para cubrir todos los casos del buque, debido, entre otros motivos, al uso de estructuras metálicas en los múltiples mamparos y cubiertas, lo cual dificulta aún más el hecho de separar las señales, sin olvidar las muchas fuentes de ruido electromagnético presentes: cableado de potencia, equipos de navegación, radares y sistema de combate, por citar algunos. Por tanto, los enlaces «sin cable» no son válidos para traspasar todos los obstáculos existentes y obtener

las señales con la precisión necesaria para fijar las posiciones de forma inequívoca, por lo que se deben utilizar en paralelo diferentes tecnologías de localización y gestión de información. Entre las tecnologías clave para lograr los objetivos descritos se encuentran las tecnologías de posicionamiento en interiores. Existen múltiples tecnologías para posicionamiento *indoor*, pero ninguna se ha erigido aún como modelo de solución fiable, especialmente en entornos electromagnéticamente hostiles con fuerte presencia de componentes metálicos. Existen algunos sistemas basados en identificación de radiofrecuencia (RFID) a modo de contadores de entrada en locales, también receptores de señal de diferente naturaleza, que van desde campos magnéticos hasta señales *wifi*, *bluetooth*, *zigbee*,…

La cada vez mayor sonorización de equipos, con miles de señales y alarmas, son fundamentales para gestionar las operaciones de bombas, motores, válvulas,... equipos normalmente estáticos, a diferencia de los medios de salvamento que durante la evacuación pueden estar o no en su sitio, por lo tanto su localización es necesaria no solo para inspección, inventariado y mantenimiento sino también para la operación asociada a la evacuación. El sistema integrado de control de plataforma (SICP) centraliza la mayor parte de la información del buque que recopila de los diferentes sistemas y subsistemas, actuando en situación de emergencia como si de una central de alarmas se tratara. El SICP ofrece no solo reporte del estado actual del buque sino que cada vez más incorporan simuladores como en el caso de averías. El cálculo de tiempos de evacuación va condicionado a los procedimientos de abandono del buque, en las siguientes imágenes se muestran los requisitos mínimos para cálculo de tiempos según dicta la OMI en la MSC.1/ Circ.1238, que sustituyó a la 1033, ante una situación genérica de abandono y, en la otra imagen, la casuística de situaciones que se producen en los buques militares, en este caso según la doctrina de la Armada para dicho proceso de abandono del buque.

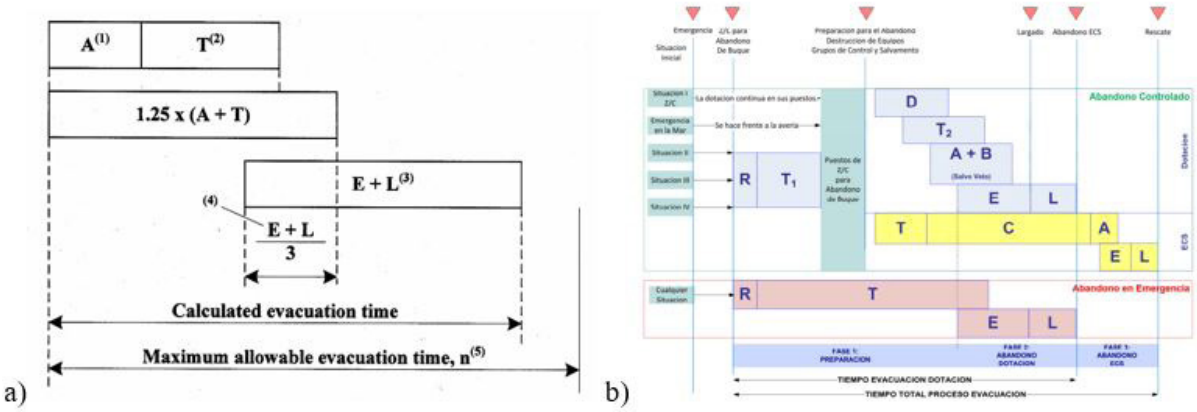


Figura 1. Representación estándar de abandono según OMI MSC.1/Circ.1238 y según la Armada.

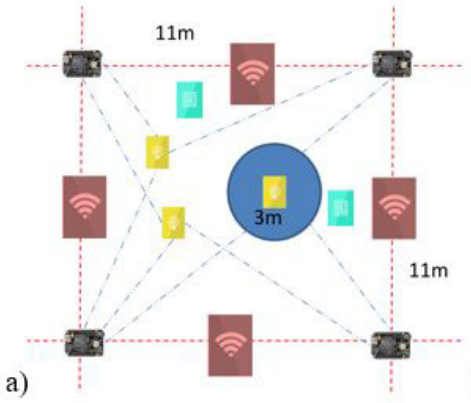
En buques civiles, se definen tiempos máximos para dar el aviso (A), tránsito de gente (T) hasta los puntos de encuentro y tiempos de embarque (E) y lanzamiento (L) de los medios de salvamento previstos. En buques militares pueden darse diferentes situaciones: que sea controlado o urgente, arriado vetdo de balsas o no, destruccion de documentos o inutilizacion de equipos entre otros. Según se refiera a la dotacion o a grupos especiales de control y salvamento, se producen diferentes situaciones para las que variarán los tiempos de reaccion (R), tránsito (T), destrucción (D), lanzar y trasladar balsas (A+B), embarque (E) y largar amarras (L). No es suficiente llegar a un punto de encuentro o medio de salvamento, sino que este debe estar localizado, disponible y operativo. Por tanto, la localizacion y gestion de medios es un condicionante crítico para el éxito de la evacuación.

3. Desarrollo del sistema

En una situación genérica, en un instante determinado, surge la necesidad de abandonar el buque y el comandante da la orden de hacerlo. Se emite la señal de abandono del buque, con cada persona en un sitio concreto (localización) y la necesidad de desplazarse (ruta de escape) hasta los puntos de encuentro.

Algunos van de forma directa y otros tras realizar determinadas tareas (procedimiento), mientras que en el tránsito se tienen indicaciones (señalética) pudiendo haber condicionantes particulares en el camino (averías, inundación, fuego, humo…); la situación es crítica y puede ser caótica, pero todos esperan que los dispositivos de salvamento estén disponibles o que se sepa cuáles no lo están por haber sido dañados (gestión de medios), que las instrucciones del personal no sean contradictoras (jerarquía y comunicación), y tampoco dejar desatendida a gente por error en el procedimiento ni fallo de los sistemas previstos (redundancia y seguridad).

Mediante una malla de nodos distribuida por las diferentes cubiertas del buque, inicialmente prototipada usando placas Beaglebone Black aunque extensible a otro *hardware* como puedan ser los PLC, y formando una arquitectura jerárquica distribuida se realiza una triangulación para determinar la posición de cada agente, es decir, persona física a bordo. La triangulación se obtiene según la intensidad de la señal *Bluetooth* (BT) que reciben los llamados nodos de monitorización (NOMO) de los emisores portátiles que llevan cada agente. De las pruebas realizadas se consigue una precisión media de 3 metros.



b)

POTENCIA TX	DISTANCIA [m]							
	1,25	3,3	4,55	5,8	7,05	8,3	9,55	10,8
0 [-23dBm]	x	x	x	x	x	x	x	x
1	-93, x	x	x	x	x	x	x	x
2	-91, -93	x	x	x	x	x	x	x
3	-88, -90	-91, x	x	x	x	x	x	x
4	-84, -90	-91,-93	x	x	x	x	x	x
5	-78, -83	-85, -90	-86, -93	x	x	x	x	x
9	-69, -75	-77, -85	-80,-88	-83,-91	-78,-91	-78,-91	-84,-87	-80,-90,x
10	-71, -73	-72,-75	-76,-81	-82,-90	-76,-84	-81,-90	-81,-92	-78,-92
11	-69,-80	-67,-73	-76,-81	-81,-87	-74,-85	-78,-92	-79,-85	-79,-90
12	-64, -71	-71,-77	-73,-78	-79,-89	-78,-87	-76,-90	-77,-84	-75,-90
13	-63, -71	-67,-70	-72, -78	-79,-91	-79,-85	-73,-90	-76,-84	-75,-81
14	-61, -67	-65,-69	-70,-75	-77,-90	-71,-87	-75,-92	-76,-79	-73,-85
15[+3dBm]	-60, -67	-63,-70	-68,-73	-74, -91	-69,-78	-73,-91	-72,-80	-73,-85

Figura2. Esquema simplificado de la malla de NOMOS y ejemplo de tabla de resultados

Con el diseño del buque se definen las zonas de paso y rutas de escape previstas para las diferentes condiciones de operación. Debido a la dinámica real de la situación, para el sistema desarrollado se introducen señales dinámicas en sustitución de las señales estáticas tradicionalmente presentes para la evacuación. Mediante el uso de paneles dinámicos o luces en pasillo se consigue informar al personal a bordo de la ruta de escape adecuada para el escenario. Por ejemplo, un pasillo que desemboca en una zona de fuego o inundada, muestra información actualizada de la posibilidad de tránsito en ese sentido. Ante un fallo del sistema o pérdida de alimentación del panel, este muestra la información equivalente al sistema estático. Así pues, ante fallo, la peor información suministrada es la que equivale a la actualmente disponible sin el sistema implantado. La evolución de inundación, fuego y humo se predice con el uso de simuladores específicos con los que se tiene una visión no solo del estado actual detectado por los sensores distribuidos por el buque sino también de la evolución prevista para dichas averías. Tras analizar diferentes SW se ha optado para utilizar una SW de simulación de fuego y humo como beta test del sistema, los resultados se importan de forma favorable y fácil a una disposición general, y aunque el factor limitante es el tiempo de cálculo de dichas simulaciones, esto se resuelve con la definición de una batería de escenario y permitiendo seleccionar una u otra por comparación.

La influencia de la escora durante el tránsito de agentes es conocida pues existen tablas de respuesta del personal civil y militar. Para averías por inundación se ha desarrollado un sistema que resuelve dicha situación dinámica, igualmente se pueden utilizar los disponibles en el SICP. Con el desarrollo del sistema se confirma que, aun con la alta capacidad de procesado y cálculo actual, no es viable hacer análisis de evolución de averías, especialmente fuego y humo, en tiempo real según datos de sensores, pero si utilizar la capacidad de almacenamiento menos limitada para tener escenarios precargados de la evolución más probable en cada caso según saltan los sensores.

Actualmente se dispone a bordo de modelos 3D del buque y se tienen diagramas lógicos de los principales sistemas que permiten no solo monitorizar las operaciones sino actuar sobre los componentes de forma remota. Desde la fase de ingeniería se dispone de modelos tridimensionales con alto grado de detalle y con bases de datos que incorporan multitud de metadatos. El sistema presentado considera así las etiquetas (TAG) ya definidas desde ingeniera como identificadores unívocos en el buque, creando etiquetas RFID leíbles por el sistema mediante arcos de paso o lectores portátiles según la localización y planteamiento final de cada implantación. En una red mallada, todo nodo de la red debe poder colaborar en el enrutamiento de las comunicaciones. Suele distinguirse el caso particular de las redes malladas donde además los nodos participantes son móviles y por tanto cambian dinámicamente sus enlaces de comunicación con otros nodos. Entre las tecnologías más relevantes cabe destacar:

1) OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*)
2) B.A.T.M.A.N. (*Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking*).

OLSR funciona construyendo tablas de enrutado, y para ello cada nodo envía de forma regular y proactivamente mensajes de control a los MPR. Estos construyen las tablas de enrutado usando técnicas similares a las de los algoritmos de enrutamiento *link-state routing* (como OSPF) y aseguran que el enrutamiento sigue caminos óptimos. El hecho de que cada nodo envíe periódicamente mensajes de control para que los MPR lo tengan en cuenta en las tablas de enrutamiento, dificulta el uso del protocolo en redes con dispositivos durmientes.

El propósito del proyecto B.A.T.M.A.N. es superar carencias y problemas de OLSR. La versión actual es el B.A.T.M.A.N. Advanced, que utiliza los algoritmos de B.A.T.M.A.N. pero enrutando a nivel 2 IP (capa de enlace de datos). De esta forma toda la comunicación y configuraciones de TCP/IP funcionan de forma transparente y no es necesario modificar las tablas de enrutamiento del sistema. El sistema desarrollado se basa en un sistema de comunicaciones con colas de mensajes asíncronos a través del que se comunicarán los nodos del sistema. Este se ha desarrollado sobre lenguaje Java para todos los tipos de nodos de la arquitectura, a excepción del desarrollo del *software* de bajo nivel para el control de los módulos físicos de comunicaciones en los NOMO, que se realizará en lenguaje C. Para conseguir una arquitectura de sistema distribuida con requisitos de escalabilidad y tolerancia a fallos, se desarrolla un *middleware* de comunicaciones que proporcione un sistema de intercambio de mensajes asíncrono, confiable, ligero, con posibilidades de distribución de la carga y con soporte para distintos modelos de comunicación (punto a punto, publicación/subscripción, *multicast*, etc.).

Los diferentes subsistemas hacen que sea posible considerarlo con un sistema integral de gestión de medios con capacidad de comunicación con el SICP, o limitarlo a un sistema de localización, monitorización, ayuda a la evacuación o simulación. Una instalación embarcada implica la distribución *hardware*, el tendido de cableado de comunicación y su alimentación, así como configuración y puesta en marcha del *software* con la estructura de datos y modelos de comunicaciones. Al haberse desarrollado simuladores, estos pueden implantarse de forma aislada para fines como la evolución de inundación en el simulador de averías o en el de evacuación, o respuesta de agentes ante parámetros para los que se ha previsto la herramienta de comportamiento humano desarrollada, que permite categorizar cada agente con multitud de parámetros:

1. Características demográficas: sexo, edad, peso, velocidad en pasillo y escaleras (descenso y ascenso).
2. Localización: posición en el buque en el momento de iniciar la simulación, y capacidad para hacer seguimiento del mismo en cada momento.
3. Comportamiento: capacidad de liderazgo y tendencias a seguir la ruta, evitar el peligro, seguir grupos o familiares, al pánico, a seguir en dirección contraria a la evacuación…

Todos ellos, condicionantes del vector velocidad y ruta finales de cada agente hasta hacer efectiva la evacuación. Teniendo localizadas las personas a bordo y cruzando esta información con las fichas de

gente, pueden realizar sesiones de adiestramiento de personal, ya sean infantes previo embarque o del propio personal de la Armada entre otros.

4. Escenarios de aplicación

El sistema propuesto puede funcionar de forma independiente y aislada del resto de sistemas. Ofrece una arquitectura de comunicaciones y de control completa, dado sus múltiples nodos inteligentes y sistema de compartición de la información, si bien está preparado para integrarse dentro del sistema de control de cualquier embarcación, ofreciendo una modelo de datos accesible por TCP/IP con la información de las señales recogidas por los nodos. El sistema está preparado para su integración en el sistema integrado de control de plataforma (SICP) desarrollado por Navantia, constituyendo un módulo adicional que permite el intercambio de información, lo cual es necesario en cuanto que dicho sistema de control actualmente recoge señales que utiliza el sistema propuesto y son necesarias para la elección de la ruta óptima.

Aunque el motor de simulación puede ser utilizado en fase de diseño, está preparado para incorporarse a bordo, tanto para la simulación de evacuación predictiva como para *training*. Dentro del concepto de «gemelo digital», que atañe no solo al modelo virtual sino al intercambio que se producen entre la realidad y su homólogo digital, los sistemas de localización y el motor de simulación del sistema propuesto permiten reproducir en el mundo digital lo que ocurre dentro del barco a nivel de movimiento de personal. Para implementar el concepto de gemelo digital, el siguiente paso será dotar al motor de simulación de algoritmos de IA para su propio autoaprendizaje, y que el simulador se convierta en una herramienta para reproducir los comportamientos reales de la tripulación en cada momento, lo que supondría una implementación de gemelo digital a nivel de comportamiento de la tripulación a bordo.

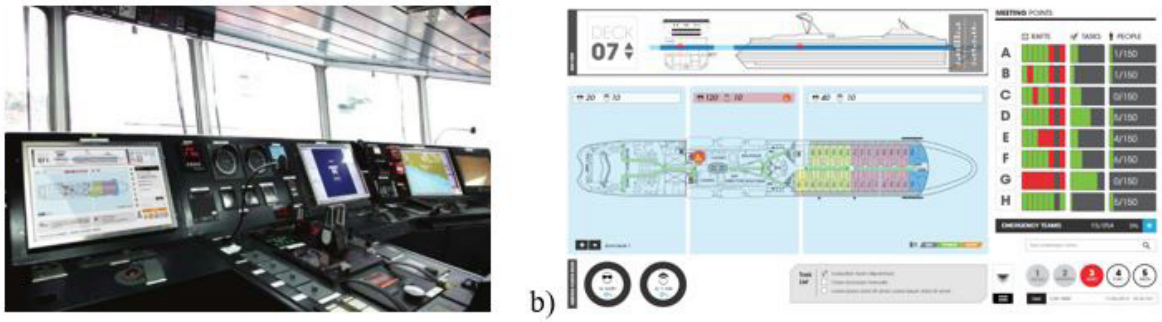


Figura 3. Ejemplo de interfaz en puente de gobierno y HMI en «modo alerta».

En la actualidad, el sistema importa la geometría del barco representando las cubiertas y mostrando datos de tripulación, pasaje, rutas dinámicas, medios de evacuación, señales de fuego, de inundación o de humo, pudiendo completarse con más información adicional, que en su conjunto permiten visualizar la situación del barco en cada instante, también en el exterior para buques de apoyo, lo cual es fundamental en caso de accidente en la mar. La embarcación sigue disponiendo de sus rutas estáticas y medios tradicionales de evacuación, y el sistema es una ayuda cuyas rutas dinámicas pueden activarse o no, dependiendo de la decisión del comandante.

La *localización de personal* es fundamental para el buen funcionamiento del sistema, y en la actualidad la combinación de tecnologías es la clave para una localización fiable y robusta, permitiendo el sistema utilizar *Wifi*, *Bluetooth*, *ZigBee* o RFID, y dependiendo del compartimento del barco, se diseña una arquitectura *adhoc* para proporcionar una precisión de al menos 3 m en la localización de personas/medios. Esta arquitectura de localización de personas y medios es el fundamento para el desarrollo de un *sistema integrado de gestión de medios y RRHH* dentro del barco, que tiene como fin adherirse a su *sistema de mantenimiento*. Esto supone un paso adicional para la creación del gemelo digital, al permitir reproducir la situación del barco en su homólogo digital en una fase diferente de su *ciclo de vida*, la de mayor duración, que es la de mantenimiento.

5. Conclusiones

Actualmente se está realizando un gran esfuerzo de inversión y desarrollo de la llamada Industria 4.0, sustentado en gran medida por la capacidad digital actual. El gemelo digital, aspiración a medio plazo de cualquier armada moderna, implica la posibilidad de replicar remotamente la situación y condición de una unidad de la armada, no solo con los elementos fijos del buque, sino también los de todas las personas y todas las estibas a bordo.

Para llegar al sistema actual se han conseguido los siguientes objetivos: se ha desarrollado un simulador de comportamiento humano funcional según IMO MSC/Circ.1238; se han definido las especificaciones de requisitos necesarios para la militarización del simulador; se ha desarrollado un simulador de averías funcional y fiable; se ha implementado una arquitectura de control y comunicaciones distribuida y robusta ante fallos; se ha completado un sistema de localización de personas y medios probados en entorno relevante; y finalmente, se ha diseñado un sistema de señalética dinámica viable y funcional para buques.

El objetivo último es el de disponer de una base de datos fiable que permita gestionar de forma eficiente esta información para su posterior procesado, representación digital y control remoto y en tiempo real. Para una visión completa del escenario en que se encuentra el buque, no es suficiente considerar los recursos materiales sino también los recursos humanos. Las tecnologías de adquisición de datos procedentes de sensores para medios y personal, estructura de datos e información, y por último, infraestructura de comunicación son los retos pendientes que abrirían el camino hacia una plataforma futura de gestión íntegra de la operativa de un buque dentro del concepto del gemelo digital. La implantación final del sistema viene necesariamente condicionada por la hoja de ruta tanto de los armadores, Armada en caso de ser un buque militar, y astilleros como catalizador tecnológicos más allá de encargarse de la construcción y entrega de los buques.

Referencias

1. *NATO/OTAN Standard ANEP-77. (2014). Naval Ship Code (NSC). Edition E Version 1. Nato Standardization Agency (NSA).*
2. *Pérez Villalonga, F.J. (2005). Thesis: Dynamic escape routes for Naval ships. Monterey California NPS (Naval Postgraduate School).*
3. *Pérez Villalonga, F.J. (2008). Tesis: La evacuación del buque de guerra: estudio del movimiento de personal en situaciones de emergencia. Universidad Politécnica de Madrid.*
4. *Riola J.M., Pérez Villalonga, F.J. (2008). Naval Ship Code, una nueva normativa internacional para buques de Guerra. Revista General de Marina.*
5. *Riola J.M., Pérez Villalonga, F.J. (2008). El abandono del buque. Revista General de Marina.*
6. *Riola J.M., Pérez Villalonga, F.J. (2008). Sistemas RFID: análisis de la evacuación del buque de guerra. Boletín de Observación Tecnológica en Defensa N.º 20.*

Empleo de vehículos submarinos en la Armada: presente y futuro

CN. Arcos Palacios, Rafael. Comandante de la Fuerza de Medidas Contra Minas

Fuerza de Medidas Contra Minas, Arsenal Militar. Calle Real s/n. 30201 - Cartagena

email: rafaelarcos@fn.mde.es

CF. Perales Garat, Luis. Oficial NCAGS Estado Mayor Fuerza de Acción Marítima

Cuartel General de la FAM, Calle Villamartín s/n, 30201 - Cartagena

email: luperga@fn.mde.es

Resumen

La Armada ha sido pionera en el empleo de vehículos submarinos en España. En particular, desde la llegada de los primeros PLUTO y su entrada en servicio en los cazaminas clase *Guadalete*, diferentes unidades de la Fuerza de Medidas Contra Minas (FMCM) han innovado, aprendido y mejorado el empleo de los vehículos submarinos.

Actualmente la FMCM emplea con profusión vehículos operados por control remoto (*Remotely Operated Vehicles-ROV*) para el desempeño rutinario de sus cometidos de identificación y neutralización de minas y otros artefactos explosivos submarinos. Otras unidades de la Armada, como el Centro de Buceo de la Armada e Instituto Hidrográfico emplean vehículos similares, todos de fabricación extranjera.

Las tendencias de futuro –ya realidad en varias marinas de nuestro entorno y que marcan la tendencia de actuación– suponen el empleo cada vez más extendido de medios no tripulados (*Autonomous Underwater Vehicles-AUV*), que aparte de navegación autónoma, integran nuevos sensores de altísima resolución tales como sónares de barrido lateral, perfiladores de fondo, sónares de apertura sintética, y fotografía acústica entre otros.

Durante el pasado ejercicio ESP MINEX 18 (30 abril-11 mayo), la Armada contó entre sus participantes con la presencia de 7 AUV de 6 modelos diferentes, aportados por naciones aliadas. La experiencia adquirida en el empleo táctico de estos vehículos, el desempeño operativo, sus capacidades y medios de detección y clasificación en condiciones demandantes, así el conocimiento –también muy valioso– de sus limitaciones, conforman un catálogo de información evaluada que podría realimentar positivamente los desarrollos tecnológicos realizados hasta la fecha por la industria nacional en esta nueva y prometedora disciplina.

Todas estas tecnologías implementadas en los AUV son de uso dual, civil y militar, y disponen de un amplísimo potencial de desarrollo y de mercado, que incluiría, además de su potencial uso militar, a agencias civiles especializadas tales como Salvamento Marítimo, Instituto Español de Oceanografía, Arqueología Submarina entre otros. La conjunción de esfuerzos de investigación y desarrollo en este campo supondría un notable impulso a la industria nacional, y la obtención de una capacidad autónoma propia, con unas esperanzadoras perspectivas de retorno de la inversión.

Palabras clave

Vehículos submarinos, *Autonomous Underwater Vehicles*, sónares de barrido lateral.

1. Introducción

Muchas y múltiples han sido las aportaciones de investigadores y científicos españoles en el ámbito submarino y de control remoto de vehículos. Y aunque no todas han sido fructíferas, el submarino de Peral (1888) fue indudablemente un precursor para su época, y el Telekino de Torres Quevedo[1] (1903) prefiguraba cómo iban a funcionar los futuros medios por control remoto. Tampoco son de desdeñar las operaciones precursoras de buceo, entre otras las que se desarrollaron en el Pisuerga por Jerónimo de Ayanz y Beaumont ante Felipe III y su corte en 1602.

El año 1989 la Armada incorporó su primer vehículo por control remoto PLUTO como elemento multiplicador en la capacidad de caza de minas, fundamentalmente en la fase de identificación visual. Los *Remotely Operated Vehicles* (ROV) además, portando una carga explosiva detonada a distancia, se incorporaron como vector imprescindible en las operaciones de contraminado (MCM). A los iniciales PLUTO siguieron los PLUTO PLUS, como parte ya integrante del sistema de combate de los nuevos cazaminas clase «Segura».

La Armada, enmarcada en la acción del Estado en la mar, colabora con las autoridades civiles en la medida de sus posibilidades, y así la FMCM no es ajena a este tipo de actividades. La participación en la localización y rescate de aeronaves o buques siniestrados es uno de ellos. Mención especial merece el más reciente de ellos, como fue la localización y recuperación de la avioneta siniestrada del Instituto Balear de la Naturaleza (IBANAT), que se estrelló en el mar el 13 de junio de 2018, localizada positivamente en tan solo cinco horas por dos cazaminas de la Armada dotados de su sónar de alta resolución y ROV PLUTO PLUS. Pero también hay otras anteriores en las que los vehículos submarinos tuvieron un papel clave, como la del helicóptero del Super Puma del Servicio Aéreo de Rescate (SAR) del Ejército de Aire que se perdió en aguas del Sahara Occidental en octubre de 2015, el helicóptero de HELIMER 207 de SASEMAR que se precipitó al mar en el golfo de Almería en enero de 2010, o la localización del pesquero *El Fairell* hundido tras ser abordado por un mercante en aguas del puerto de Barcelona.

Figura 1. Cazaminas «Tambre» en tareas de búsqueda de la avioneta siniestrada en Mallorca.

1 Presentado delante del rey Alfonso XIII en el abra de Bilbao.

La permanente necesidad del conocimiento del entorno marítimo y la necesidad de asegurar el control del mar para efectuar subsiguientes operaciones navales obliga a incorporar medios capaces para erradicar la amenaza más dañina y eficiente que podría comprometer las posteriores operaciones marítimas y de proyección en el litoral: la mina naval. Por ello, los vehículos submarinos que incorporan medios de detección, clasificación e identificación de objetos sumergidos son de marcado interés para la Armada.

Se trata ahora, de combinar la plataforma adecuada con los sensores más eficaces y eficientes que consigan el efecto deseado. Los vehículos submarinos no tripulados, *Autonomous Underwater Vehicles* (AUV), pequeños robots submarinos programables en sus trayectorias y en sus patrones de búsqueda, pueden incorporar multitud de sensores (sónares de apertura sintética y barrido lateral, magnetómetros, cámaras, etc.) a necesidad del usuario, y se abren paso como elemento multipropósito y multi-configurable.

2. Desarrollo

2.1. Los primeros vehículos

En 1989 con la incorporación de los dos primeros ROV PLUTO de la empresa italiana Gay Marine[2] que comparten las unidades de la 1.ª Escuadrilla de Cazaminas (compuesta por los cazaminas *Guadalete*, *Guadalmedina, Guadalquivir* y *Guadiana*) durante sus salidas a la mar, comenzó la Armada una larga singladura en el uso de vehículos submarinos.

Los vehículos PLUTO eran vehículos de muy elevadas prestaciones para su época. Disponían de un cable umbilical que los unía al buque, de cámara visual y sónar y, con una cota operativa superior a los 300 metros complementaban el trabajo de identificación y neutralización de los buceadores. Los vehículos han sido altamente fiables, como demuestra su utilización actual en muchas marinas, o el acondicionamiento de uno de ellos para uso científico y de investigación por la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), resultado del convenio de colaboración suscrito con la Armada en el año 2010[3].

Estos avances, junto con otros en la guerra de minas, consiguieron llevar a una definición de equipos moderna y exigente, como resultado de la cual se iba a constituir la actual FMCM, dotada de seis cazaminas clase *Segura*, cada uno de ellos con un vehículo PLUTO PLUS (también de Gay Marine), más dos vehículos adicionales para los buques durante los despliegues operativos de larga duración en agrupaciones internacionales. Desde entonces la Armada acumula miles de horas de empleo de dichos vehículos.

Los nuevos vehículos disponen de las siguientes características[4] y mejoras respecto a los anteriores (entre paréntesis características PLUTO):

- peso en el aire 315 kg (160)
- velocidad hasta 6 nudos (4)
- carga útil 100 kg (45)
- cota operativa 300 metros[5].

La principal desventaja de los vehículos es su elevado precio del cual hay un retorno industrial residual y la dependencia del fabricante en el suministro de algunos recambios.

En el afán de continuar progresando en el empleo de vehículos submarinos tipo ROV, en el año 2004 la FMCM se dotó de un nuevo vehículo para el contraminado de minas (principalmente de orinque) el MINESNIPER MK-II. Es un vehículo de KONGSBERG[6], con las siguientes características:

---

2 Toda la información de los vehículos conforme a la información oficial en http://www.gaymarine.it/gaymarine.htm

3 Actualmente en renovación.

4 Todos los datos están obtenidos de fuentes abiertas, para evitar tener que clasificar el documento.

5 El PLUTO podía alcanzar hasta los 1.000 metros, en función de la configuración. Pero la sonda máxima utilizable para el minado de superficie está ampliamente superada con los 300 metros operativos.

6 La página https://kongsberg.com/en/kds/products/navalsystems/mine%20warfare%20systems/ proporciona información del nuevo vehículo MK-III, actualmente en uso en varias marinas (por ej. Noruega).

- peso en el aire 42 kg
- velocidad hasta 5 nudos
- autonomía 60 minutos a 3 nudos
- alcance superior a los 2.000 metros
- carga explosiva 3,5 Kg (carga hueca)
- cota operativa 310 metros[7].

2.2. Entrada en escena de los AUV

Acuciados por la necesidad de renovar sus unidades dedicadas de MCM (cazaminas construidos en fibra de vidrio o plástico reforzado con fibra de alta resistencia), y en la dicotomía entre la construcción de nuevos buques o la elección de plataformas no tripuladas, las marinas occidentales comenzaron a experimentar nuevos conceptos para la conducción de las operaciones de MCM. Estos incluían la utilización de medios no tripulados de superficie y submarinos y el uso de plataformas como portadoras de dichos vehículos, o modelos híbridos que combinan el empleo de unidades dedicadas con otras multimisión.

La primera presentación de AUV a la Armada fue hace más de una década. Empresas como KONGSBERG o TELEDYNE, entre otras, presentaron sus modelos (REMUS y GAVIA, respectivamente) a la FMCM. Fruto de estas presentaciones se desarrolló un Documento de Necesidad Operativa (DNO, JUL 15) y los Requisitos de Estado Mayor (REM, ABR 16).

A partir de este momento, en un contexto económico difícil y en disputa con otros programas, comenzó la fase de definición de viabilidad (DDV) y alternativas de obtención (DAV) de un AUV para la Armada, donde la DGAM lidera la exploración de las posibilidades de la industria nacional y extranjera.

2.3. Tecnologías y desarrollos españoles en AUV

Los AUV no conforman un área de I+D nueva en nuestras universidades o empresas especializadas. De hecho, se reseña a continuación solo algunas de las que ya trabajan sólidamente en la definición de proyectos AUV o sistemas asociados:

- La UPCT ha modernizado el PLUTO, para convertirlo en una plataforma polivalente, autónoma u operada remotamente (es decir un híbrido ROV/AUV), con nuevas baterías de litio que multiplican su autonomía, y múltiples sensores como el sónar de barrido lateral o el penetrador de fondos. El nuevo vehículo, bautizado AEGIR, dispone de unas capacidades muy superiores al vehículo original.

Figura 2. Vehículo PLUTO con nuevas prestaciones operado en el Mar Menor por la UPCT.

7 Ver nota 3 anterior.

- La Universidad de Gerona ganó el año 2010 el concurso organizado por el Centre for Maritime Research and Experimentation (CMRE) de la OTAN, con el vehículo submarino autónomo SPARUS. El SPARUS II se comercializa desde el año 2013.
- Desde el año 2016 la Universidad de La Coruña trabaja en el Proyecto SAILOR, desarrollo de un vehículo capaz de operar tanto de manera autónoma como controlada (HRUV, Hybrid Remotely Operated and Unmanned Vehicles), inicialmente para la inspección de plataformas off-shore.
- En Murcia, una empresa local, NIDO Robotics, ha desarrollado un vehículo de uso doméstico denominado SIBIU Nano, orientado al turismo o a la ejecución de pequeñas tareas de búsqueda o mantenimiento.
- La empresa AISTER junto con AID está desarrollando un planeador submarino, modelo híbrido capaz de navegar tanto en superficie como en inmersión. El Ocean Master (Multipurpose Autonomous vehicle Suitable for differenT Environments and Roles) es un vehículo innovador, pero que tiene un empleo operativo pendiente de definir.
- SAES ha desarrollado una mina de ejercicio multi-influencia, que incluye comunicaciones acústicas (como veremos elemento clave en un AUV), además del uso avanzado de dichos sensores en el programa de la EDA SIRAMIS (Signature Response Analysis of Multi-influence Mines).

En realidad, el gran éxito de todas estas iniciativas es el haber podido integrar y/o desarrollar todos los elementos necesarios para un vehículo submarino, pilotado o autónomo, o cualquier combinación de estos.

2.4. Aportación de la Armada

En los diversos encuentros y foros relacionados con el tema que nos ocupa en los que la Armada ha estado representada, se ha podido participar activamente ya que cuenta con experiencia acumulada y aprovechable en el empleo de vehículos ROV y AUV. Es un hecho contrastable que las horas acumuladas en intervenciones de vehículos no son superadas por ninguna otra entidad o institución y que el coste de explotación asociado es mucho más bajo.

La Armada incluso cuenta también con experiencia en AUV, a pesar de no contar con este medio en su inventario. Solo a modo de ejemplo, y como ya se ha mencionado, en el pasado ejercicio ESP MINEX se contó –y organizó– la operación de 7 vehículos submarinos de 6 modelos diferentes: MUSCLE y BLACKCAT (basados en el BLUEFIN 21) del CMRE de la OTAN, GAVIA y SEACON de la Marina portuguesa, REMUS de la Marina belga, e IVER (2 unidades) de la US NAVY.

Figura 3. BLACKCAT y MUSCLE del CMRE (OTAN) en ESP MINEX-18.

Las distintas plataformas y los diferentes sensores disponibles (sónares de apertura sintética y barrido lateral, cámaras visuales y acústicas,…) se emplearon con éxito en operaciones en puerto y en la mar, junto con nuestros buceadores especializados en MCM y ROV (PLUTO PLUS y SEABOTIX, de procedencia norteamericana). Además se aplicaron los procedimientos experimentales OTAN, aportando valiosas lecciones aprendidas que han realimentado el proceso de generación de doctrina OTAN.

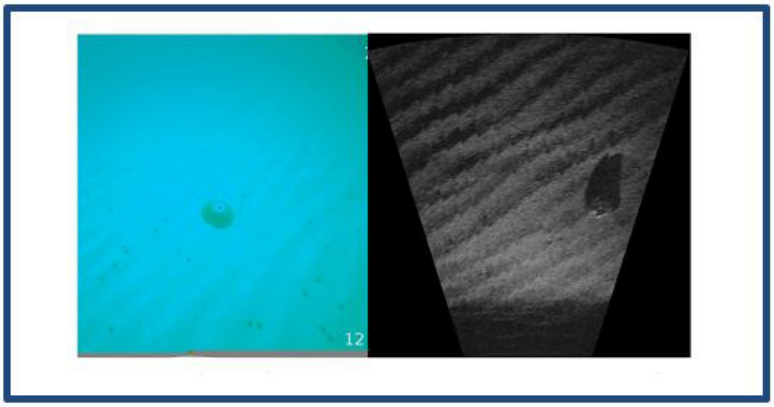


Figura 4. Imagen visual y en cámara acústica de una mina MANTA de ejercicio.

Como dato adicional, durante el ejercicio MARSEC 18 se definió un escenario X en forma de seminario, para recibir de las empresas del clúster marítimo español (CME) sus inquietudes, experiencias y desarrollos en el uso de vehículos no tripulados, poniendo en sintonía a la comunidad de usuarios con la de desarrollo nacional en este ámbito.

2.5. Aporte de otros organismos

Pero no solo es la Armada quien emplea robots submarinos en España. Otros organismos con competencias en la mar tienen necesidades similares de disponer de medios para explorar y explotar el gran azul.

El Instituto Español de Oceanografía (IEO) explora con *gliders* las aguas próximas –y no tan próximas– para obtener datos de interés para sus funciones de conocimiento del medio marino. Las últimas y más recientes son de 2017.

Por su parte SASEMAR emplea el ROV Comanche para labores de rescate. En particular, colabora con la Armada en los ejercicios anuales CARTAGO de salvamento y rescate de submarinos.

El Museo Nacional de Arqueología Subacuática (ARQUA) realiza campañas de prospección en el pecio de la fragata *Mercedes* desde 2016 empleando el LIROPUS 2000, para constatar el estado del pecio, el expolio sufrido, y la presencia y documentación de estos sumergidos.

El sistema de observación y predicción costero de las islas Baleares (SOCIB) es un centro de referencia nacional en el uso de *gliders*.

Todos estos organismo son presentes –y posibles– utilizadores de tecnología submarina nacional.

2.6. Hacia una estrategia de diseño

Una vez identificada la necesidad –y oportunidad– de desarrollar en la industria nacional nuevos vehículos submarinos, se identifican ahora algunas claves del éxito del futuro AUV I+D nacional:

Modularidad y escalabilidad

Debe de permitir que un determinado vehículo se ajuste a las necesidades de muchos de los actores por medio de la integración de diferentes sensores y herramientas en la plataforma (ej. sónares de barrido lateral, cámaras visuales y acústicas, tenazas…). La escalabilidad, es decir la capacidad para integrar de manera sencilla nuevos sensores o permitir su rápida actualización ha sido muy apreciada por marinas de nuestro entorno.

Flexibilidad y realismo

Debe garantizarse la sostenibilidad y practicabilidad, huyendo de fórmulas de desarrollo muy complejas o de muy largo recorrido, sin que esto suponga traba alguna a la creatividad e imaginación en las fases de desarrollo. En este tipo de productos tecnológicamente emergentes, la experiencia dicta que es mejor

satisfacer las necesidades de un potencial cliente con un vehículo fiable y asequible a corto plazo, para posteriormente ganar experiencia y continuar en el progreso tecnológico.

El vehículo

Es imperativo llegar a un equilibrio entre la **estabilidad** (vehículo más grande, potente y menos susceptible a factores externos como corrientes) y la **maniobrabilidad** (vehículo más liviano, menos demandante en consumo de energía, pero más afectado por las condiciones medioambientales). Ambos extremos tienen ventajas e inconvenientes, pero desde el punto de vista militar, el vehículo debe ser resiliente a su empleo en condiciones meteorológicas marginales. Entramos de lleno ahora en la necesaria facilidad de despliegue de dicho vehículo en buques de superficie, que es condición operativa esencial.

Precisión en la navegación y gobierno automático

La precisión en la navegación dentro de unos estándares, es condición *si ne qua non* en guerra de minas. Por ello los sistemas de navegación a bordo del vehículo y de gobierno deben tener implementado mecanismos de auto-corrección, bien en superficie o por mapeo de perfiles de fondo o puntos de referencia sumergidos ya conocidos o localizados, máxime si su empleo operativo o ciclos de misión contempla periodos bajo el agua superiores a 3 horas.

Sistemas de recuperación

Un AUV, ROV o híbrido está sujeto a graves contingencias por el medio en el que desarrolla su función. Asegurar su localización y/o comunicación caso de contingencia para facilitar su eventual rescate, es esencial para garantizar su viabilidad y fiabilidad.

Explotación de la información

Es el problema más complejo de resolver actualmente. Los AUV tienen enormes posibilidades de obtención de datos que necesitan de un adecuado tiempo de análisis y filtrado post-misión una vez que se ha recuperado. El envío de datos en tiempo real no es un problema sencillo de resolver en el medio acústico por las dificultades de explotación de la onda acústica en cuanto a ancho de banda se refiere, y la incorporación de inteligencia artificial para el proceso automatizado de datos está aún en fase de desarrollo.

Por otra parte, los tiempos en los que la información evaluada esté disponible para el operador van a marcar la capacidad de proceso adicional que deba instalarse a bordo, afectando a los ciclos de misión. Este campo está aún abierto y se estima que será el que marque la tendencia de futuro.

3. Conclusiones

La industria nacional –en conjunción con la Universidad y otros actores– ha demostrado su solvencia para desarrollar este tipo de vehículos satisfaciendo una demanda en aumento.

La necesidad operativa es latente y garantizará la existencia y viabilidad de un potente mercado de producción y explotación, tanto en el ámbito civil como militar.

La activa y permanente participación en el proceso de desarrollo de la comunidad de potenciales usuarios (entre los que se encuentra la Armada) debería asegurarse como garantía de éxito.

Se abre un prometedor campo I+D nacional en una disciplina en la que España no debería quedarse atrás.

Referencias

1. *https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2018-02-13/murcia-nido-robotics-sibiu-nano-dron-subacuatico_1520797/*
2. *http://cirs.udg.edu/auvs-technology/auvs/sparus-ii-auv/*
3. *http://www.gii.udc.es/proyectos/detalle/355*
4. *https://www.esjnews.com/polish-army-modernization*

Análisis de un enlace superconductor para plataformas navales

Sarmiento Muñoz, Gustavo[1,*], Sanz Castillo, Santiago[2] y García-Tabarés Rodríguez, Luis[3]

1 SUPRASYS S.L. Avda. Lehendakari Aguirre, 11, 7.º, Dpto. 7, 48014 Bilbao. gustavo.sarmiento@suprasys.es (G.S.).

2 SUPRASYS S.L. Avda. Lehendakari Aguirre, 11, 7.º, Dpto. 7, 48014 Bilbao. santiago.sanz@suprasys.es (S.S.).

3 CIEMAT. Avda. Complutense 40, 28040 Madrid. luis.garcia@ciemat.es (L.GT.).

* Autor principal y responsable del trabajo.

Resumen

El presente artículo se enmarca en el proyecto SUPRANAVAL, liderado por la empresa SUPRASYS junto con CIEMAT. SUPRANAVAL plantea el desarrollo de aplicaciones eléctricas compactas en la propulsión y distribución eléctrica de plataformas navales; siendo la superconductividad la tecnología habilitadora para conseguir mayores ratios de potencia-volumen.

En el artículo se analiza la viabilidad técnica de un enlace superconductor que conecte, punto a punto, la fuente de potencia con cada uno de los grandes consumidores de plataforma (p.e. propulsión eléctrica, radar o armas de energía dirigida). Asimismo, los autores analizan aspectos eléctricos del enlace, como dimensionamiento en potencia, tensión de línea y corriente y conexionado con sistemas convencionales. Aspectos geométricos, como tamaño y longitud, son considerados, así como los relacionados con sistemas auxiliares como la criogenia. La generación del eventual campo magnético disperso y su potencial impacto en la huella magnética es discutido, así como estrategias o soluciones que limiten la firma magnética. Este trabajo está inspirado en los enlaces superconductores que se están desarrollando en el CERN para el proyecto *High Luminosity Upgrade* del LHC.

Palabras clave

Plataforma naval, buque eléctrico, propulsión naval, superconductividad, líneas de transmisión.

1. Interés y motivación del uso de cables compactos superconductores

Los cables superconductores poseen la capacidad de portar grandes densidades de corriente frente a un equivalente resistivo, ya que carecen de resistencia eléctrica en régimen de corriente continua (CC) y, por tanto, la disipación de calor por efecto Joule no es un factor limitante. Esto ha permitido su uso para la generación de campos magnéticos elevados en aplicaciones médicas y científicas. Como contrapartida, se requiere un sistema de refrigeración criogénico, ya que el estado superconductor solo se produce a temperaturas criogénicas (típicamente en el rango de 20-77 K para cables superconductores).

Adicionalmente, la elevada densidad de corriente de los cables superconductores permite desarrollar aplicaciones altamente compactas, aun teniendo en consideración el espacio necesario para el aislamiento térmico criogénico. En muchas ocasiones la compacidad es un punto determinante para su aplicación. Otras notorias ventajas son una posible reducción de pérdidas (incluso teniendo en cuenta la potencia requerida por el sistema de refrigeración) y una reducción de la caída de tensión en la línea, lo que permite trabajar a tensiones más bajas.

A pesar de no aprovechar en su totalidad las ventajas de la superconductividad, existe un gran número de proyectos de demostración de cables en corriente alterna (CA), siendo una referencia en Europa el proyecto Ampacity [1]. Sin embargo, son las aplicaciones en CC las que permiten desarrollar el auténtico potencial de este tipo de líneas de transmisión, y entre ellas se pueden citar como las más destacables las líneas enterradas de HVDC (siglas correspondientes a *High Voltage Direct Current*) [2, 3], la conexión de huertos solares (donde las conexiones entre paneles tienen que realizarse en baja tensión), la alimentación de centros masivos de datos [4, 5], la desimanción de barcos y otras aplicaciones en grandes consumidores de CC (por ejemplo, los procesos industriales con células de electrólisis como en la industria del aluminio) [6].

Dado el actual interés de los cables superconductores en CC para las mencionadas aplicaciones y las existentes realizaciones, los autores consideran que un diseño cuya aplicación final sea la conexión de grandes consumidores en un buque o submarino permitiría disponer de sistemas más compactos. Así, se parte de una especificación general de una estructura de cable, donde se deben considerar como mínimo los principales elementos:

- La potencia nominal.
- Las curvas de demanda.
- El conexionado con sistemas convencionales.
- Las condiciones de conexión a la red (tomas de corriente, rectificadores, etc.).
- El material superconductor utilizado.
- El sistema criogénico: criostato y sistema de refrigeración.
- La tensión y corriente nominal, así como la potencia de cortocircuito y tiempo máximo de despeje de falta.

Los sistemas de comunicación como radares y de propulsión podrían ser buenos candidatos en una plataforma naval para ser alimentados a través de enlaces superconductores, debido al enorme consumo requerido. Pese al gran elemento diferenciador de la comentada compacidad, otra ventaja como la reducción del consumo eléctrico promovida por otros autores [7], debe ser analizada con cuidado, ya que los enlaces superconductores requieren de un consumo continuo de potencia de refrigeración. Es decir, si se quiere combinar la compacidad del sistema con una reducción del consumo, estos enlaces deben conectar sistemas que estén operando con un elevado factor de carga.

Por otro lado, también el empleo de conexiones superconductoras presenta grandes ventajas si la transmisión requiere de grandes picos de potencia evitando efectos de calentamiento o degradación ante una cadencia de uso, evitando al mismo tiempo grandes sobredimensionamientos. Esta podría ser la situación para un arma de energía dirigida o una catapulta electromagnética.

Aunque en este artículo no se tratarán los elementos de conexionado con los sistemas convencionales, es muy recomendable que estas conexiones sean punto a punto, ya que una fuente importante de generación de calor son las *current leads* o tomas de corriente entre el componente superconductor y el sistema a temperatura ambiente [8].

2. Diseño conceptual del cable de potencia

El diseño conceptual del cable de potencia se basa en los desarrollos llevados a cabo en el *High Luminosity Upgrade* del LHC [9] y en el proyecto *Bestpaths* [2]. Siguiendo la experiencia adquirida por los grupos de investigación junto con la propia de los autores, el conductor elegido es el hilo de MgB_2. La elección ha contemplado tanto aspectos económicos e industriales (figura de mérito €/(kAm) [10] como la disponibilidad de largas longitudes en una única tirada, así como aspectos mecánicos y de manejo del hilo.

En la tabla 1 se resumen las características principales del conjunto de hilos de sección redonda, que tienen interés para el diseño del cable conceptual.

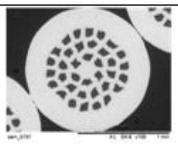
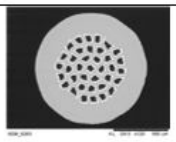
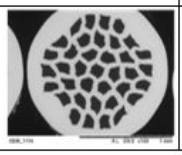
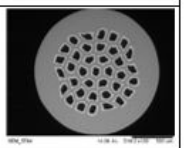
Hilo MgB2	**Hilo Tipo 1**	**Hilo Tipo 2**	**Hilo Tipo 3**	**Hilo Tipo 4**
Diámetro (mm)	1,3	1	1,5	1,5
Componentes de la matriz metálica	Monel, Níquel	Monel, Níquel, Niobio	Monel, Níquel	Monel, Níquel
Relación del área del MgB2 al área total del conductor	17%	12%	30%	12%
Corriente crítica (A) a 20 K, 1T	500	300	> 650	> 650
Corriente crítica (A) a 4,2 K, 3 T	280	400	>700	600
Imagen metalográfica				

Tabla 1. *Características del hilo superconductor de MgB2 (datos cortesía de Columbus Superconductors).*

Por otro lado, las condiciones de operación del MgB_2 requieren de temperaturas inferiores a 25 K. Para una refrigeración mediante fluidos criogénicos, únicamente podrían utilizarse helio (en estado gas o líquido) o el hidrógeno (en estado líquido), únicos fluidos existentes en la naturaleza a esta temperatura. También el sistema de refrigeración está inspirado en los desarrollos del CERN, en el que helio gas fluye a través de un criostato, bañando los cables superconductores. La presión puede variar desde los 1,5 bar caso del CERN [9] hasta los 20 bar, dependiendo de la demanda de operación y requerimientos de carga térmica.

En el presente artículo, se plantean dos soluciones de cables de potencia para transmisión de 2 MW y 10 MW en CC, y a 500 V, ya que dada la capacidad de transportar corriente de este tipo de materiales

se sugiere una potencial ventaja adicional el uso de la baja tensión. La figura 1 presenta el diseño del cable de 2 MW, en donde se ha elegido por simplicidad una configuración bifilar de los conductores (ida y retorno). Los conductores se componen de un núcleo estabilizador de Cu rodeado de hilos superconductores con un determinado paso de trenzado. Envolviendo el conjunto se encuentran distintas capas de aislamiento y una funda polimérica. Todo ello se mantiene en la cámara interior del criostato, por donde circulará He gas a una presión entre 1,5 y 20 bar. El espacio entre la pared interior y la exterior se mantendrá en vacío para eliminar la convección y minimizar la conducción térmica. Las paredes del criostato se realizan en un tubo de acero inoxidable corrugado, que aporta flexibilidad al sistema y mejora el intercambio térmico del He gas con el cable. Entre ambas paredes se prevé un separador de un material de baja conductividad térmica y que a la vez aporte rigidez al sistema. Finalmente, el criostato dispondrá de una funda externa.

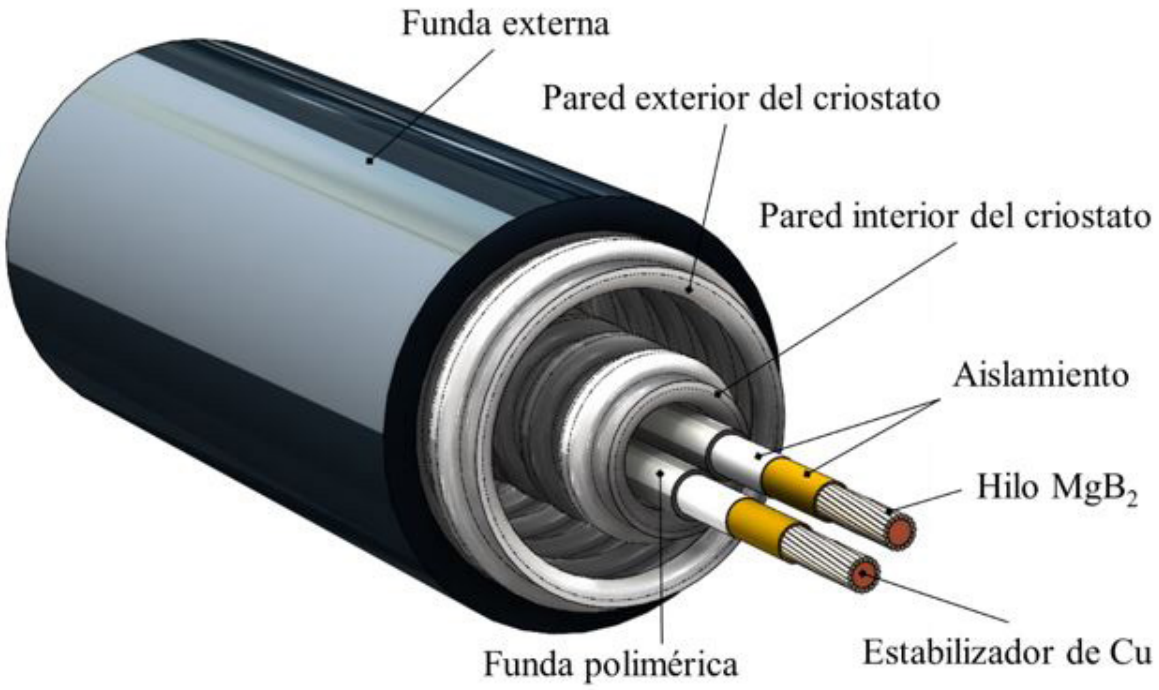


Figura 1. Diseño conceptual de un cable de transmisión de potencia de 2 MW.

3. Resultados y discusión

Se han realizado varios estudios, partiendo del diseño del cable de 2 MW. Para ello se ha utilizado el programa de elementos finitos Ansys®, con el módulo electromagnético Emag. En la modelización se han realizado ciertas simplificaciones como el aglutinado de los elementos de aislamiento y representando el área completa ocupada por los criostatos. Dada la simetría del problema se ha seleccionado únicamente la mitad del modelo, aplicando condiciones de contorno en el plano x=0, de flujo magnético paralelo (potencial vector A_z=0). Conviene remarcar que se han tenido en cuenta las propiedades ferromagnéticas del níquel y monel que forman la matriz de los hilos superconductores. Ambos materiales tienen permeabilidades semejantes, por lo que se ha ponderado la permeabilidad específica del níquel en primera aproximación, ya que esta situación es la más desfavorable.

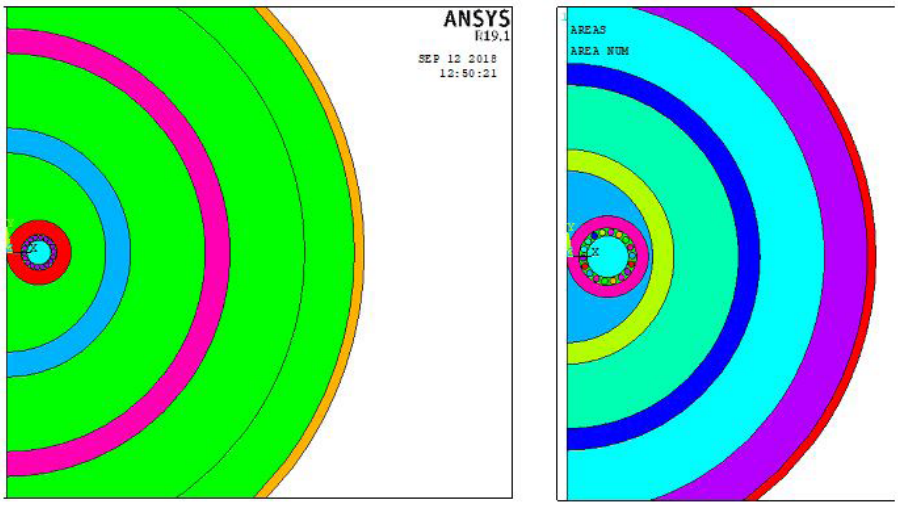


Figura 2. Modelado 2D de una sección del cable de 2 MW (izda.) y 10 MW (dcha.).

La figura 2 muestra la modelización para los cables de 2 MW y 10 MW, en donde se han utilizado respectivamente hilo de MgB_2 tipo 2 y tipo 3; dadas las condiciones de operación de 20 K y de corriente admisible para el campo magnético en el que se ve inmerso el superconductor. Por ejemplo, para el cable de 2 MW, la corriente crítica del sistema sería de 5,5 kA. (véase tabla 1). En la figura 3 se pueden apreciar los efectos de saturación en el hilo superconductor, debido a los materiales ferromagnéticos que lo componen.

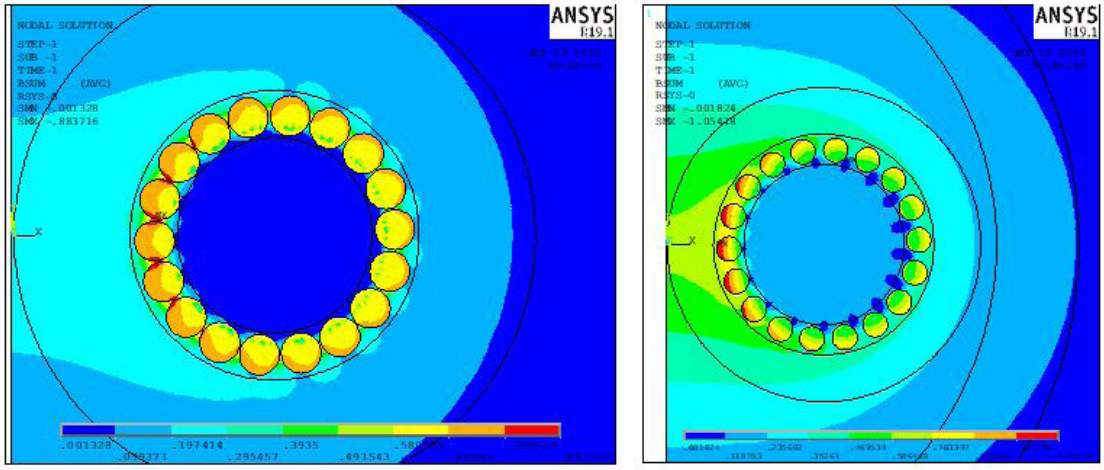


Figura 3. Resultados del módulo del campo B(T) para el cable 2 MW (izda.) y 10 MW (dcha.).

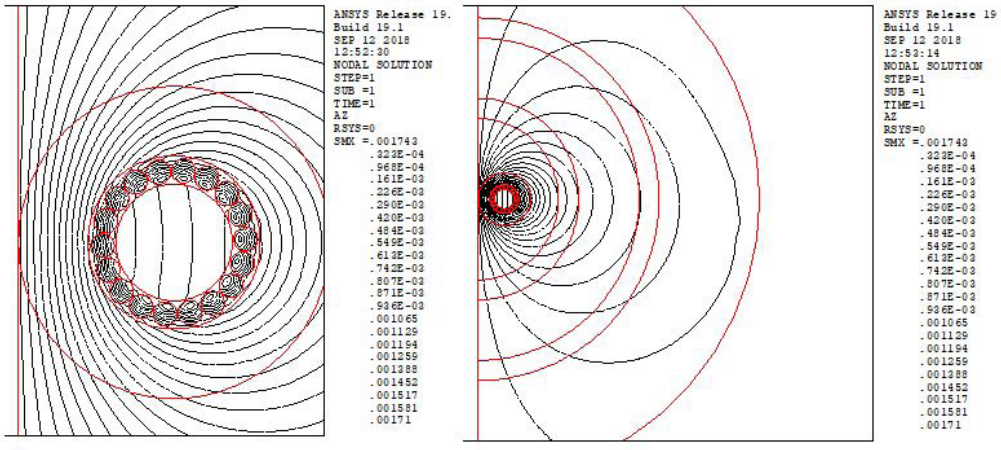


Figura 4. Líneas de flujo B(T) para el cable 2 MW, en el conductor (izda.) y en de flujo disperso (dcha.).

La figura 4 y la figura 5 muestran las líneas de flujo en el cable (acumuladas sobre todo en el hilo superconductor) y de campo disperso para el cable de 2 MW y 10 MW respectivamente. Nótese cómo el comportamiento ligeramente ferromagnético distorsiona las líneas de campo haciendo el sistema menos simétrico, especialmente a cortas distancias como las representadas en la figura 6. Así, el módulo de campo disperso a una distancia de 60 mm es de 4 mT y 20 mT para 2 MW y 10 MW respectivamente. Si este campo resultase excesivo para la aplicación en transporte de potencia de buques, existen técnicas de reducción de campo disperso como recurrir a una estructura coaxial.

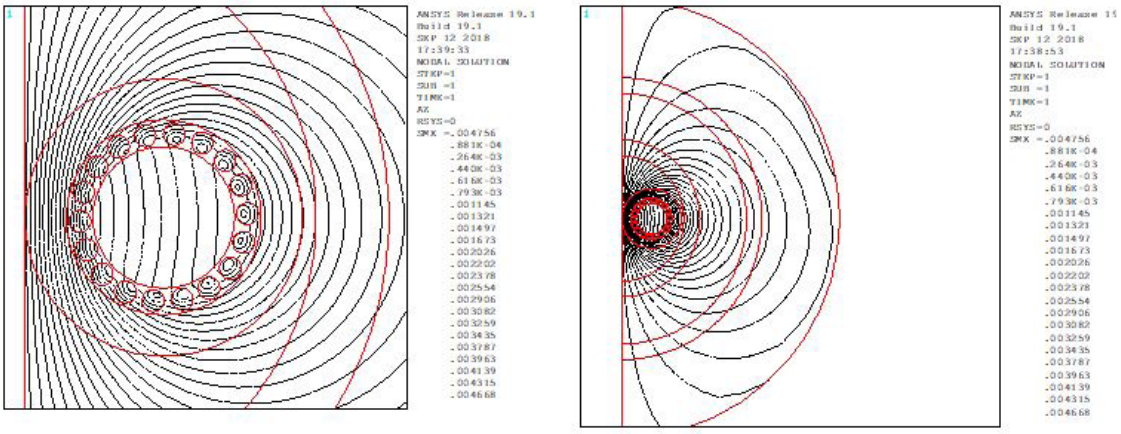


Figura 5. Líneas de flujo B(T) para el cable 10 MW, en el conductor (izda.) y en de flujo disperso (dcha.).

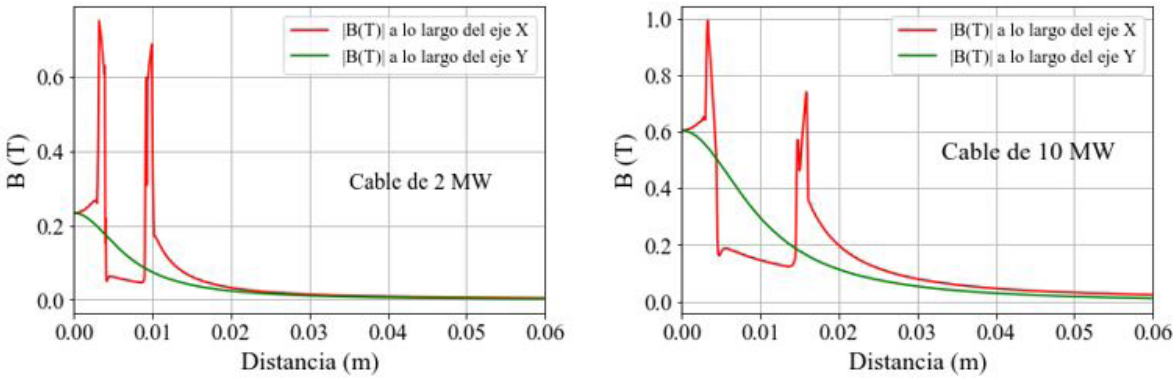


Figura 6. Módulo del campo magnético generado por cable bifilar de 2 MW (izda.) y 10 MW (drcha.).

Finalmente, la Tabla 1 presenta un resumen de las principales características de los cables de 2 MW y 10 MW propuestos por SUPRASYS. Cabe destacar que la corriente de falta, definida en diseño, puede ser ajustada mediante la modificación de la arquitectura del cable.

Parámetro	**Valores**	
Potencia (MW)	2	10
Tensión (V)	500	500
Corriente (kA)	4	20
Arquitectura	Bifilar	Bifilar
Tipo de hilo ref. Columbus	Tipo 2	Tipo 3
Número de conductores SC	18	24
Diámetro exterior (mm)	90	90
Corriente de falta de diseño durante 100 ms (kA)	14	35
Peso cable (kg/m)	6,2	8,2

Tabla 1. Características principales de los cables de potencia diseñados por SUPRASYS

Destaca la compacidad del sistema, ya que una manguera de 90 mm de diámetro permite transportar 10 MW en CC, con una densidad lineal de 8,2 kg/m. Un equivalente en CC en baja tensión supondría dividir en varios circuitos ya que usando un cable convencional las secciones resultarían inmanejables. También la versatilidad del sistema criogénico, ya que la ampliación en potencia básicamente supone modificar el número de filamentos de superconductor y el núcleo de cobre, sin tocar las cámaras del criostato (siempre que se respete el diámetro interior).

Otros aspectos importantes –que no han podido tratarse en este estudio– son el ratio de potencia de carga, y las pérdidas de CA debido al rizado de los bancos de condensadores del rectificador DC/AC (que algunos autores estiman 1 % at 50 Hz) [7].

4. Conclusiones

En este artículo se ha presentado dos diseños de cables superconductores de CC, capaces de transportar 2 MW y 5 MW en baja tensión, de arquitectura bifilar. Dichos cables utilizan un sistema de refrigeración basado en helio gas. Se ha realizado un análisis electromagnético de los cables propuestos, para determinar el efecto del campo magnético en el superconductor y en el campo disperso. La arquitectura propuesta para CC es compacta con un diámetro de unos 90 mm y respectivamente 6,2 kg/m y 8,2 kg/m para los casos de 2 MW y 5 MW. Se ha demostrado cómo el diseño de la envoltura criogénica permite una ampliación en potencia.

Agradecimientos

A Matteo Tropeano de Columbus Superconductors, por la información intercambiada sobre el hilo de MgB_2. Así mismo, a Mathias Noe del KIT por un interesante estado del arte de los enlaces superconductores.

Referencias

1. *Stemmle M, Merschel F, Noe M, and Hobl A, AmpaCity project—Worldwide first superconducting cable and fault current limiter installation in a German city center Proc. IEEE CIRED. 2013: 1–4.*
2. *BESTPATHS project. [cited; Available from: http://www.bestpaths-project.eu/en/demonstration/demo-5*
3. *Thomas H, Marian A, Chervyakov A, Stückrad S, Salmieri D, Rubbia C. Superconducting transmission lines–Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance? Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016; 55:59–72.*
4. *Superconductor LVDC Data Center Power Cables. Commercial Catalogue American Superconductors.[cited: Available from: https://www.amsc.com/wp-content/uploads/LVDC_BRO_0412_web.pdf*
5. *Minervini JV, Bromberg L, Michael P, Miles C, Nicholas R., Bounty L. Superconducting DC Power Transmission and Distribution. Final Report to the MIT Energy Council MIT Energy Initiative Seed Fund Award Number: 015728-007 January 30, 2009.*
6. *Elschner S, Brand J, Wilfried G. 3S–Superconducting DC-Busbar for High Current Applications. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018; 28 (4).*
7. *Bruzek C E, Allais A, Dickson D, Lallouet N, Allweins K, and Marzahn E, Superconducting DC cables to improve the efficiency of electricity transmission and distribution networks: An overview. Eco-Friendly Innovations in Electricity Transmissions and DistributionNetworks, J. L. Bessede, Ed. Woodhead Publishing Series in Energy,Number 72. Elsevier, 2015, 135–167.*
8. *M.N. Wilson, Superconducting Magnets. Oxford: Clarendon Press; 1983.*
9. *Ballarino A. Development of superconducting links for the Large Hadron Collider machine. Superconductor Science and Technology 2014;27(4):044024.*
10. *Sarmiento G, Sanz S, Pujana A, et al. Design and Testing of Real-Scale MgB2 Coils for SUPRAPOWER 10-MW Wind Generators. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2016;26(3):1-6.*

Efecto del posicionamiento de los anemómetros en una fragata

Bardera Mora, Rafael[1,*], Matías García, Juan Carlos[1]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas», Ctra. de Ajalvir, km. 4,5, 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid). Email: barderar@inta.es (RBM), matiasgjc@inta.es (JCMG).

* Autor principal y responsable del trabajo; barderar@inta.es (RBM).

Resumen

Los buques militares están equipados con dos o más anemómetros a bordo, colocados habitualmente en un mástil sobre su puente de mando. Estos anemómetros proporcionan la dirección y la velocidad del viento relativo al buque, es decir, incluyen en su medida el efecto de la velocidad de avance. Sus datos son esenciales para la tripulación, ya que son utilizados tanto para la navegación como para garantizar la seguridad durante las operaciones de aeronaves sobre el mismo.

Sin embargo, el flujo de aire que llega a los anemómetros se ve perturbado en cierta medida por la propia estructura del barco, esto es, el casco, la superestructura y el mástil del buque. La magnitud de la variación entre el flujo local que miden los anemómetros y la condición real de viento es por lo tanto una función de la geometría del buque y de la dirección de viento relativo. Por esta razón, es esencial que los anemómetros se coloquen cuidadosamente y se realicen estudios que tengan en cuenta los efectos de la aerodinámica de la estructura del buque.

En esta investigación se ha realizado un estudio experimental para caracterizar el flujo de aire sobre los anemómetros de una fragata y obtener así un factor de corrección con el que corregir las medidas tomadas por el anemómetro embarcado, alteradas debido a la presencia del buque. Para ello se han realizado ensayos en el túnel 1 del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas», utilizando un modelo a escala 1:50 de una fragata. Para tomar las medidas de velocidad en los puntos en donde se sitúan los anemómetros, se ha utilizado la técnica de anemometría láser doppler (LDA).

Palabras clave

Fragata, buque, anemometría, viento, aerodinámica.

1. Introducción

Los buques militares están equipados con dos o más anemómetros a bordo. Normalmente se colocan en un mástil en la parte alta del buque (figura 1). Estos anemómetros proporcionan la velocidad y dirección del viento, variables necesarias para la tripulación del barco para garantizar la seguridad durante las operaciones de aeronaves sobre el mismo, así como para la navegación del propio buque. Tradicionalmente los anemómetros eran de tipo mecánico o paletas pero más recientemente, se utilizan anemómetros de ultrasonidos.

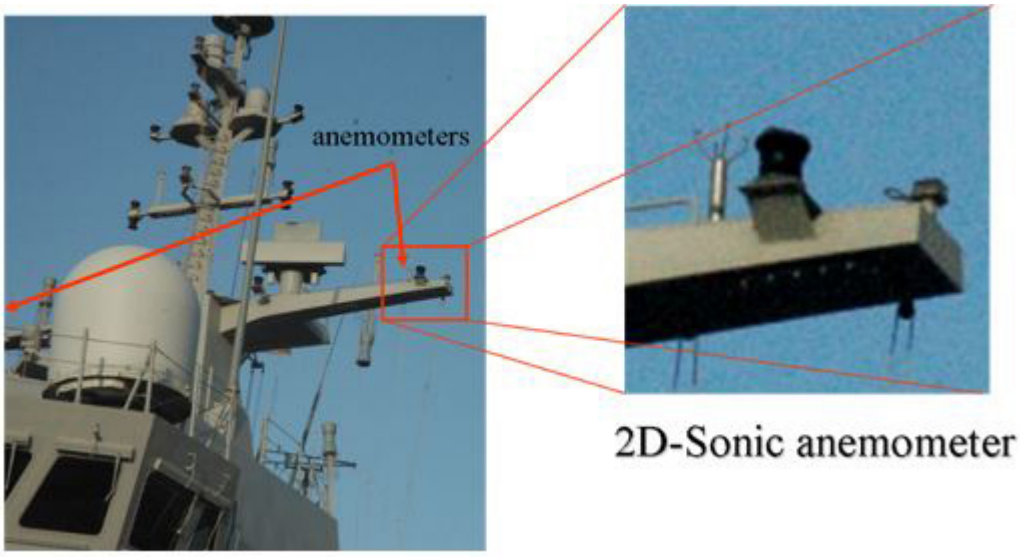


Figura 1. Posición de anemómetros en el mástil sobre el puente de mando en una fragata.

Los anemómetros miden la condición de viento relativo al barco, es decir, incluyen en su medida el efecto de su velocidad de avance del buque, aparte de la velocidad de viento atmosférico. La razón de instalar dos o más anemómetros es porque en muchas condiciones de viento, al menos uno de los anemómetros se ve afectado por la presencia del mástil o alguna otra parte de la estructura del barco proporcionando información errónea. De hecho, no suele ocurrir que los instrumentos estén fuera de la influencia de la estela aerodinámica que produce el barco. Y así, el flujo de aire en las posiciones del anemómetro siempre se ve perturbado en cierta medida por el casco, la superestructura y el mástil del buque [1]. La magnitud de la variación entre el flujo local de los anemómetros y la condición real de viento es una función de la geometría del buque y de la dirección de viento relativo [2].

Por esta razón, es esencial que los anemómetros se coloquen cuidadosamente, teniendo en cuenta los efectos de la aerodinámica de la estructura del buque. Idealmente, se deben colocar tan lejos de la estructura como sea posible. El mejor momento para considerar la posición de los anemómetros en un buque es durante su ciclo de diseño inicial. Recomendaciones iniciales para su localización pueden ser

proporcionadas por ingenieros con experiencia en este campo. Sin embargo, para asegurar un correcto posicionado, muchas armadas realizan ensayos aerodinámicos en túnel de viento ya sea durante la fase de diseño de barcos nuevos, o cuando a un barco ya existente se le realizan cambios significativos en su geometría. Así, comparando los datos medidos con el viento incidente sin perturbar, es posible determinar el rango de direcciones en el que los anemómetros pueden usarse o no.

En este documento se explica el procedimiento realizado en el túnel de viento n.º 1 del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «*Esteban Terradas*» (INTA) para caracterizar el flujo en la posición de los anemómetros en una fragata y así proporcionar un método de corrección de los datos proporcionados por los anemómetros embarcados. Para los ensayos en túnel de viento se utilizó un modelo a escala 1:50, de 2 m de largo, que representa la parte del barco sobre la línea de flotación. El modelo de buque estaba sujeto en una placa base que permitía su giro y posicionado a diferentes ángulos de viento relativo, con incrementos de 10 grados mediante un sistema automático de desplazamiento. La técnica utilizada para medir la velocidad en las posiciones de los anemómetros fue la anemometría láser doppler (LDA).

2. Viento relativo en una fragata

La componente de velocidad que miden los anemómetros a bordo del barco es la llamada velocidad de viento relativa . Dicha velocidad es el vector viento resultante del viento atmosférico ($\vec{V}_w$) y la dirección y velocidad de avance del barco (. Por tanto, vendrá dada por,

$$\vec{V}_r = \vec{V}_w - \vec{V}_s \qquad (1)$$

En la figura 2 se muestra el diagrama de velocidades de viento de un barco. Aparecen en forma vectorial las velocidades anteriores y los ángulos ϕ (el que forma el viento relativo y el eje longitudinal del barco) y β (el que forma el viento atmosférico con la velocidad de avance).

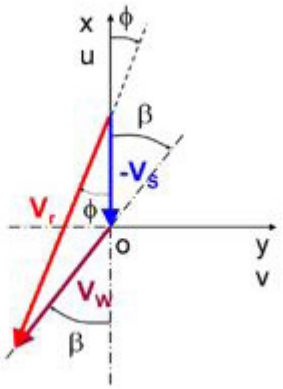


Figura 2. Diagrama de velocidades de viento de un barco y posición típica de los anemómetros.

De esta forma, el módulo de la velocidad de viento relativo viene dado por,

$$V_r = \sqrt{V_w^2 + V_s^2 + 2V_w V_s \cos\beta} \qquad (2)$$

3. Montaje experimental de ensayos

Los experimentos necesarios para caracterizar el entorno aerodinámico de los anemómetros se llevaron a cabo en el túnel aerodinámico n.º 1 del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas». Este túnel es de circuito cerrado y cámara de ensayos abierta de 3 × 2 m^2. Puede alcanzar una velocidad máxima del flujo de 60 m/s con una intensidad de turbulencia menor que 0,5 %.

La figura 3 muestra la maqueta de la fragata utilizada, de escala 1:50, colocada en la sección de ensayos del túnel n.º1-INTA. Esta maqueta representa solo la superficie del buque por encima de la línea de flotación y por tanto, la parte afectada por la acción del viento. Para los ensayos, el modelo estaba fijado a una plataforma giratoria apoyada sobre el suelo de la cámara de ensayos del túnel simulando la superficie oceánica. La velocidad de la corriente libre del túnel durante los ensayos varió entre los 5 m/s y los 20 m/s, lo que proporciona un rango de números de Reynolds basado en la anchura de la maqueta de entre 1×10^5 y 7×10^5. Dicho valor se sitúa por encima del valor crítico ($\sim10^5$) necesario para cumplir las leyes de semejanza dinámica entre el flujo sobre la maqueta y sobre el buque real [3].

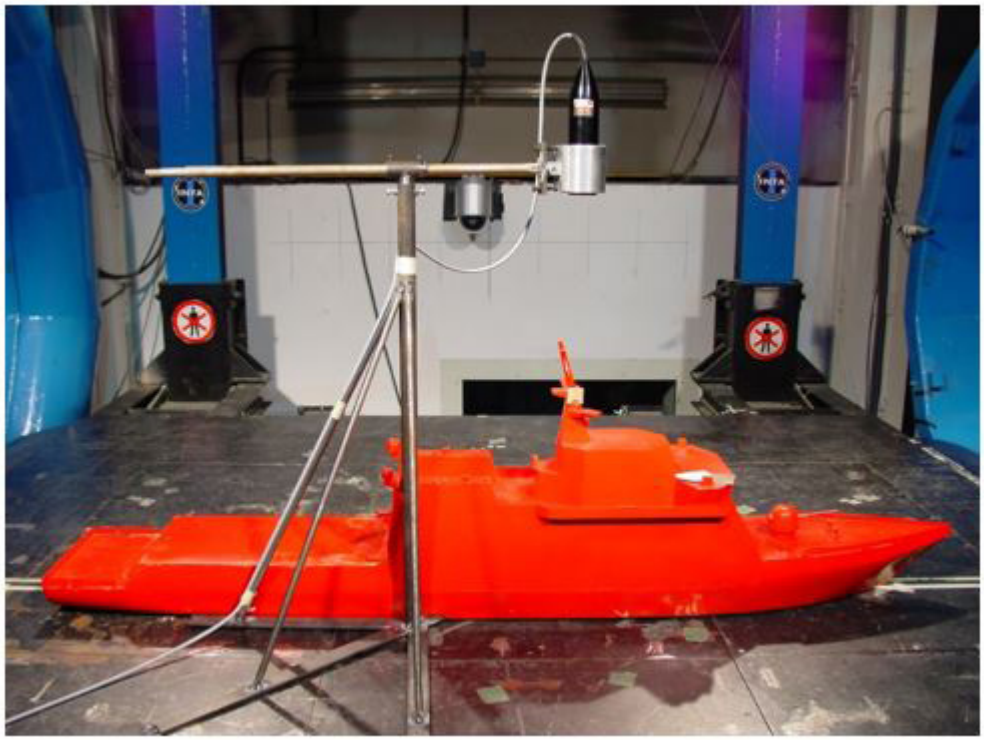


Figura 3. Maqueta de la fragata en la sección de ensayos del túnel.

Para la medida de velocidad en el punto donde se coloca el anemómetro de la fragata, se utilizó una sonda de anemometría láser doppler (LDA). Esta fue colocada sobre la misma plataforma giratoria que soporta el modelo, para así moverla solidaria al modelo de buque al variar los ángulos de incidencia de la corriente, con mínima interferencia sobre el flujo.

4. Técnica de medida LDA (anemometría láser doppler)

La caracterización cuantitativa del flujo aerodinámico que afecta a los anemómetros se realizó a través de medidas puntuales de velocidad sobre la maqueta mediante anemometría láser doppler (LDA *Laser Doppler Anemometry*). Consiste en una técnica de medida de velocidad no intrusiva que requiere un flujo sembrado con partículas trazadoras. Dicha técnica permite determinar de forma experimental la magnitud de la velocidad en una dirección a partir de la medida de la velocidad de las partículas trazadoras transportadas por el flujo [4, 5].

La configuración más típica de una sonda de LDA es la de doble haz láser (*dual beam*) que se cruzan. Así, los dos haces interaccionan dando lugar a un patrón de franjas de interferencia de luz y sombra alternativamente. De esta forma, cuando las partículas trazadoras del flujo atraviesan el volumen de medida (cruce de ambos rayos), durante su recorrido dispersan la luz de modo intermitente al pasar por las franjas mencionadas.

Debido al efecto *doppler*, la luz dispersada tiene una variación en frecuencia respecto a la luz original de iluminación, que puede obtenerse como:

$$f_D = \frac{v_p}{d_f} \qquad (3)$$

siendo v_p la velocidad de la partícula y d_f el espaciado entre franjas, que puede calcularse como:

$$d_f = \frac{\lambda_b}{2sen\left(\frac{\theta}{2}\right)} \qquad (4)$$

donde λ_b es la longitud de onda del láser y θ el ángulo formado por los dos haces de luz láser.
Finalmente, mediante un fotodetector que recoge la luz dispersada por las partículas trazadoras y la convierte en señal eléctrica ya puede medirse la frecuencia f_D y obtenerse la velocidad deseada v_p.
En la figura 4 se muestra el esquema básico de funcionamiento del sistema y una representación gráfica del modelo de franjas en el volumen de medida.

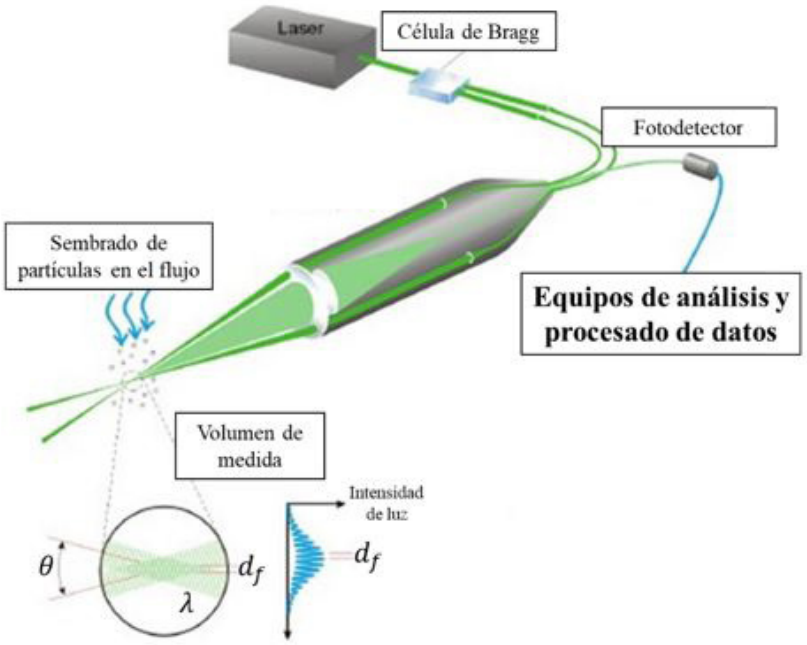


Figura 4. Esquema de la técnica LDA y patrón de franjas.

5. Resultados y discusión

5.1. Medidas en túnel de viento

El objetivo de los ensayos fue encontrar un factor de corrección , con el que la medida directa de velocidad de viento relativa medida por el anemómetro del buque , pueda ser corregida de los errores de medida que produce su posición en el mástil. Así, el viento relativo corregido podría obtenerse como:

$$V_{r\,c} = K \cdot V_{an} \qquad (5)$$

El factor de corrección k se podrá obtener entonces de las medidas en túnel de viento como la relación,

$$K = \frac{V_t}{V_{an}} \qquad (6)$$

donde V_t es la velocidad del viento correcta, en este caso la corriente libre proporcionada por el túnel de viento, y V_{an} es la velocidad medida en la posición del anemómetro con la sonda LDA.

Las medidas fueron tomadas a velocidades de la corriente libre V_t = 5, 10, 15 y 20 m/s. La figura 5 muestra los resultados obtenidos para un recorrido de 180 grados en acimut en el punto del anemómetro de babor, normalizados por la velocidad del túnel. Se puede observar un gran descenso en la medida de la velocidad a partir de los 50 grados de ángulo de viento relativo, que indica que el anemómetro está inmerso en la estela de su propio mástil.

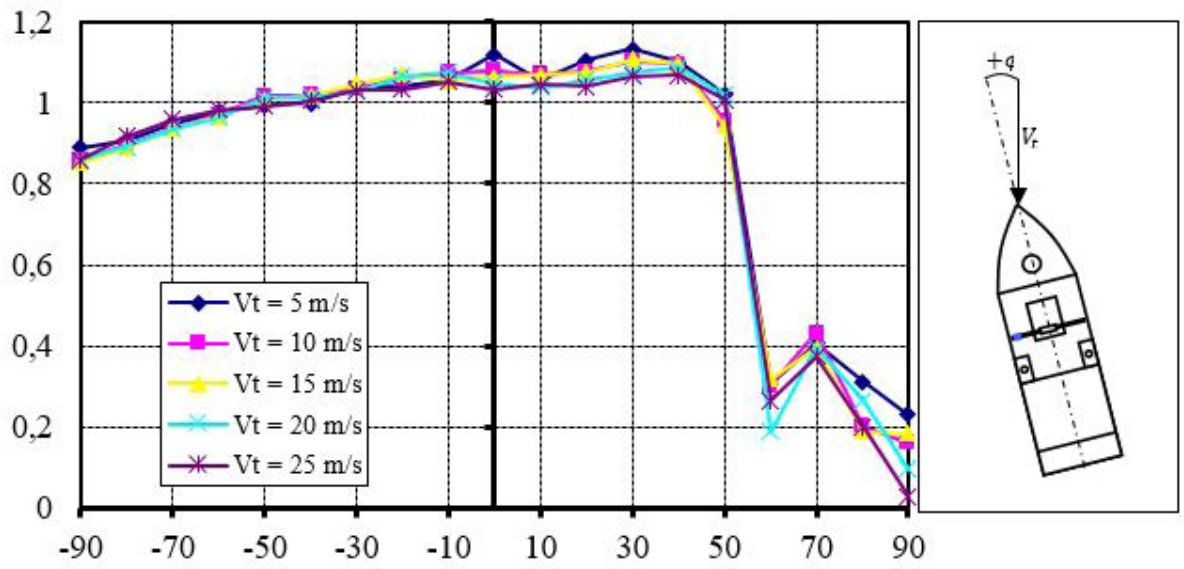


Figura 5. Relación entre la velocidad medida con LDA en el punto del anemómetro de babor (Van) y la velocidad de viento seleccionada en el túnel (Vt).

5.2. Velocidad de viento indicada

Como el barco tiene dos anemómetros colocados simétricamente sobre el puente de mando, el sistema que presenta los datos de velocidad de viento a la tripulación debe tomar únicamente el rango correcto de cada uno para dar datos fiables. Por lo tanto, dada la simetría del buque, la manera adecuada de utilizar los datos que proporcionan los anemómetros sería tomar el anemómetro de babor para el caso de un ángulo de viento entre los -90º a 0º grados y el anemómetro de estribor en el caso entre 0º y 90º, como se muestra en la figura 6, donde la velocidad indicada está normalizada por la velocidad del túnel de viento.

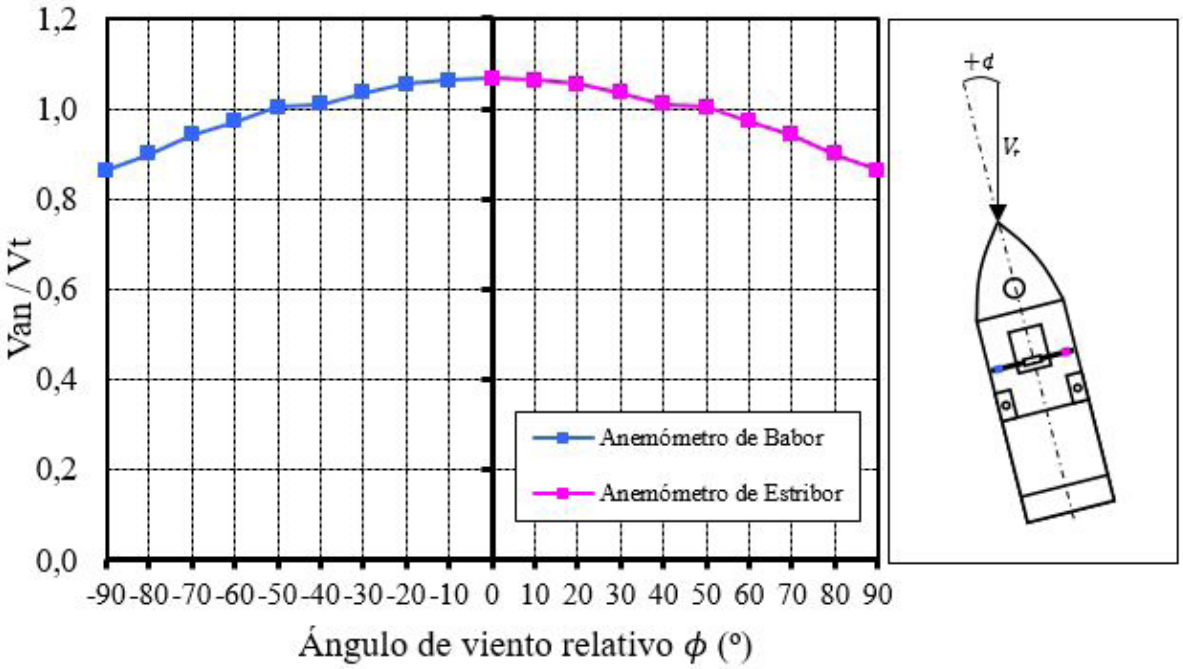


Figura 6. Velocidad de viento indicada por los anemómetros del buque.

Aun así, todavía se comete un error importante si los ángulos son grandes. Calculando el error relativo en porcentaje que comete el anemómetro en cada ángulo de viento relativo, mediante,

$$E(\%) = \left|\frac{V_t - V_{an}}{V_t}\right| \cdot 100 \qquad (7)$$

se obtiene que en las condiciones de viento más desfavorables (viento cruzado ±90º), el error relativo es del 13,7 % y cuando viene el viento de cara el error disminuye hasta el 6,8 %.

5.3. Corrección de la velocidad de viento

La figura 7 muestra la parábola de corrección obtenida mediante la curva inversa de la figura 6 ($k=V_t/V_{an}$) necesaria para corregir los efectos de posición del anemómetro. De esta forma, ajustando los datos experimentales con una parábola de segundo grado, el factor k corresponderá entonces a un polinomio de segundo grado (representado en una línea continua) y será función del ángulo de viento relativo ϕ (º) medido en grados sexagesimales.

$$K = 3 \cdot 10^{-5}\phi^2 + 2 \cdot 10^{-17}\phi + 0{,}9377 \qquad (8)$$

Así, podemos concluir que los valores de velocidad reales (sin perturbar), se podrán obtener a partir de los medidos por los anemómetros embarcados mediante dicho factor, tal y como se muestra a continuación:

$$V_{real} = K \cdot V_{an} \qquad (8)$$

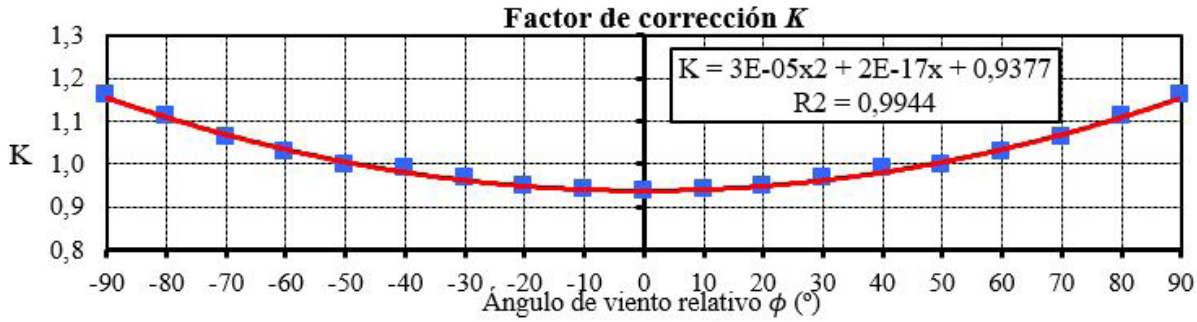


Figura 7. Parábola de corrección de velocidad en función del ángulo de viento relativo.

6. Conclusiones

En el presente comunicado se ha expuesto un resumen del estudio dirigido a caracterizar experimentalmente el efecto del posicionado de dos anemómetros en una fragata. Para ello, se han tomado medidas puntuales de velocidad mediante anemometría láser doppler, en la posición de los mismos sobre una maqueta a escala 1:50 en un túnel aerodinámico. Así, los resultados han mostrado que las medidas de velocidad se ven influenciadas por las perturbaciones del flujo que induce la presencia del mástil y la superestructura del buque. La perturbación es mínima en -50 y +50º y aumenta al alejarse de ellos.

De los resultados se ha deducido la necesidad de tomar los datos del anemómetro de babor para los casos de viento relativo entre -90º y 0º y el de estribor para el rango entre 0º y 90º. Finalmente, se ha visto que se deben corregir los datos de los anemómetros aplicando un factor de corrección obtenido, para así evitar los errores debidos a la posición del anemómetro en el buque y su inmersión en la estela en ciertas posiciones.

A la vista de los resultados, se puede concluir que se requiere una colocación cuidadosa de los anemómetros del buque para garantizar la seguridad de las operaciones aéreas. Una inadecuada elección de su posición puede dar lugar a que se proporcionen datos erróneos del viento al buque y las aeronaves comprometiendo la seguridad de las operaciones. Es por eso que el posicionado de los instrumentos de medida de viento debe considerarse en las primeras etapas del ciclo de diseño de un buque y cada vez que se cambie la geometría del mismo en profundidad, incluyendo la instalación de nuevos equipos.

Para su consideración y estudio deben realizarse ensayos en túnel de viento para evaluar cómo afectan las perturbaciones de flujo creadas por la presencia de la estructura del buque sobre las lecturas del anemómetro. Y aunque se está incrementando el uso de CFD [6-8] y sus avances futuros en simulación podrían reducir o eliminar la necesidad de ensayos reales, este sigue estando en un grado bajo de madurez y se prefieren ensayos a escala reducida en túnel de viento o incluso calibraciones a escala real en el barco, para confirmar que los anemómetros están colocados correctamente.

Agradecimientos

Los autores agradecen su colaboración al personal del Área de Ensayos Aerodinámicos del INTA que ha participado en los ensayos presentados en este comunicado.

Referencias

1. *Popinet S., Smith M., Stevens, C., Experimental and numerical study of the turbulence characteristics of airflow around a research vessel, J. of Atmos. and Ocean. Tech., 21 (10), 2004, 1575-1589 pp.*
2. *Moat, B.I.; Yelland, M.J.; Pascal, R.W.; Molland, A.F.. The effect of ship shape and anemometer location on wind speed measurements obtained from ships. In: 4th International Conference on Marine Computational Fluid Dynamics, Southampton, UK, 30-31 Mar 2005. The Royal Institution of Naval Architects, 133-139.*

3. *White, F. Dimensional Analysis and Similarity. In Fluid Mechanics. Fourth Edition. McGraw-Hill Companies, Inc. 2002, pp. 298-299.*
4. *Durst F. Melling A and Whitelaw JH. Principles and practice of laser Doppler anemometry. 2nd ed. London: Academic Press, 1981.*
5. *Albrecht HE, Borys M, Damaschke N, et al. Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques. Heidelberg: Springer, 2003.*
6. *Polsky S, Ghee T, Butler J, and Czerwiec R. Application of CFD to Anemometer Position Evaluation: A Feasibility Study", 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Fluid Dynamics and Co-located Conferences.*
7. *Polsky S. Computational Study of Unsteady Ship Wake, AIAA Paper 2002-1002, presented at the AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, January 2002.*
8. *Mateer, R, Scott, P, White, MD and Owen, I (2017) A CFD Study of the Aerodynamics of a Ship's Bulky Enclosed Mast. In: American Society of Naval Engineers Launch & Recovery Symposium, 2016-11-16 - 2016-11-17, Linthicum Heights, MD, USA.*

Efecto del viento en la pista de despegue del portaviones Juan Carlos I sobre las operaciones de aeronaves

Bardera Mora, Rafael[1,*], Rodríguez Sevillano, Ángel Antonio[2], Barroso Barderas, Estela[1,*]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas», Ctra. de Ajalvir, km. 4,5, 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid). Email: barderar@inta.es (RBM), barrosobe@inta.es (EBB).

[2] E.T.S.I. Aeronáutica y del Espacio. Universidad Politécnica de Madrid. 28040 Madrid. Email: angel.rodriguez.sevillano@upm.es (ARS).

* Autor principal y responsable del trabajo; barderar@inta.es (EBB).

Resumen

Los distintos elementos de los que consta la configuración del portaeronaves Juan Carlos I resultan tener su propio entorno aerodinámico, lo que da lugar a que exista una notable influencia sobre las operaciones de los vehículos aéreos que se desarrollan en la cubierta de vuelo. El flujo aerodinámico caracterizado por presentar condiciones extremadamente adversas tanto en la maniobra de aterrizaje como en despegue provoca un aumento de la carga del piloto y riesgo de accidente durante las mismas. Además, el grado de curvatura en sentido ascendente de la rampa de despegue genera una estela aerodinámica que se caracteriza por una burbuja de recirculación delimitada por una capa de cortadura turbulenta, envolviendo a la aeronave en los últimos instantes antes del despegue, pudiendo afectar a la seguridad del mismo, en el preciso momento, de lanzarse al vuelo sobre el mar.

En este sentido, el presente estudio experimental trata de obtener el campo de velocidades y turbulencia en la zona de la pista de despegue del buque. Para ello, se ha ensayado un modelo a escala reducida en el túnel aerodinámico de baja velocidad n.º1 del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). La investigación del flujo aerodinámico sobre la cubierta de vuelo se ha llevado a cabo mediante la técnica experimental no intrusiva de velocimetría por imágenes de partículas (PIV) permitiéndonos obtener una representación del flujo real en el que operarían las aeronaves sobre la cubierta de vuelo del portaviones determinando así las regiones más conflictivas de operación.

Palabras clave

Portaeronaves, rampa de despegue, PIV.

1. Introducción

El entorno aerodinámico en la cubierta de vuelo del portaviones LHD Juan Carlos I se encuentra influenciado por un gran número de factores, tales como la superestructura, las chimeneas, la rampa de despegue, las antenas de comunicación, los mástiles y radomos, los cuales determinan la configuración del propio portaeronaves dando lugar a un flujo aerodinámico característico del mismo. Este flujo aerodinámico se corresponde con un flujo complejo y no estacionario, por tanto la estela generada en el portaviones abarca la región cercana a la superestructura a través de los efectos de campo cercano y a la región que se extiende una distancia del orden de varias longitudes del propio buque. La vista de portaviones Juan Carlos I junto con los elementos citados se muestra en la figura 1.

Figura 1. Vista del portaviones Juan Carlos I.

El ambiente aerodinámico objeto del presente trabajo se corresponde al flujo del campo cercano, el cual está fuertemente influenciado por la superestructura de la rampa de despegue de aviones, que es uno de los sistemas más comunes de despegue desde un portaviones conocida también como *Ski-Jump Ramp*.

Dicho sistema, *Ski-Jump Ramp*, presenta las siguientes ventajas: aumento de ángulo de ataque de la aeronave que se traduce en un aumento de la sustentación del avión, reducción del 50 % en la distancia de despegue, mayor tiempo de reacción para el piloto, y un aumento de altura, que se corresponde con la energía potencial ganada proporcionando un cierto margen de seguridad para el arriesgado inicio de vuelo. Por otro lado, como inconvenientes de dicho sistema se encontrarían el incremento del factor de carga sobre el tren de aterrizaje y las perturbaciones aerodinámicas sobre la cubierta. Debido a la geometría que presenta la rampa de despegue, se generan flujos tridimensionales altamente turbulentos que pueden ser particularmente adversos para la operación de aeronaves [1] de donde surge la principal motivación para llevar a cabo un análisis del flujo aerodinámico en el tramo de la carrera de despegue, especialmente importante para la seguridad al comienzo de la maniobra de despegue de los aviones. La figura 2 muestra una aeronave en el momento inicial del vuelo sobre el mar.

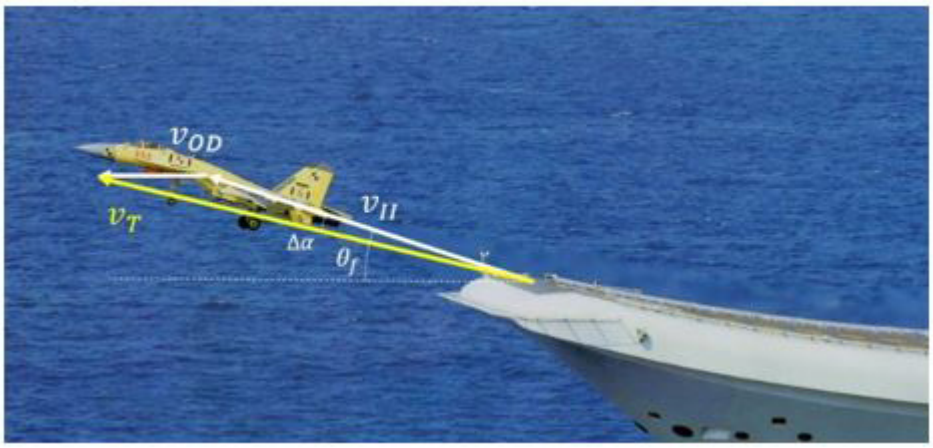


Figura 2. Aeronave en el inicio del vuelo.

La figura 3 muestra las operaciones de aeronaves sobre la cubierta del portaviones Juan Carlos I. La fotografía de la izquierda corresponde a la maniobra de aterrizaje de un helicóptero y la de la derecha a la maniobra de despegue de un avión de combate en la rampa de despegue (*ski-jump-ramp*).

Figura 3. Operaciones de aeronaves sobre la cubierta del portaviones Juan Carlos I.

En el presente trabajo nos centraremos en el flujo aerodinámico de toda la cubierta y en concreto en la rampa de despegue por ser de especial relevancia, estudiando el comportamiento del flujo aerodinámico sobre la misma de aviones de combate con viento de cara.

2. Velocimetría por imágenes de partículas (PIV)

Para caracterizar el flujo aerodinámico cuantitativamente se realizaron medidas del campo de velocidades sobre el modelo reducido del portaviones empleando la técnica experimental de velocimetría por imágenes de partículas o PIV. Dicha técnica permite determinar el campo de velocidades en un plano del flujo simultáneamente a partir de la medida de la velocidad local de las partículas trazadoras sembradas en la corriente del flujo.

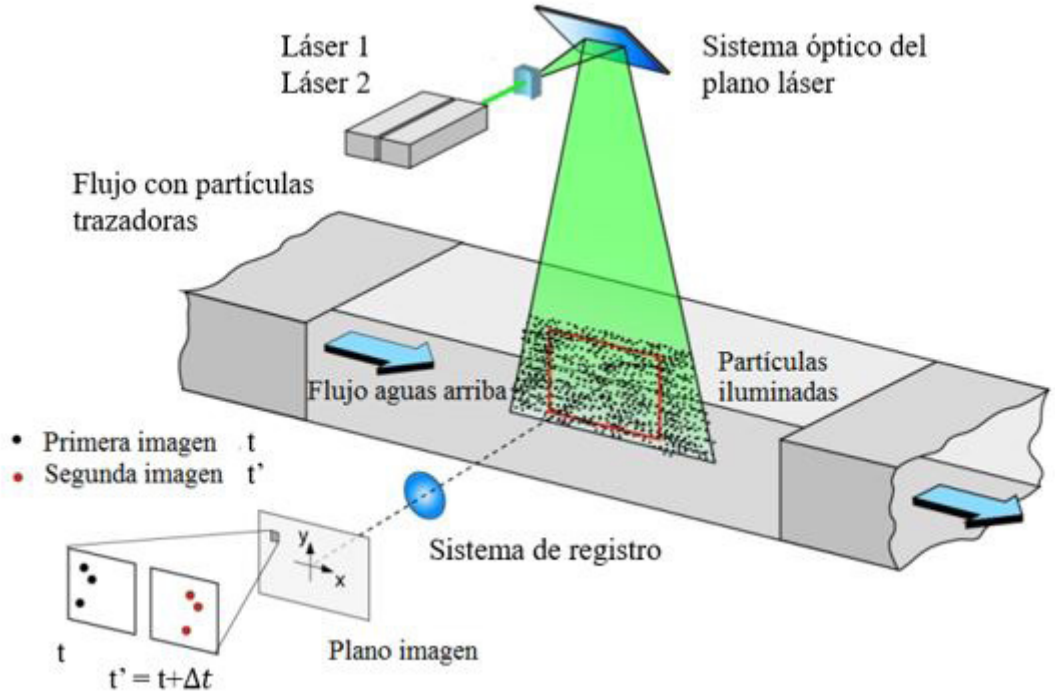


Figura 4. Esquema básico del funcionamiento de la técnica PIV junto con los elementos principales.

El principio físico de funcionamiento del PIV se muestra en la figura 4. Se basa en el análisis de imágenes del flujo, por lo que se requiere insertar en este partículas trazadoras que adquieran su velocidad y mediante la generación de un láser, generalmente pulsado, y utilizando la óptica apropiada, se consigue una delgada lámina de luz que atraviesa el flujo, iluminando las partículas contenidas en él. De este modo las partículas reflejan la luz láser desvelando su posición dentro del flujo, la cual es grabada por un sistema de registro, en este caso un sensor CCD. El láser es pulsado dos veces, por tanto el registro de fotografías de las imágenes de las partículas trazadoras se realiza en dos instantes separados un intervalo de tiempo conocido Δt. La medida de la distancia de separación entre las dos imágenes de cada partícula $\Delta\vec{X}$ trazadora, proporciona el desplazamiento recorrido por la partícula durante dicho intervalo de tiempo [2].

El desplazamiento $\Delta\vec{X}(\vec{X},t)$ que experimentan las partículas, se obtiene mediante la correlación estadística entre ambas fotografías, mientras que la velocidad local instantánea del flujo u, se calcula mediante la siguiente expresión,

$$\vec{u}(\vec{X},t) = \frac{\Delta\vec{X}(\vec{X},t)}{\Delta t} \qquad (1)$$

3. Montaje experimental de ensayos

El montaje experimental de la maqueta del portaviones Juan Carlos I para caracterizar el flujo aerodinámico sobre la cubierta se realizaron en el túnel aerodinámico n.º 1 de INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas»). Este túnel presenta una configuración de circuito cerrado y cámara de ensayos abierta de 3 × 2 m^2 de sección, llegando a alcanzar una velocidad máxima del flujo de 60 m/s y un porcentaje de turbulencia menor que 0,5. La figura 5 se corresponde con un esquema del túnel n.º1 de INTA junto con los componentes principales de los que consta.

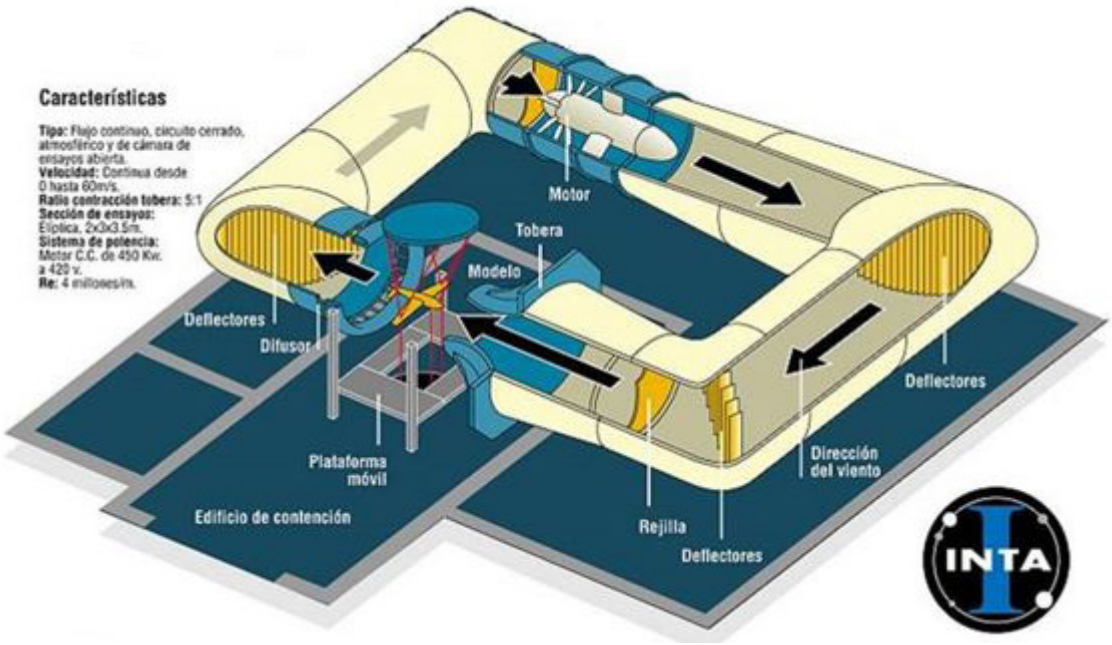


Figura 5. Esquema del túnel aerodinámico n.º 1 – INTA.

La figura 6 muestra el modelo del portaviones a escala 1:100 situada sobre la plataforma móvil en la sección de ensayos del túnel n.º1-INTA. La maqueta se encuentra fijada a dicha plataforma simulando la superficie marina, de manera que únicamente la superficie por encima de la línea de flotación se encuentra sometida a la acción del viento, tal y como sucede en la realidad. El plano de medida naranja se corresponde con el plano láser que iluminará las partículas trazadoras para el posterior análisis del flujo aerodinámico.

Los ensayos se han llevado a cabo con una velocidad de la corriente libre del túnel de 10 m/s (U_∞=10*m/s*), resultando un valor del número de Reynolds basado en la anchura de la maqueta de 1,82·10^5 (R_e=1,82·10^5), cuyo valor es superior al valor del Reynolds crítico imprescindible para cumplir la condición de semejanza dinámica entre el flujo aerodinámico sobre el modelo real y la maqueta [3].

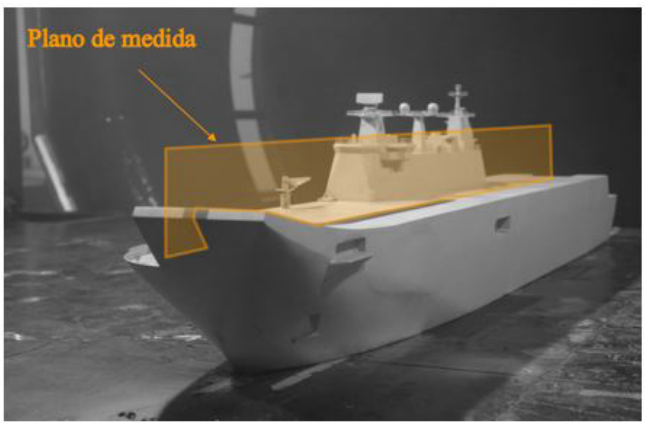


Figura 6. Plano de medida en la maqueta del portaviones Juan Carlos I en el túnel n.º 1–INTA.

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en los ensayos de PIV se corresponden con los clásicos mapas de las figuras 7 y 8, permitiendo visualizar de manera global la estructura del flujo aerodinámico. De este modo se explota la capacidad de la técnica PIV como técnica de visualización cuantitativa, siendo posible visualizar el flujo mediante las líneas de corriente (figura 7.b y 8.b) y mostrar los valores cuantitativos de la velocidad del flujo en cada punto del mapa.

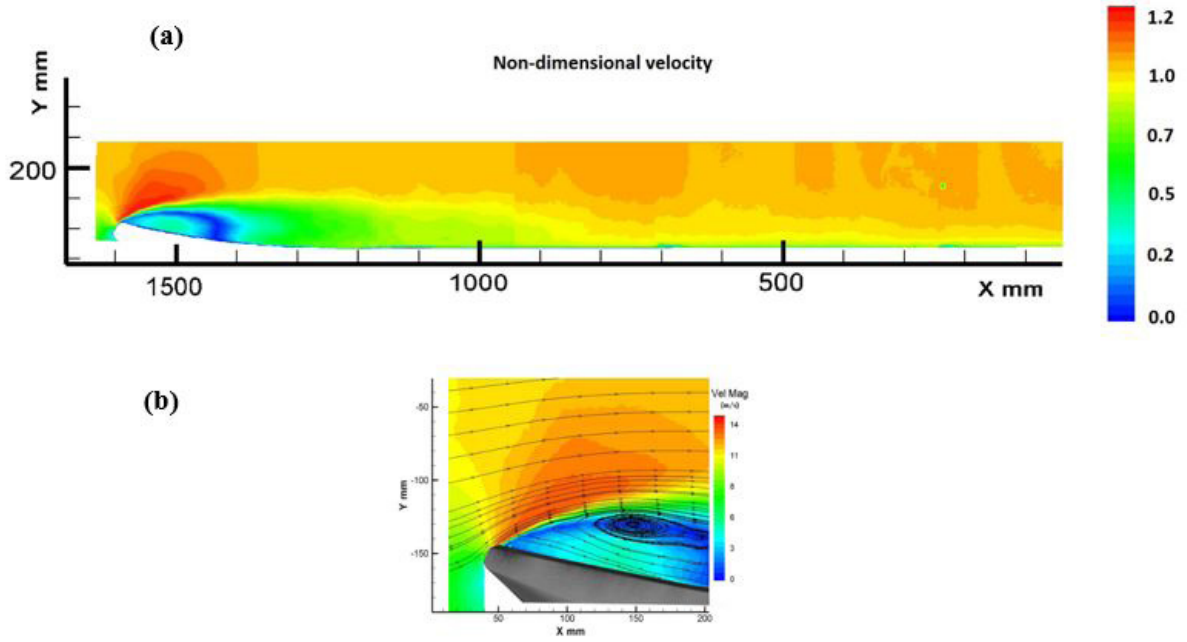


Figura 7. Mapa de velocidades del flujo sobre la cubierta del portaviones (a) y sobre la rampa de despegue (ski-jump ramp) (b).

La figura 7.a muestra el campo de velocidades adimensionalizado con la velocidad del túnel (U_∞=10m/s) en la cubierta del buque. Como se puede observar, se genera una zona azul en la rampa de despegue, que se corresponde con las velocidades más bajas de la escala de colores (figura 7.a) dando lugar a una burbuja de recirculación, seguida de una zona verde de velocidades también bajas que se extiende hasta la mitad del portaviones. Para analizar en mayor detalle la estructura del flujo sobre la rampa de despegue y obtener una conclusión más firme, se ha extraído un inserto y ampliado de la región del campo de velocidades en el plano situado encima de la rampa de despegue (figura 7.b). En este caso, la escala de colores del mapa indica la magnitud de la velocidad de viento en cada punto del mapa cuando la velocidad incidente en el túnel es U_∞=10m/s. Las líneas de corriente sobre el mapa de velocidades muestran la dirección del flujo, de este modo en la región azul, las líneas de corriente desvelan la presencia de una burbuja de recirculación con valores bajos de velocidad y localizada sobre la rampa de despegue tal y como era de esperar. Por otro lado, la región anaranjada que bordea la burbuja de recirculación se corresponde con la corriente exterior, la cual se acelera sobrepasando la velocidad de 10m/s de la corriente incidente en un 40 % para su máximo valor.

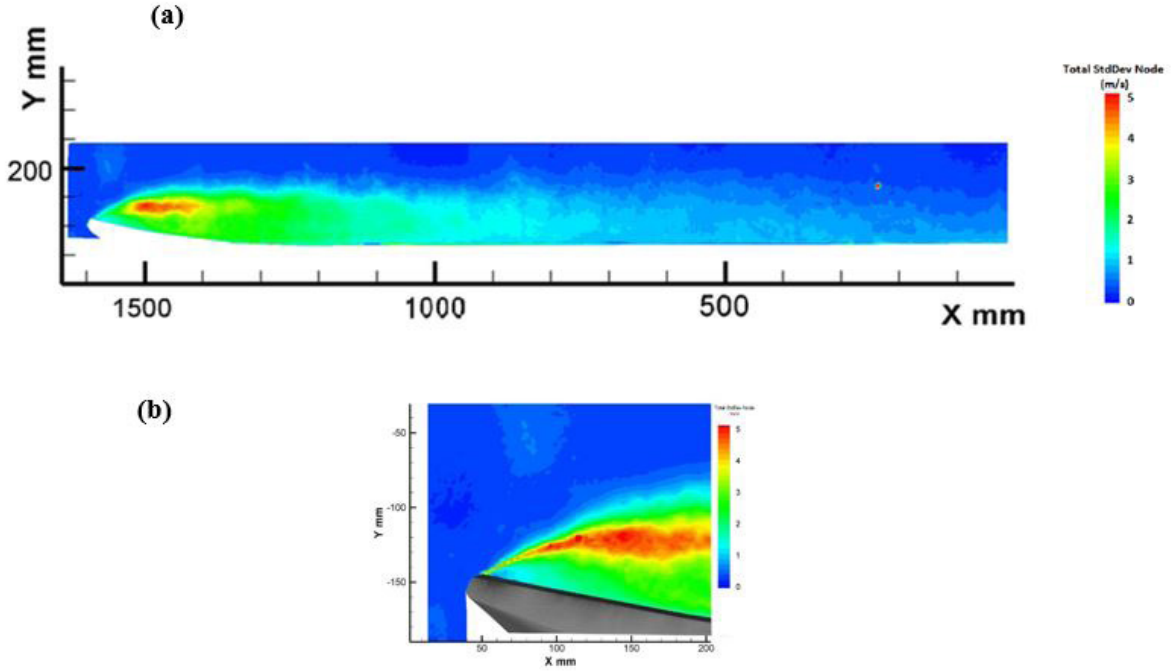


Figura 8. Mapa de desviación típica de la velocidad del flujo sobre la cubierta del buque (a) y sobre la rampa de despegue (b).

La figura 8 muestra el mapa de PIV correspondiente a la desviación típica de la velocidad del flujo σ, que representa la fluctuación de la velocidad respecto a su valor medio. La desviación típica se relaciona con la intensidad de turbulencia del flujo (*IT*)mediante la siguiente expresión,

$$IT = \frac{\sigma}{U_\infty} \qquad (2)$$

Por tanto, la desviación típica puede tomarse como una medida de la intensidad de turbulencia, y de este modo los mapas de la figura 8 representan distintos grados de turbulencia. La figura 8.a muestra el mapa de turbulencia del flujo aerodinámico generado sobre la cubierta del buque. Como se puede observar, el valor más alto de turbulencia aparece en la zona roja correspondiente a la rampa de despegue y con un valor aproximadamente del 50 %. Aguas abajo de esta región, aparece una zona verde, que se traduce en un grado menor de turbulencia siendo su valor aproximadamente del 25 %.

La figura 8.b muestra únicamente la rampa de despegue para visualizar con mayor detalle el flujo en la misma. De este modo, se observa que el mayor valor de turbulencia en la capa de cortadura turbulenta se produce cuando se encuentra la corriente libre exterior con el extremo de la rampa de despegue. La capa de cortadura emana desde el extremo de la rampa de despegue (es su origen) como un delgado hilo que va aumentando su espesor a medida que nos alejamos aguas abajo. Dicha capa de cortadura va bordeando la burbuja de recirculación visualizada en el mapa de velocidades.

5. Conclusiones

En el presente comunicado se ha caracterizado el flujo aerodinámico sobre la cubierta de vuelo del portaviones Juan Carlos I mediante un estudio experimental en túnel aerodinámico (túnel n.º1 de INTA). En concreto se ha estudiado el flujo aerodinámico sobre la rampa de despegue de aviones (*Ski-Jump Ramp*) por ser de gran interés para las operaciones de los mismos al generarse flujos tridimensionales altamente turbulentos, que son particularmente adversos para la operación segura de aeronaves, en el momento crítico de lanzarse al vuelo sobre el mar.

El análisis del flujo aerodinámico se ha realizado empleando la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Se ha obtenido el campo de velocidades y la intensidad de turbulencia en la cubierta de vuelo del portaviones. Los resultados obtenidos se muestran en los clásicos mapas de PIV junto con las líneas de corriente para visualizar la burbuja de recirculación encerrada bajo la capa de cortadura, visualizada en mayor detalle en los mapas ampliados de la región de la rampa de despegue.

Los resultados obtenidos en la caracterización del flujo aerodinámico sobre la cubierta de vuelo supondrán una base importante para futuras investigaciones ligadas al estudio aerodinámico en portaviones con operaciones de aeronaves de combate o helicópteros enfocadas a reducir el riesgo de accidentes.

Agradecimientos

Los autores agradecen su colaboración al personal del Área de Ensayos Aerodinámicos del INTA que ha participado en los ensayos presentados en este comunicado.

Referencias

1. *Lumsden, R. B. Ship Air-wake Measurement, Prediction, Modelling and Mitigation DSTL/TR06951. Defence Science and Technology Laboratory UK. April, 2003.*
2. *Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T. & Kompenhans, J. Particle Image Velocimetry –A Practical Guide-, Second Edition, Springer-Verlag Berlin, 2007.*
3. *White, F. Dimensional Analysis and Similarity. In Fluid Mechanics. Fourth Edition. McGraw-Hill Companies, Inc. 2002, pp. 298-299.*

Eficiencia energética en buques de guerra. Análisis de datos de consumo y posibilidades de reducción

Estarellas Perales, Luís[1,*], Carrasco Pena, Pedro[2], Álvarez Feijoo, Miguel Ángel[3], Fernández González, Raquel[4] y Suárez García, Andrés[5]

1 Armada Española. lestpe1@fn.mde.es (EPL).

2 Armada Española. pcarpen@fn.mde.es (PCP).

3 Centro Universitario de la Defensa (Marín). alvarezfeijoo@cud.uvigo.es. (AFMA).

4 Universidad de Vigo. raquelf@uvigo.es (FGR).

5 Centro Universitario de la Defensa (Marín). andres.suarez@cud.uvigo.es (SGA).

* Autor principal y responsable del trabajo

Resumen

La concienciación en materia de eficiencia energética (EE) debida al constatado cambio climático ha llevado a muchas organizaciones a plantearse el desarrollo sostenible en su actividad económica, consumo energético y respeto medioambiental buscando el mejor aprovechamiento de los recursos existentes. Así, reducir el consumo es primordial, siendo numerosas las inversiones y estudios en materia de mejora de la EE y esto, no es menos en el sector naval. Las directrices, recomendaciones, normas y legislación existentes, especialmente las emitidas por la *International Maritime Organization* (IMO), son ejemplo de este compromiso. Por su parte, la Armada, exenta de cumplir esta normativa obligatoria para buques civiles, ha incluido como parte de su responsabilidad social corporativa la autodisciplina en el cumplimiento voluntario de muchas de estas recomendaciones. Este trabajo analiza la normativa y elementos tecnológicos de aplicación en el sector y además, estudia los consumos reales de la fragata «Cristóbal Colón» (F-105) en un periodo de 669 días para descubrir posibilidades de reducción del consumo y de los efectos adversos de las emisiones en favor de la sostenibilidad y el cuidado medioambiental. Alcanzar una mayor eficiencia supondrá un ejemplo a seguir por otras organizaciones, y será muestra del compromiso con el respeto medioambiental y la sostenibilidad sin tener que mermar la efectividad.

Palabras clave

Eficiencia energética, buque de guerra, consumo de combustible, mejora energética, medioambiente.

1. Introducción

La reducción de los recursos económicos, el agotamiento de los energéticos no renovables y la falta de concienciación en el plano del cambio climático [1], son obstáculos si queremos implantar medidas efectivas en el campo EE. La EE es fundamental en políticas de I+D en defensa y debe cubrir elementos normativos y tecnológicos que optimicen el uso de recursos cada vez más limitados. Existe normativa y legislación [2] que ha venido implantándose últimamente como elemento obligatorio en todos los ámbitos, también en el sector marítimo civil propiciando la aparición de estudios de mejora en EE y protocolos o guías particularizadas [3] que no se han contemplado en el ámbito militar, lo que no ha propiciado estudios en esta materia y la aparición de literatura relacionada con este.

La normativa más desarrollada corresponde a la IMO que, ya en 1997, presentó los primeros estudios sobre niveles de CO_2 en el sector. Con un himpas de 10 años, será en 2011 cuando la IMO presente sus reglamentos y herramientas en EE para el diseño *Energy Efficiency Design Index* (EEDI), para la gestión con el *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP) y la herramienta de determinación de índices de operación relacionados con la emisión de CO_2 *Energy Efficiency Operational Index* (EEOI) que han generado abundantes análisis y estudios de aplicación en el sector marítimo civil [4] [5].

El MINISDEF ha venido preocupándose por la EE desde hace tiempo. En 1996 [6] se presenta un estudio medioambiental sobre los productos que un buque de guerra solía tener a bordo potencialmente contaminantes. Así llegamos a 2007, cuando la Armada en la figura del almirante jefe del Estado Mayor de la Armada (AJEMA), fija la política medioambiental en un compromiso de mejorar la EE y el respeto ambiental en el adiestramiento y preparación de la fuerza. En 2013 se celebran las jornadas sobre EE y medioambiente ratificándose lo ya implantado por el AJEMA en 2007.

En lo tocante a las marinas de guerra de nuestro entorno, la USN desde 2009 acomete esfuerzos para reducir el consumo al 50 % implantando energías alternativas en el horizonte 2020. Una meta fundamental marcada en 2012 con el programa de flota verde *Great Green Fleet* buscó demostrar que la reducción del consumo no mermaba la operatividad y así, efectuó ejercicios reales con unidades del grupo de combate del CVN-68 USS «Nimitz» para demostrar esto [7]. Otras marinas como la *Royal Navy* aplican políticas semejantes de protección de los fondos marinos, la RAN australiana acomete planes de mejora de la gestión energética y medioambiental, en la misma línea se han desarrollado estudios en la RCN canadiense y en la marina italiana con su propio concepto de flota verde.

Toda esta normativa, busca actuar en tres líneas básicas que son: reducir los costes de operación; reducir los costes de ciclo de vida (CV) y reducir el impacto medioambiental buscando la sostenibilidad. El elemento normativo debe ir unido a las mejoras tecnológicas destinadas a reducir el consumo y las emisiones que fundamentalmente se refieren a mejoras del proyecto como la optimización de las formas, mejoras en los sistemas energéticos embarcados, aplicación de tecnologías ITC de análisis del funcionamiento del buque y la aplicación de nuevos materiales y energías alternativas [8] [9].

El objetivo fundamental de este trabajo es comprobar el tipo de medidas normativas y tecnológicas que se han venido desarrollando y la posibilidad de aplicarlas en buques analizando como ejercicio práctico datos reales de un buque tipo fragata.

2. Desarrollo

La fragata «Cristóbal Colón» es la quinta de la clase «Álvaro de Bazán» y puede considerarse unos de los buques de guerra más avanzados tecnológicamente del mundo. Las características generales de la F-105 le permiten actuar como buque de escolta o mando y control, asumiendo funciones propias de una fragata o un destructor. Su sistema de propulsión es CODOG (*Combined Diésel or Gas*) compuesto turbinas de gas GE LM-2500 de 17.500 *kW* y motores diésel Bravo 16V, Navantia/Carterpillar de 5.650 *kW*; las primeras se emplean para alta velocidad y los segundos para velocidad de crucero. Mueven dos líneas de ejes con hélices de paso controlable, de 5 palas y 4,65 metros de diámetro. La generación eléctrica corre a cargo de motores MTU de 1.200 KW c.u. El combustible utilizado es combustible normalizado por la OTAN DFM, *(Distillated Fuel Marine)* OTAN, F-76, con un máximo de contenido de azufre (S) del 1 %.

La base de datos de estudio abarca 669 días, entre octubre de 2012 y julio de 2014 cuando finaliza su primer ciclo operativo. Los datos comprenden el consumo de la propulsión y los de generación y han sido tomadas de los estadillos generales del buque. En el periodo correspondiente a 2012 el buque efectúa navegaciones cortas en aguas costeras de Galicia. Durante 2013 el buque navega más tiempo, visitando puertos como Rota y Cartagena, participando en diversos ejercicios para la instrucción y el adiestramiento. En 2014 la actividad del buque se trasforma y, con la superación de la calificación operativa (CALOP), fue designada buque de mando de la segunda fuerza de intervención rápida de la OTAN, SNMG-2 (*Standing NATO Maritime Group 2*), en la misión «*Ocean Shield*» de lucha contra la piratería en el golfo de Adén y el Cuerno de África. El desarrollo de esta misión tuvo lugar entre el 14 de marzo y finalizó el 8 de julio en Málaga. La base de datos se ha descompuesto sobre los modos de funcionamiento del buque siguiendo los estándares y la clasificación de la OTAN considerándose cuatro situaciones:

1. Puerto: el buque está atracado con dos posibilidades, una en la que permanece encendido con sus propios medios y la otra apagado recibiendo toda la energía eléctrica necesaria de la red eléctrica terrestre. Estas posibilidades se han referido como puerto encendido (P.E.) y puerto apagado (P.A.).
2. Crucero: está relacionado con la navegación a velocidad económica de un punto a otro del Globo. Se le ha denominado con la letra N. El barco produce toda la energía necesaria.
3. Operación: cuando un buque está cumpliendo la misión concreta se dice que está en operación. El buque produce toda la energía necesaria. Se ha referido con N también ya que esta dura horas reducidas dentro de las situaciones de navegación y, no se ha visto necesario discriminarlas.
4. Aquellas situaciones en las que durante el mismo día el buque está en puerto y navegando, se han denominado Puerto Encendido y Navegando (P.E.N.).

3. Resultados y discusión

En función de la situación, el buque se puede encontrar como en P.E., P.A., P.E.N., y N. Se indican los tiempos que ha pasado en cada situación. Los datos se han volcado en una hoja de cálculo que presenta sumatorios de consumo totales (C. TOTAL) indicando la cantidad de combustible empleado en los DD. GG. y los MM.PP. las millas recorridas, la velocidad media calculada en base a distancia y el tiempo en cada modo. En la tabla 1 se muestran los totales porcentuales por ejercicio anual.

Modos de operación	**2012**	**%**	**2013**	**%**	**2014**	**%**	**Total**	**%**
P.A.	53	58	125	34	24	11	202	30
P.E.	33	36	179	49	68	32	280	42
N.	1	1	33	9	93	43	127	19
P.E.N.	5	5	28	8	27	29	60	9
Total	**92**	**100**	**365**	**100**	**212**	**100**	**669**	**100**

Tabla 2. Distribución de los días por modos de operación

El modo P.A. es la más importante en 2012 pues el buque se encontraba terminando sus pruebas previas a la entrega. El número de días de N sube en 2013, como los días de P.E. pues es en este año cuando comienzan las navegaciones de cierta entidad. En 2014 los modos P.A. y P.E. están al nivel de los N con un 43 %.

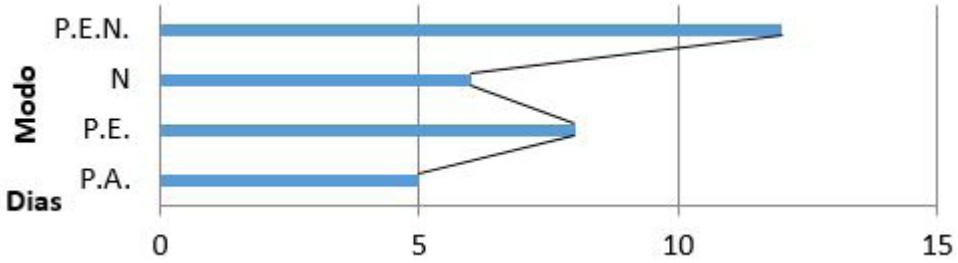


Figura 1. Distribución de los días por modo durante la CALOP.

En la CALOP (figura 1) destaca la P.E.N. debido a las entradas y salidas continuas en los días de ejercicios con el 39 % y en N. el 19 %. El análisis del periodo entre el 23 de febrero y el 10 de julio de 2014, un total de 138 días. En este periodo se activa como buque de mando en la SNMG-2 (figura 2). El periodo analizado del 2014 el buque desarrolla las funciones para las que está diseñado. La condición de P.E. La condición de N. ocupó el 63 % del periodo de la operación.

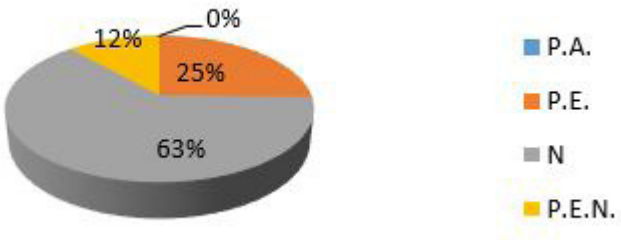


Figura 2. Distribución en porcentaje del tiempo de la SNMG-2.

De todas formas, tomando como referencia el análisis general del periodo completo, este se adapta bien a las estimaciones calculadas para su CV operativo manteniéndose los porcentajes dentro de los establecidos para cada una de las condiciones o modos de funcionamiento del buque [10] y que podemos ver en la tabla 2.

Periodo	**Condición**	**% tiempo de su vida útil**
En la mar	Crucero / Fondeado	27-30
	Operación	3-5
En puerto	Apagado	45-50
	Encendido	10-15
	Mantenimiento	10

Tabla 3. Distribución del tiempo del ciclo de vida (CV)

En los 669 días, el buque consumió 1,85 millones de litros (*Ml*) de F-76 en generación eléctrica en los distintos modos de funcionamiento y 3,39 Ml en propulsión con un total de 5,24 Ml, navegando un total de 42.975 millas náuticas (*nm*). De estas, 28.936 (el 67 % del total) las recorrió en el despliegue de la SNMG-2 consumiendo 2,91 Ml de F-76 que representan 56 % del total. El periodo de la SNMG-2 nos

permite analizar la correlación entre consumo y temperatura del agua de mar (T_{am}) en la condición de P.E. en distintos puertos del mundo, para lo que se han considerado las medias de T_{am} en los periodos de puerto y cotejar la influencia de T_{am} en el consumo y comprobar la validez de los resultados del estudio de 2016 *Eficiencia energética en buques de guerra: un caso práctico* en el que se establecía correlación de estas variables en base a (1) donde: r_{xy} es el valor de la correlación; $Cov\ (X, Y)$ es el valor de covarianza de las matrices *X*, *Y*; *X* e *Y* representan los datos de consumo de combustible y T_{am} y $\sigma_x y\ \sigma_y$ son las desviaciones típicas de las variables estudiadas.

$$r_{xy} = \frac{Cov\ (X,Y)}{\sigma_x\ .\ \sigma_y} \qquad (1)$$

Con la correlación de Pearson buscamos conocer el nivel de influencia entre variables. El valor $|r|$ debe encontrarse entre [0,1] siendo más fuerte la correlación cuanto más cerca esté 1, tomando los días de puerto de la SNMG-2 la correlación entre consumo y temperatura del agua de mar media del periodo, vemos que se presenta factor Pearson (r) de $r = 0{,}46$ que se puede considerar moderado y, con una influencia en el consumo $r^2 = 0{,}21$.

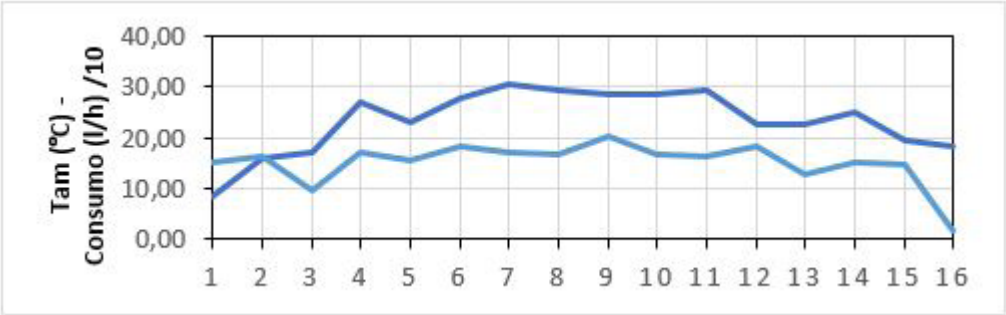


Figura 3. Temperatura del agua de mar y consumo normalizados.

La T_{am} responde a valores promedios tomados de los datos de sistema integrado de control de plataforma (SICP) del buque. La ilustración 4 presenta la distribución de los valores normalizados de T_{am} y del consumo/hora, gráficamente se observa la relación entre estas dos variables.

La EE se analiza con el EEOI, será mejor cuanto más bajo, pues indicará menor cantidad de CO_2 por valor del trabajo realizado. Para su cálculo hemos empleado la calculadora desarrollada en el Centro Universitario de la Defensa (CUD) de Marín [11] y presentada en el congreso de seguridad y defensa de 2017 en Toledo. Las diferencias en el EEOI presentado se hacen para adaptar este a buques de guerra con respecto al EEOI genérico de la IMO.

Las directrices emitidas por el MEPC para la elaboración del EEOI definen dicho indicador como la relación de masa de CO_2 emitida por unidad de actividad de transporte marítimo para lo que se aplica (2) donde: *j* es el combustible; FC_j: masa de combustible *j* consumido; C_Fj es el factor de conversión FC_j y masa de CO_2 emitido para *j*; m_{carga} es la carga transportada en toneladas (*Tn*), la actividad realizada (número de pasajeros) o el arqueo bruto de los buques de pasaje y *D* es la distancia en millas marinas recorrida.

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{F\,j}}{m_{carga} \times D} \qquad (2)$$

La modificación al EEOI utiliza una combinación del desplazamiento y el número de personas que forman la dotación, al ser estos valores constantes en los buques de guerra. Considerando para las emisiones un factor de 3,21 gramos (*g*) de CO_2 por mililitro (*ml*) consumido de F-76. La calculadora desarrollada para el EEOI busca servir como base de implantación del SEEMP de la OMI en la Armada y ser útil como guía para reducir así el consumo objetivamente, permitiendo un cálculo sencillo del mismo en

base a los datos de consumo diario, el tipo de combustible, la distancia navegada y la carga transportada dividido entre el producto del desplazamiento del buque y su dotación obteniendo con ello el CO_2 emitido por unidad de trabajo realizado. Los valores del EEOI modificado oscilaron para el periodo SNMG-2 (el más característico por el peso del consumo frente al periodo completo) entre 47,8 de la etapa Estambul Nápoles y el valor de 76,3 de la etapa Málaga Ferrol. El valor medio del indicador EEOI modificado para buques de guerra es de 54,4. Sin desglosar el consumo de generación eléctrica del de propulsión este oscila entre 89,3 litros (*l*) de F-76 por milla navegada y 147,5 *l* correspondiéndose con los valores de EEOI extremos. El consumo medio del periodo completo es de 106,2 *l* por milla.

Considerando el consumo de propulsión aislado del consumo de generación, este oscila entre los 64,4 *l* por milla navegada y los 127,9 *l* por milla con un valor medio de 82,13 *l* por milla. Esto se ajusta a valores de fabricante que estimaron un consumo de entre 90 y 100 *l* para estos motores. Hay que tener presente que los valores de consumo de las turbinas se encuentran incluidos en este valor medio y recordar que estas se emplean puntualmente cuando existe gran demanda de velocidad, manteniéndose arrancadas el tiempo imprescindible. Las turbinas en bajo régimen consumen más que el diésel y podemos considerar que, para motores diésel el rango máximo 175 *gr/KWh* al 95 % de carga y 200 al 20 % y en turbina de gas 207 *gr/KWh* al 95 % y, 400 al 20 % [12]. Las emisiones de CO_2 con un factor de 3,21 *g/ml* para F-76 en la SNMG-2 fueron de 10.020 Tn de CO_2, con un valor medio horario en navegación de 3,741 *Tn/h* y en puerto 0,484 *Tn/h* lo que representa un valor diario en la condición N de 89,79 *Tn/día* y en P.E. 11,62 *Tn/día*. La ilustración 5 presenta los valores de huella de carbono diaria en *Tn*, y se pueden apreciar perfectamente los días de puerto en las zonas de consumo más bajo y estables.

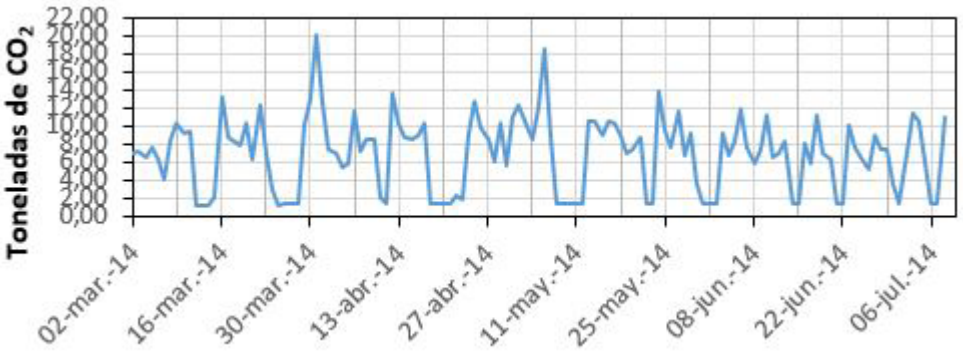


Figura 4. Gráfico de emisiones de GEI.

Con el coste del combustible F-76 (*l*) proporcionado por la Armada de 420 € por m^3 y, considerando la paridad de equivalencia euro/dólar durante el periodo analizado, fue de 0,7303 € en relación galón (*gl*) estadounidense de 3,78541 (*l por gl*) el precio medio del litro de F-76 durante el periodo objeto a estudio fue de 0,5729 € (tomado de las *XE Currency Charts* de Internet). Considerando el periodo de la SNMG-2 el coste total del periodo fue de 1.666.681 € tomando el precio de 0,573 €/*l* por lo que podemos decir que el coste de un día de despliegue supone un coste medio de14.493 €/*día*.

La EE medida con el EEOI es variable y depende del modo así, el valor del viaje Málaga Ferrol, se dispara a un valor de 76,5 debido al mayor consumo de combustible, pues en esta etapa, entre otras actividades de ejercicios navales, el buque navegó a mayor velocidad que en el resto de la SNMG-1 y empleó las turbinas de gas que tienen un consumo mucho mayor que el diésel. Observamos cómo el EEOI tiene como media la puntuación de 54,35. La mayoría de las navegaciones están ligeramente por debajo de la media, pero, esto es debido al valor de la mencionada etapa Málaga-Ferrol donde la media fue superior a los 15 nudos y notablemente superior al resto de las navegaciones, lo que conllevó un mayor consumo y emisión de CO_2.

Los datos mostrados como ejemplo del funcionamiento de la calculadora en el TFG del CUD de Marín de 2016 muestran resultados diferentes, pero, esto resultados, son de un periodo muy corto dentro de las pruebas de mar en 2012 de 12 días siendo poco amplios para establecer el comportamiento del EEOI y, evidentemente, se emplearon con la única finalidad de servir de ejemplo. Así, los datos empleados en este trabajo ofrecen unos valores más objetivos por abarcar un periodo operativo amplio y real de operación validando también la calculadora.

Con respecto al consumo total de combustible hemos observado que la dispersión con respecto a la media es mayor debido a las distintas necesidades operativas en cada modo, dependiendo también de las distancias recorridas y las distintas zonas en las que se encontraba el buque. Por necesidades de la misión, se pueden dar situaciones donde se requiere mayor velocidad o consumo de los sistemas de armas y, por consecuencia, el consumo aumenta. En N, evidencia la gran diferencia que existe entre la propulsión y el consumo eléctrico del buque.

Las correlaciones entre el consumo de los DD.GG. en P.E. y la T_{am} con $|r| = 0,46$ (correlación moderada) difiere en cierta medida del artículo de referencia de 2016, pero esta diferencia tiene lógica pues estamos empleando valores promedio de temperatura de periodos largos que desvirtúan en cierto modo el valor obtenido, pero que ratifican en cierta medida lo afirmado en 2016. Si bien, hemos hecho un análisis de correlación lineal y, aun teniendo en cuenta el resultado, la relación requiere de estudios más minuciosos con otro tipo de elementos no lineales.

La huella de carbono del buque es 7,5 veces más alta en N. que en P.E. pero, esta última situación, concentra la contaminación y, suponiendo una distribución homogénea de la contaminación durante los desplazamientos, tenemos una dispersión mayor y, en principio, un impacto menor de forma local.

4. Conclusiones

Los estudios en EE sobre buques de guerra son escasos. Del estudio y análisis de los datos reales se deriva que la partida presupuestaria necesaria para hacer funcionar este tipo de unidades en cualquiera de sus modos de funcionamiento necesita de inversiones que están sujetas a la volubilidad del mercado del petróleo y los tipos de cambio.

El valor del EEOI calculado se encuentra en valores similares a los estimados en trabajos anteriores lo cual, valida esta herramienta para su uso en buques de guerra así como, las variaciones consideradas en algunas de las definiciones de los parámetros implicados en las fórmulas para acomodar este cálculo a los buques de guerra.

La correlación lineal (consumo/condiciones ambientales) es fundamental para el diseño y explotación de estos buques desde una perspectiva dinámica; el tradicional análisis estático basado en máximos y mínimos no favorece la implantación de medidas de EE. El valor obtenido en este estudio ($r=0,46$) es moderado, pero apuntan a la importancia de las variables medioambientales como la T_{am} en el consumo y, por tanto, en la huella de CO_2 del buque, la cual se muestra más elevada en el modo de navegación que en las estancias en puerto, siendo esta última donde la concentración de la contaminación se hace de forma puntual en zonas costeras.

Las líneas futuras pasan por implantar un sistema tipo SVN (obligatorio a partir de 2020) para todos los buques de la UE o el SEEMP de la IMO, que permita bases de datos amplias y definir los niveles de contaminación de los buques. El análisis de estos datos reflejará la evolución del consumo y contaminación durante el CV de los buques. Con el EEOI es necesaria una calculadora como la desarrollada en 2016 [11] y, aplicando tecnologías *ICT,* integrando en los sistemas el *IoT* y usando programación del entorno *Bigdata* para el análisis en tiempo real, supondrá un avance en el entorno 4.0 de la EE. Se hace necesario avanzar en el uso de energías renovables en los buques y en instalaciones de apoyo para limitar la concentración de emisiones en estas zonas.

Referencias

1. *ONU, Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático., 1998.*
2. *Gobierno de España, «Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2014-2020», MINETAD, 2014.*
3. *División de Recursos Naturales e Infraestructura, CEPAL, «Medidas para mejorar la eficiencia energética en el transporte marítimo», CEPAL, 2013.*
4. *K. Anderson y A. Bows, «Executing a Scharnow turn: reconciling shipping emissions with international commitments on climate change», Carbon Management, pp. 615-628, 2014.*
5. *P. Gilbert y A. Bows, «Exploring the scope for complementary sub-global policy to mitigate CO2 from shipping», Energy Policy, vol. 50, pp. 613-622, 2012.*
6. *Larburu Echaniz, «Protección ambiental marina: actuaciones de la Armada española», de Tecnología, medioambiente y defensa, FIAT-AUTO España S.A., 1996.*
7. *A. M. Chambers y S. A. Yetiv, «The Great Green Fleet: The U.S. Navy and Fossil-Fuel Alternatives», Naval War College, Newport, 2011.*
8. *S. Buchanan, «Energy and Force Transformation», Joint Force Quaterly Magazine, pp. 51-54, 2006.*
9. *R. Hebner, J. Herbst y A. Gattozzi, «Large Scale Simulations of a Ship Power System with Energy Storage and Multiple Directed Energy Loads», 2010.*
10. *R. Hernández, R. Férnadez, E. Arce, G. Rey, A. Férnadez y P. Carrasco, «Análisis del ciclo de vida de las fragatas de la serie F-100», de V Congreso de Seguridad y Defensa, San Javier, 2016.*
11. *A. Liarte Pérez, Traslación y aplicación de la normativa de la eficiencia energética en la marina mercante al ámbito militar, Marín: Centro Universitario de Defensa, 2017.*
12. *A. Alday Rueda y y. otros, Propulsión naval con turbinas de gas, Bilbao: Escuela técnica superior de ingenería, 2014.*

Evolución del apoyo logístico en la Armada mediante tecnologías 4.0

F. Lamas López[1]*

[1] Alférez de Navío (Dr. Ing.), Armada española, Arsenal de Cartagena-CESADAR (Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada), Cartagena, España.

* *Contacto: flamlop@mde.es*

Resumen

La Armada española se encuentra inmersa en la digitalización de sus procesos logísticos desde el diseño, construcción y ciclo de vida hasta el mantenimiento de sus unidades. Esto permitirá la automatización y predicción de las tareas de mantenimiento basado en la condición. El desarrollo de herramientas ligadas al mantenimiento predictivo estará centrado no solamente en los datos obtenidos en el CESADAR sino también por otros sistemas como los ligados al control de configuración de equipos embarcados. Este estudio exploratorio muestra cómo la información de ambos dominios, comportamiento mecánico y control de la configuración, deben ayudar a mejorar las predicciones de malfuncionamientos de un equipo. Para ello, se utilizan datos provenientes de dos motores propulsores de un buque generados desde el 2015 hasta el 2018. A partir de datos de comportamiento mecánico y análisis de los mismos pueden delimitarse modos de funcionamiento diferentes. Con estos registros y con ayuda de técnicas asociadas al aprendizaje automático, se pretende clasificar los diferentes modos de funcionamiento que afecten al normal mantenimiento de un propulsor antes de que ocurran. La predicción de distintos modos de funcionamiento de motores propulsores realizada en CESADAR-Central, puede ser de interés para las dotaciones de los buques en el caso de poder realizar las predicciones a bordo. Esto podría ayudar a prevenir modos de funcionamiento no deseados sobre los propulsores del buque durante sus operaciones. Se puede concluir que el uso de técnicas ligadas al aprendizaje automático es un método eficaz para la clasificación de patrones de un modo de comportamiento concreto. El uso de estas herramientas a bordo puede ayudar a prevenir modos de uso no deseados en tiempo real y debe ser una ayuda efectiva a la decisión de las dotaciones en operación.

Palabras clave

Mantenimiento predictivo, aprendizaje automático, ayuda a la decisión, redes neuronales, clasificación de patrones.

1. Introducción

La Armada española se encuentra inmersa en la digitalización de sus procesos logísticos. Eso incluye todo el ciclo de vida de las unidades, desde su diseño hasta su uso pasando por la producción de las mismas. Esto se encuadra en el concepto de Apoyo Logístico 4.0 (AL 4.0) [1]. Los sistemas deben de ser capaces de prever su malfuncionamiento y comenzar automáticamente a gestionar su recambio o mantenimiento. Con el principal objetivo de aumentar la seguridad a bordo y la calidad de las operaciones. La actual predicción de eventos se alimenta de datos aportados por el sistema integrado de control de plataforma (SICP). Estos son datos relativos a sensores instalados en los sistemas de plataforma del buque, registrados diariamente en los servidores del Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada (CESADAR) situado en Cartagena [2]. El SICP es el encargado a bordo de los buques de la supervisión y el control de los sistemas de maquinaria y componentes del buque. Los datos registrados por los sensores enlazados al SICP son transmitidos diariamente al CESADAR, recibiendo este diariamente datos de sistemas monitorizados de 29 buques de la Armada. Desde los años 90 ha habido un incremento de las técnicas de minería de datos como medio para obtener nuevo conocimiento [3]. Los retos asociados a la gestión de grandes volúmenes de datos empiezan a dividirse en subprocesos para hacer abordable la tarea de obtener conocimiento de ellos [4]. Diferentes métodos de clasificación y de regresión pueden utilizarse principalmente para predecir estados futuros o para clasificar estados similares de comportamiento [3]. Estos métodos son aplicados en la literatura sobre sistemas monitorizados [5] para inferir modos de funcionamientos en los equipos y optimizar el mantenimiento [6]–[8]. Estas técnicas conciernen la búsqueda de modos de fallo [9], [10] o identificación de nuevos parámetros a partir de datos registrados [11]. Sin embargo, pese a la literatura existente sobre análisis de fallos en motores navales, aún no ha sido presentado un estudio básico sobre los parámetros mecánicos necesarios para predecir mediante técnicas asociadas a la IA (como las redes neuronales) la descompensación de funcionamiento entre los cilindros de un motor embarcado. Con este objetivo, se propone diseñar una solución con la que a partir de los datos registrados por el SICP, se pueda notificar a la dotación del comportamiento esperado de un motor en los próximos instantes. En este estudio se va a reducir el problema, haciendo hincapié en la escalabilidad de este método a otros aspectos del comportamiento del propulsor. Por lo tanto es necesario definir parámetros mecánicos como *inputs* y por otro lado evaluar la eficacia según el número de parámetros utilizados.

2. Definición del problema

En los últimos meses se ha observado que tras un periodo de operación de un motor propulsor, si las temperaturas de sus cilindros estaban descompensadas respecto a la media de todos ellos, esto ha llevado a cabo en varias ocasiones a defectos en la combustión, falta de potencia e incluso podría haber sido originado por fallos en el inyector de un cilindro (atomizadoras). Todo dependía de en qué medida estaban descompensadas sus temperaturas respecto de la media. Debido a esto, en CESADAR se supervisa diariamente por un analista cada uno de los propulsores que han estado en operación durante las 24 horas precedentes al análisis visual de los datos. Si realmente es un malfuncionamiento que pueda dar un fallo inmediato de un componente, este debe ser detectado a bordo.

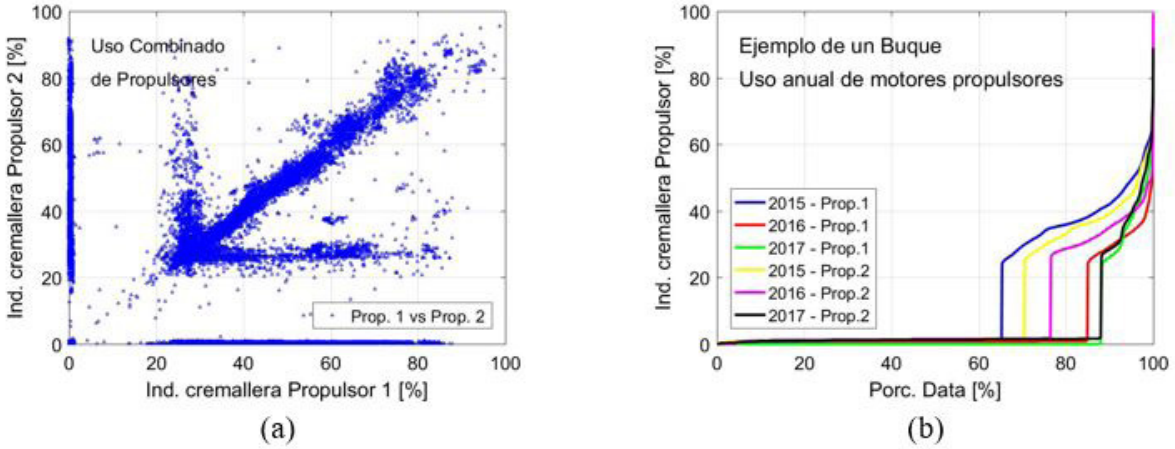


Figura 1. (a) Uso combinado y (b) uso anual en buque ejemplo de los propulsores 1 y 2 en el período 2015-2017.

En este estudio se van a analizar datos de dos propulsores de un buque ejemplo entre el 2015 y el 2018. Los datos extraídos directamente del SICP, sin conversión alguna por el analista son: el índice de cremallera (*IC*), las revoluciones por minuto del propulsor (*RPM*), la temperatura media de las dos líneas de cilindros (), y la temperatura de gases de escape por cilindro T_i. Estos datos son registrados con una frecuencia de muestreo f_s= 6 *s*. En el conjunto de los cuatro años mencionados se han obtenido en torno a 8M de registros. En la figura 1a se expone el uso combinado de los dos propulsores. Se pueden distinguir principalmente tres modos de uso combinado cuando no están apagados ambos (0,0). El primer modo combinado conlleva utilizar solamente uno de los dos, pero siempre a partir del 30 % del *IC*. Este índice representa la relación de potencia demandada al propulsor en porcentaje (%). En el segundo modo se aprecia que se utiliza uno de los propulsores con una relación de potencia (o *IC*) fija del 30 % mientras que el otro puede funcionar con un *IC* del 30 % al 100 %. El último modo es el relativo a un uso de los dos propulsores a la misma relación de potencia, siempre mayor del 30 %. Respecto al total de datos registrados, en la figura 1b se aprecia que hasta un 40 % de los mismos representan tiempo de operación de los propulsores. Se puede describir que la mayor parte de operaciones de los propulsores se realizan con IC de entre 30 % y 60 %. En ellos se pueden apreciar un similar uso para un mismo año, y sus diferencias anuales de uso en este barco ejemplo en cuestión. Se aprecia igualmente en la figura 1b que la mayor parte del tiempo de operación (*TO*>80 %) se realiza entre el 30 % y el 42 % de *IC*. Sin embargo, la respuesta del propulsor ante un comando de *IC* concreto no se desarrolla siempre de la misma manera y depende de múltiples factores externos como el escaramujo, lastres, etc. (figura 2).

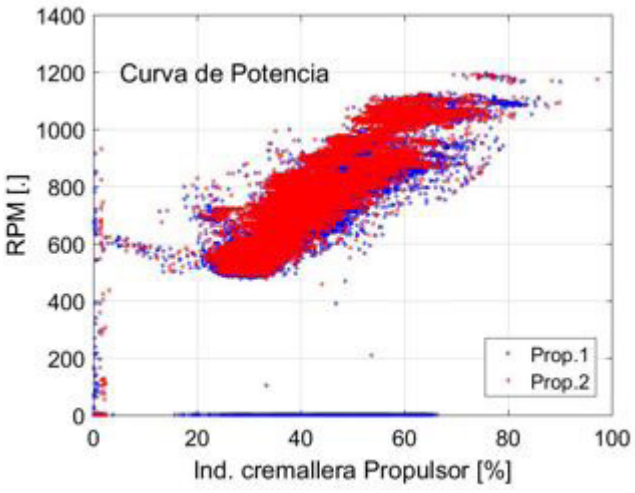


Figura 2. IC vs. RPM en buque ejemplo.

Las RPM del motor van de 500 a 1.200 *RPM* en el rango de tiempo representado en la figura 2. De entre las variables registradas por SICP de cada propulsor, hay una a la que se le presta especial atención diariamente, como indicador del correcto funcionamiento del mismo, esta es la temperatura de gases de escape de cada uno de los cilindros (T_i). El propulsor del buque ejemplo está compuesto por dos líneas (A y B) de 8 cilindros cada una. A partir de lo expuesto en la figura 3 se aprecia que el comportamiento de los cilindros adyacentes en cada una de las líneas evoluciona de forma análoga en el rango de temperaturas medias $\overline{T}$>250ºC, $\overline{T}_{A,B}$=(250, 250). Se deben tener en cuenta ambas líneas en los cálculos.

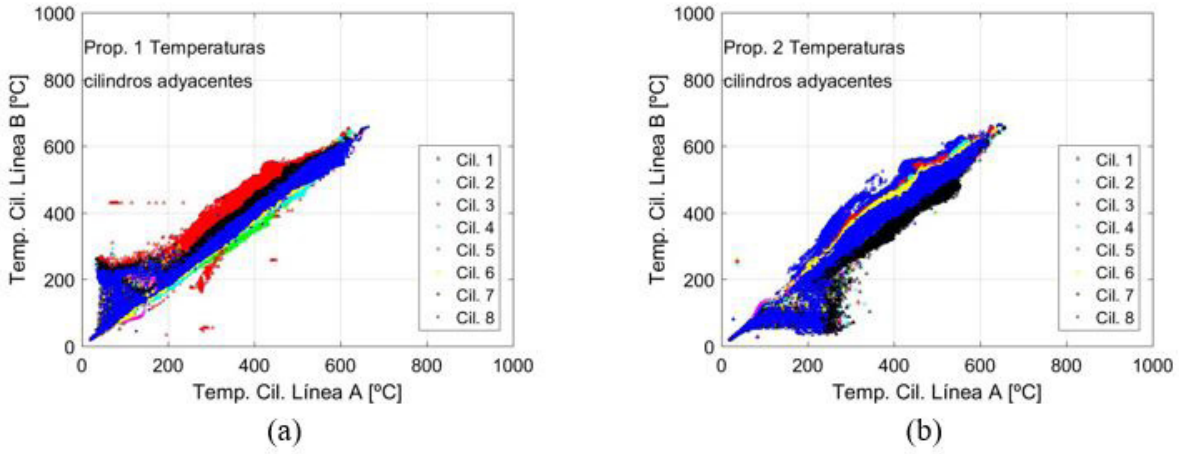


Figura 3. Temperatura de gases de escape en cilindros adyacentes (a) propulsor 1 y (b) propulsor 2.

A mayor abundamiento, las temperaturas medias de gases de escape ($\overline{T}$) evolucionan de una forma cuasi-lineal y más homogénea a partir desde *IC*=40 % (figura 4a). Se pueden distinguir dos regímenes de evolución de temperaturas medias en ambos propulsores, de 550ºC> $\overline{T}$>300ºC para *IC* comprendidos entre 25 y 40 % y de 600ºC> $\overline{T}$>550ºC para *IC* comprendidos entre 40 y 100 %. Para realizar una clasificación de modos, se va a utilizar un tercer parámetro, calculado a partir de las variables registradas, que pueda integrar el efecto de las anteriores [12], como en otros casos de clasificación de eventos [13]. El parámetro, denominado desviación de temperaturas acumulado, que representa las diferencias absolutas de cada cilindro respecto a la media, se calcula según (1) y (2):

$$\Delta T_i = ABS\left(T_i - \frac{\sum_{i=1}^{16} T_i}{n}\right) = ABS(T_i - \overline{T}) \quad (1)$$

$$(\sum \Delta T_i) = (\sum_{i=1}^{16} \Delta T_i) \quad (2)$$

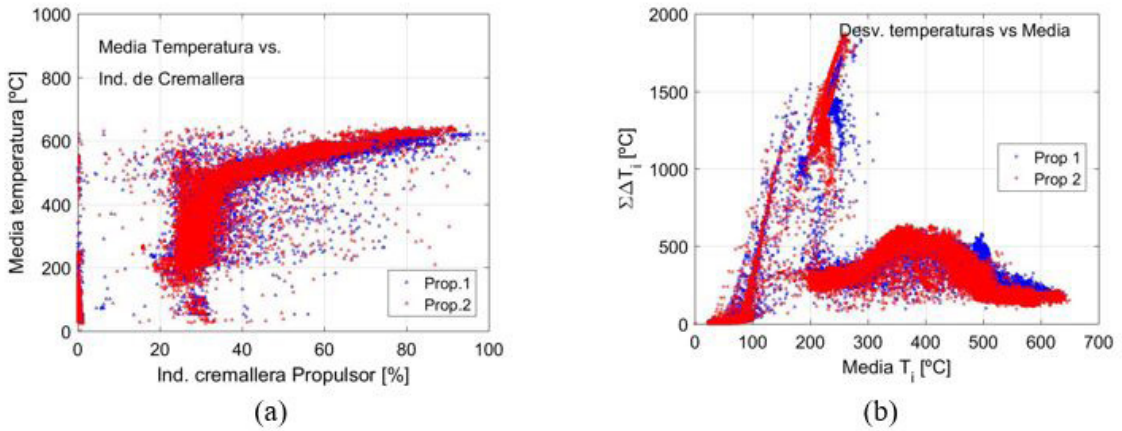


Figura 4. (a) Media de temperaturas de gases de escape por cilindros vs. IC y (b) desviación de temperaturas vs. media de temperaturas en propulsores 1 y 2.

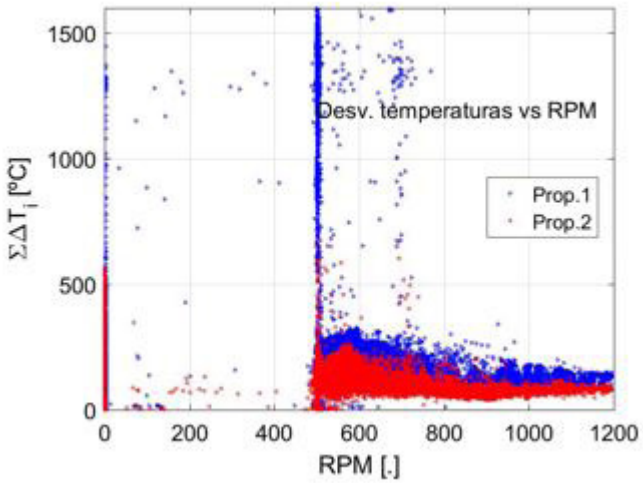


Figura 5. Desviación de temperaturas vs. RPM para los propulsores 1 y 2.

Al representar la desviación de temperaturas acumulada respecto a la media (figura 4b), se observa un pico para temperaturas medias $\overline{T}$>250ºC que no se repite a lo largo del resto de temperaturas medias registradas en ambos propulsores. En mayores *IC* se comporta de forma más estable el motor. Este último caso, aún en la región inestable del motor, con *IC*<40 % (figura 4a). Gran parte de desviaciones de temperaturas se produce cuando el eje del propulsor está rotando a *RPM*=500, lo que suele estar aparejado a *IC*≈30 % (figura 5).

3. Red neuronal de clasificación

La ciencia de datos es una rama de la inteligencia artificial (IA) en la cual se busca que un sistema sea capaz de aprender de datos que pueden ser usados para hacer predicciones y reconocer patrones de comportamiento [14]. El aprendizaje de este sistema artificial puede ser supervisado según indicadores externos [15]. Una red está formada por un conjunto de neuronas de entrada (donde se introducen los valores de los parámetros de entrada para cada medida), capas sucesivas de neuronas ocultas y una última capa de neuronas de salida. Cada conexión entre neuronas de capas adyacentes está ponderada por un peso. La función que aplica una neurona sobre los datos de entrada y los pesos se denomina función de transferencia y es no lineal, además toma su valor máximo cuando x= 0. Los pesos que intervienen sobre cada conexión (ω_{ij} desde la neurona i en la capa anterior hasta la neurona j de la siguiente capa) son automáticamente ajustados iterativamente. El método utilizado, es una función de entrenamiento que actualiza los valores de peso acorde al gradiente escalado conjugado (*scaled conjugate gradient method*) [16]. Para las redes de clasificación habrá tantas neuronas de salida como posibles patrones de comportamiento se consideren. Como ejemplo para mostrar cómo se calibran los pesos asociados a cada par de neuronas, se tendrá en cuenta una red de 4 capas (una de entrada, dos ocultas y una de salida) para ver las expresiones en su forma desarrollada *(3)*.

$$\frac{\partial y_i}{\partial \omega_{ik}^{(1)}} = x_j a_k^{(2)} \left(1 - a_k^{(2)}\right) \cdot \left[\sum_{p=1}^{n_3} \omega_{kp}^{(2)} a_p^{(2)} \left(1 - a_p^{(3)}\right) \omega_{pi}^{(3)}\right] \cdot y_i \left(1 - y_i\right) \quad (3)$$

El sumatorio de los productos indicados indica que hay que contemplar todos los caminos posibles desde la salida y_i hasta la neurona de entrada x_j. en este caso las entradas a la red se representan como x, y las salidas, o resultados, como y. Si se realiza el diferencial respecto el umbral asociado a cada neurona de las capas ocultas (u_i), el resultado se muestra en la ecuación *(4)*.

$$\frac{\partial y_i}{\partial u_i^{(2)}} = a_k^{(3)} \left(1 - a_k^{(3)}\right) \omega_k^{(3)} y_i \left(1 - y_i\right) \quad (4)$$

En cambio, si en vez de ser sobre el umbral, la diferencian de la expresión de salida y_i sobre el peso que une dos neuronas situadas entre la tercera y cuarta capa sería la mostrada en la ecuación *(5)*.

$$\frac{\partial y_i}{\partial \omega_{jk}^{(2)}} = a_j^{(2)} a_k^{(3)} \left(1 - a_k^{(3)}\right) \omega_k^{(3)} y_i \left(1 - y_i\right) \quad (5)$$

El objetivo de las redes neuronales es calcular los pesos que ligan dos neuronas y los umbrales de activación, para converger hacia los resultados que se busquen en el menor número de iteraciones (épocas, *epochs*). La calidad de los pesos logrados se justifica mediante el error medio cuadrático de los resultados respecto a la salida deseada (*Mean Square Error, MSE*). El *MSE* entre el resultado obtenido y el resultado deseado se calcula mediante la expresión *(4)* siguiendo la regla de la cadena.

$$\frac{\partial e}{\partial \varepsilon} = \sum_{i=1}^{n_{(4)}} \frac{\partial e}{\partial y_i} \cdot \frac{\partial y_i}{\partial \varepsilon} \quad (6)$$

Siendo e el error entre las soluciones esperadas y obtenidas. Simplificando y aplicando la regla de la cadena:

$$\frac{\partial e}{\partial y_i} = -(s_i - y_i) \quad \text{ya que} \quad e = \sum_{i=1}^{n_{(4)}} \frac{1}{2}(s_i - y_i)^2 \quad (7)$$

Las iteraciones se detienen cuando se consigue un error mínimo tras seis iteraciones seguidas sin mejorar. El conjunto de datos con el que se persigue entrenar una red neuronal se divide en tres: entrenamiento, validación y test.

4. Modos de funcionamiento y experimentación

Primeramente se han descartado todos los registros que corresponden a IC<10 % en los que el motor no está operando. Los registros restantes se han discretizado en 4 modos de funcionamiento, atendiendo a una distribución lo más regular (compensada) posible entre modos. Los registros utilizados en este punto corresponden a una frecuencia de muestreo f_s=1 min, mayor respecto a la de registros brutos y reduciendo la redundancia de datos tabla 1:

Tabla 4. Definición de modos de funcionamiento

Definición de modos de funcionamiento	
Modo1	**$\sum \Delta T_i$ < 200 ºC**
Modo2	**200 ºC < $\sum \Delta T_i$ < 300 ºC**
Modo3	**300 ºC < $\sum \Delta T_i$ < 600 ºC**
Modo4	**600 ºC < $\sum \Delta T_i$**

La distribución porcentual de valores de desviación de temperaturas respecto a la media se refleja en la Figura 6, los límites de los modos considerados en la tabla 1. A partir de $\sum \Delta Ti$=600 ºC (≈2% de los registros) hay un incremento notable de la tendencia de desviación de temperaturas y presentan una mayor descompensación respecto a la media. El porcentaje de registros de este modo es estable para todos los buques y años (en torno al 2 %). La variabilidad es menor al ±10 % respecto del tercio total de registros con los límites definidos. Esta repartición de registros se muestra en la figura 7.

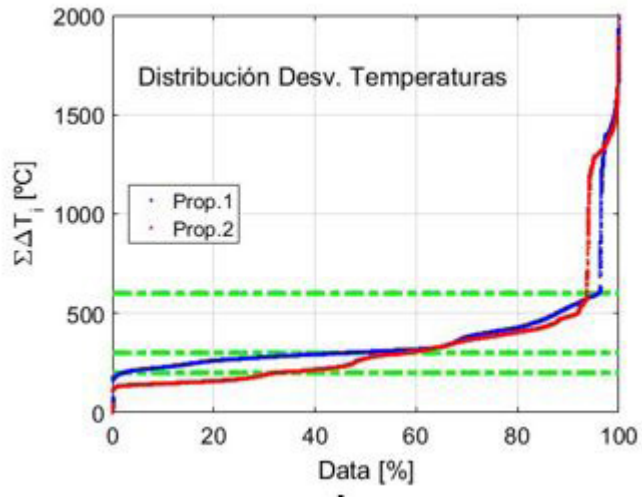


Figura 6. Distribución de datos de desviación de temperaturas en buque ejemplo durante 1 año.

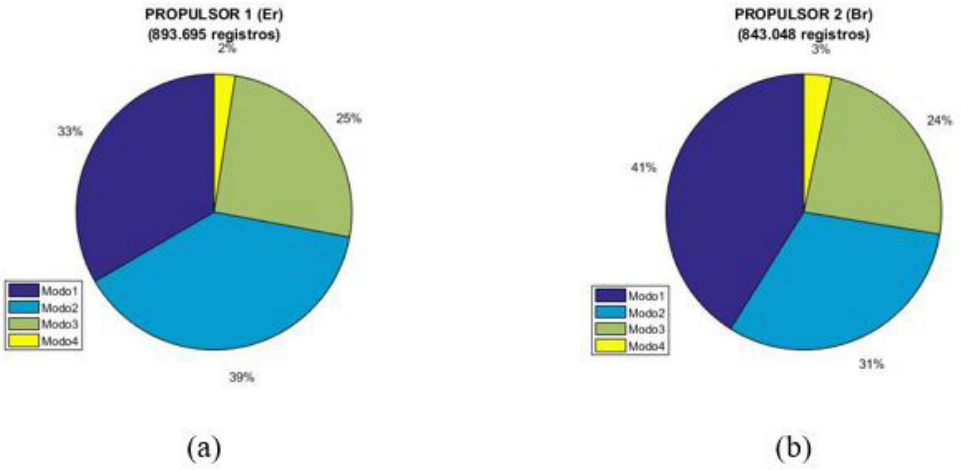


Figura 7. Modos de funcionamiento registrados, durante funcionamiento, en tres buques equivalentes entre 2015-2018 en (a) propulsor 1-estribor y (b) propulsor 2-babor.

El objetivo es crear una red capaz de clasificar los 4 modos de funcionamiento expuestos (*outputs*), desde el más compensado (MODO1) hasta el más descompensado (MODO4), a partir de unos parámetros de entrada (*inputs*). Se establecen 3 tipos de experimentos que se diferencian por el número de *inputs* a tener en cuenta en cada uno de ellos, según lo descrito en la tabla 2. En el primer experimento se tienen en cuenta 11 parámetros (diferencias de temperaturas solo de cilindros de la línea A), en el segundo 3 parámetros y en el tercer experimento son 9 parámetros correspondientes a los 3 del segundo experimento más dos conjuntos más de los mismos, correspondientes a registros temporales 30 y 60 minutos precedentes a los del momento *t* en el que se quiere hacer la predicción.

Tabla 2. Resumen de experimentos

Experimentación a realizar y conjuntos de datos			
Conjuntos	***Inputs* (N)**	***Outputs***	**Número de registros**
Primer experimento	, IC, RPM, $_{(\text{Línea A})}$ (11)	4 Modos	163.597 (1 año) Buque ejemplo
Segundo experimento	, IC, RPM (3)		
Tercer experimento	, IC, RPM $*_{(t,t-30min,\ t-60min)}$ (9)		

La red neuronal diseñada tiene una capa oculta de 24 neuronas para cada modo de funcionamiento considerado. Se utilizan el 65 % de registros en fase de entrenamiento, el 20 % en fase de validación y el 15 % restante en fase de test.

5. Resultados y discusión

En el primer experimento, la tasa de verdaderos positivos para los 4 modos de funcionamiento es de en torno a 93,5 % (tabla 3), teniendo la red mayor facilidad de clasificar a los registros pertenecientes al MODO4 (98 % de verdaderos positivos) que se supone como el más contraproducente para el correcto funcionamiento y desgaste del motor propulsor. En el segundo experimento se reducen drásticamente el número de parámetros de *input* (hasta 3), ellos correlacionados positivamente entre sí (tras análisis PCA). En este experimento se observa una reducción de la tasa de verdaderos positivos hasta el 76 % (tabla 3) en cada una de las fases de entrenamiento, validación y test. Al contrario que en el primer experimento, aquí se aprecia una mayor tasa de falsos positivos entre los modos opuestos MODO1y MODO4, lo que resulta en un riesgo para poder predecir correctamente posibles estados no deseados del propulsor. Esta tasa de falsos positivos aumenta hasta el 61 %. En lo que respecta al tercer experimento, aun sirviéndose de los mismos *inputs* que el primero, este utiliza valores de los *inputs* de registros realizados 30 y 60 minutos antes del momento en el que se pretende predecir el modo de funcionamiento del motor. El número total de parámetros de entrada es intermedio a los dos experimentos previos pero los resultados se aproximan bastante a los del primer experimento, obteniendo una tasa global de verdaderos positivos mayor al 92 % (tabla 3).

Tabla 3. Resumen de tasas de verdaderos positivos

Tasas de verdaderos positivos			
Conjuntos	**Entrenamiento**	**Validación**	**Test**
Primer experimento	93,3 %	93,4 %	93,6 %
Segundo experimento	76,0 %	76,2 %	76,5 %
Tercer experimento	92,4 %	92,6 %	92,5 %

6. Conclusiones y perspectivas

El análisis realizado muestra que los motores propulsores analizados son operados normalmente a una relación de potencia inferior a su capacidad máxima (*IC*=30 %-42 % durante un tiempo de operación *TO*>80 %), lo que parece poder impactar sobre el comportamiento normal de sus componentes. Igualmente, se ha descrito un modo de funcionamiento característico (≈2 % de los registros totales en operación) a partir de una desviación acumulada de temperaturas sobre la media de $\sum \Delta T_i$=600ºC, en la que aumenta de forma más notable este parámetro, indicador de descompensación en el comportamiento de los cilindros del propulsor. Mayores valores del parámetro $\sum \Delta T_i$ pueden desembocar en un funcionamiento no deseado del propulsor. En cuanto a los datos, los motores propulsores análogos, resultan en comportamientos y distribuciones análogas de sus modos de funcionamiento. Esto afianza la coherencia de los datos equivalentes para equipos análogos. El uso de técnicas asociadas al aprendizaje automático para clasificación de eventos supone una herramienta útil de ayuda a la decisión para las dotaciones. Para un mejor conocimiento de los sistemas a mantener por la Armada española, es de capital importancia ligar datos mecánicos como los presentados en este estudio exploratorio a datos de configuración logística. Esto supondrá obtener capacidades para predecir patrones de comportamiento en elementos configurados o actores que participen en el apoyo logístico.

Referencias

1. *J. D. González-Aller Lacalle and F. Lamas López, «Evolución del CESADAR 'Prediciendo el futuro, eficiencia en el sostenimiento, eficacia de la flota,'» Rev. Gen. Mar., no. Agosto-Septiembre, p. 14, 2018.*
2. *F. Escondrillas and F. Lamas López, «Informe Estado General CESADAR 2018 (Informe Interno Confidencial ARMADA),» Cartagena, 2018.*
3. *U. Fayyad, G. P. Shapiro, and P. Smyth, «From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases,» AI Mag. Am. Assoc. Artif. Intell., no. Fall, p. 18, 1996.*
4. *R. Brachman and T. Anand, «The Process of Knowledge Discovery in Databases: A Human-Centered Approach,» Adv. Knowl. Discov. Data Min., pp. 37–58, 1996.*
5. *C. Wang, «Embedded Sensing for Online Bearing Condition Monitoring and Diagnosis,» University of Massachussets, Amherst, MA, 2001.*
6. *P. W. Tse and D. P. Atherton, «Prediction of Machine Deterioration Using Vibration Based Fault Trends and Recurrent Neural Networks,» J. Vib. Acoust., vol. 121, no. July, pp. 355–362, 1999.*
7. *H. Taplak, I. Uzmay, and S. Yildirin, «Design of artificial neural networks for rotor dynamics analysis of rotating machine systems,» J. Sci. Ind. Res., vol. 64, no. June, pp. 411–419, 2005.*
8. *Y. Shao and K. Nezu, «Prognosis of remaining bearing life using neural networks,» J. Syst. Control Eng., vol. 214, no. 3, pp. 217–230, 2000.*
9. *Y. Y. Liu, Y. F. Ju, C. D. Duan, and X. F. Zhao, «Structure damage diagnosis using neural network and feature fusion,» Eng. Appl. Artf. Intell., vol. 24, pp. 87–92, 2011.*
10. *O. Abdeljaber, O. Avci, S. Kiranyaz, M. Gabbouj, and D. J. Inman, «Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks,» J. Sound Vib., p. 17, 2016.*
11. *M. S. Hossain, O. Z. Chao, Z. Ismail, S. Noroozi, and K. S. Yee, «Artificial Neural Networks for Vibration Based Inverse Parametric Identifications: A Review,» Appl. Soft Comput., 2017.*
12. *F. Lamas-Lopez, «Field and laboratory investigation on the dynamic behavior of conventional railway track-bed materials in the context of traffic upgrade,» Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2016.*
13. *F. Lamas López, J. M. Riola Rodríguez, and J. D. González-Aller Lacalle, «La aplicación de Inteligencia Artificial (IA) en industria 4.0: mantenimiento predictivo de equipos embarcados.,» in 56º congreso del colegio de Ingenieros Navales y Oceánicos., 2017, p. 11.*
14. *C. Sharma, «Big data analytics using neural networks,» San José State University, 2014.*
15. *M. Sánchez-Montañés, L. Lago, and A. González, «Métodos avanzados en aprendizaje artificial: Teoría y aplicaciones a problemas de predicción,» Madrid, 2014.*
16. *Y. Saad, Iterative methods for sparse linear systems, vol. 3, no. 4. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.*

La Industria 4.0 y los buques de guerra. Lecciones aprendidas y cómo mejorar el proceso de diseño

Pérez Fernández, Rodrigo[1,*] y Riola Rodríguez, José M.[2]

[1] Universidad Politécnica de Madrid. rodrigo.perez.fernandez@upm.es: (RPF).

[2] Universidad Politécnica de Madrid. josemaria.riola@upm.es: (JMRR).

Email: * Rodrigo Pérez Fernández; rodrigo.perez.fernandez@upm.es: (RPF).

Resumen

Si la industria de la construcción naval militar quiere adaptarse a las nuevas tecnologías, deben de empezar con el proceso de diseño del producto, de tal manera que este esté preparado para afrontar los retos del futuro. El buque de guerra tiene dos periodos bien definidos y separados: la fase de diseño y el de la vida útil u operación. Estos dos elementos pueden ser sostenidos a través de metodologías de trabajo. La *Industria 4.0* abre a la industria militar a nuevas tecnologías que las empresas deben incorporar en sus procesos, como robótica, realidad virtual y aumentada, Internet de las cosas, etc. y que forman parte de ese conjunto de facilitadores de la transformación digital (digitalización). La industria naval militar no puede ser ajena a este cambio; pero necesita estímulos y la confianza de las tecnologías que le son familiares como las herramientas de ayuda al diseño y construcción naval, que constituyen la base sobre las que se asientan diversos procesos productivos de la construcción naval militar. La transformación digital no debe quedarse en la transformación de procesos, sino que debe materializarse en el producto. Los buques y artefactos navales deben incorporar los avances de esta revolución y las empresas deben aprender cómo hacerlo. En esta línea se debe incorporar inteligencia a los buques, no para sustituir al hombre sino para ayudarlo en su trabajo, mejorar la experiencia de los pasajeros y aumentar la rentabilidad de los constructores y armadores. Las herramientas informáticas pueden facilitar el diseño, la gestión y el control de los elementos que han de aparecer en esta revolución de la industria. En este artículo se barajan los retos que la *Industria 4.0* puede plantear al sector naval militar, presentándose una serie de ideas y conceptos que podrían ser beneficiosos a la hora de implantarse en la Armada, como la gestión de sus buques a través de las herramientas CAD, durante las etapas de diseño, construcción y mantenimiento naval, como por ejemplo utilizándose la realidad aumentada.

Palabras clave

Buque de guerra, IoT, Industria 4.0, plataformas navales.

1. Introducción

En la Red se generan millones de datos todos los días (ver algunas cifras en la figura 1), y se estima que en el año 2020, 25 billones de aparatos estén conectados a Internet. Esta revolución que empezó hace pocos años ha despertado un enorme interés en todas las industrias y en alguna de ellas ya funciona con aparente normalidad.

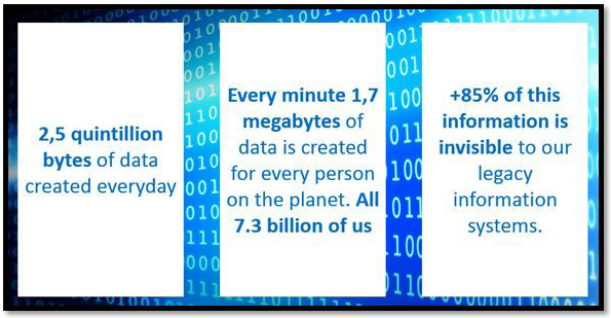


Figura 1. Algunas cifras sobre la creación de datos en el mundo (Pérez et al., 2018).

Hoy en día es posible hacer el pedido de nuestra nevera directamente en cuanto esta detecta que faltan nuestros productos habituales o lámparas inteligentes que se encienden solas cuando hace falta iluminación. El mundo va avanzando sin pausa hacia lo que será sin duda una de las revoluciones más importantes en la historia de la humanidad. Podríamos definir el Internet de las cosas como la consolidación a través de la red de redes de una *red* que alojase una gran multitud de objetos o dispositivos, es decir, poder tener conectada a esta todas las cosas de este mundo como podrían ser vehículos, electrodomésticos, dispositivos mecánicos, o simplemente objetos tales como calzado, muebles, maletas, dispositivos de medición, sensores biométricos, o cualquier objeto que nos podamos imaginar.

En este contexto surge la pregunta de si el sector naval está preparado para esta revolución. *¿Es posible que un sector tan tradicional y conservador se adentre en esta tecnología?*

Hay ya pruebas que indican que efectivamente el sector naval no es ajeno a estos adelantos y ya tiene conectados a Internet algunos componentes de los barcos. El objetivo es aprovechar esta revolución tecnológica actuando también en las fases de diseño y producción con el objeto de construir barcos cada vez más eficientes, seguros y sostenibles. En un sector tan descentralizado, donde muchas veces la ingeniería y la producción se encuentran en diferentes localizaciones y donde las decisiones críticas no pueden esperar, el *Internet de las cosas*, conocido por sus siglas en inglés *Internet of Things* (IoT), o la conexión a través de la red componentes críticos en el diseño/construcción naval, se empieza a vislumbrar como algo a lo que el sector no puede quedarse ajeno.

Se trata por tanto de monitorizar todas aquellas partes en las cuales una detección temprana de acontecimientos nos permita tomar las decisiones adecuadas. Actualmente hay diferentes propuestas empresariales que pretenden dar solución a la Industria 4.0.

En este sentido, el disponer de sensores durante las primeras etapas de la construcción del barco, nos permitirá identificar si la construcción del barco es completamente acorde al diseño que hemos generado con una herramienta de diseño por ordenador, conocido por sus siglas en inglés *Computer-Aided Design* (CAD).

La monitorización continua integrada en un CAD de diseño naval permitirá reducir costes y evitar errores y poder tomar decisiones en tiempo real desde el mismo astillero, oficinas de diseño o desde lugares remotos. Hoy en día soluciones CAD que permiten visualizarse en herramientas de bolsillo, lo que le convierte en el aliado indispensable en esta nueva revolución tecnológica. La construcción de barcos, genera una gran cantidad de información y datos, que a priori hace que parezca imposible disponer de todos estos datos en tiempo real, pero los nuevos procesadores, más sencillos y más pequeños, junto con una buena conexión a Internet, lo hacen posible.

La gestión de los datos es, sin embargo, solo una cara de la moneda del IoT. La eficiencia energética es un aspecto fundamental también en los nuevos dispositivos que se conectan a la red. Pero IoT no solo cubre las etapas de diseño o producción del barco. Una vez situados los sensores en los componentes cuya información queramos monitorizar, seremos capaces de obtener información durante toda la vida útil del barco.

IoT se presenta como una solución capaz de detectar cuándo un componente en un barco está cerca de fallar y debemos remplazarlo, cuándo debemos llevar el barco a reparar, cuándo debemos aplicar pintura otra vez, cuándo la corrosión ha alcanzado un determinado limite…y todo esto desde nuestra herramienta de bolsillo y con suficiente antelación como evitar actuaciones tardías o imprevistas. IoT llega a este sector para garantizar una producción rentable, o proceso seguro, eficiente y sostenible para todo tipo de barcos pesqueros, remolcadores, tanqueros, cargos, ferries, dragas y oceanográficos…

2. El CAD/CAM/CAE en la Industria 4.0

Las tecnologías más modernas que se incluyen en la Industria 4.0 tienen que tener un objetivo, y este ha sido descrito en un artículo publicado en el *Harvard Business Review* **(**Porter y Heppelmann, 2015): «Smart, connected products require companies to build and support an entirely new technology infrastructure. This technology stack is made up of multiple layers, including new product hardware, embedded software, connectivity, a product cloud consisting of software running on remote servers, a suite of security tools, a gateway for external information sources, and integration with enterprise business systems». Si una empresa quiere entrar en este negocio debe tener productos capaces de conectarse con los de otras empresas. Por lo tanto, está aumentando la necesidad de productos abiertos.

Desde este punto de vista, la plataforma mencionada no es exactamente un *sistema operativo*, sino un conjunto de aplicaciones interconectadas (como se observa en la visión de los autores que de la figura 2), que comparten los mismos datos sobre el producto. Datos que han estado apareciendo desde las primeras fases de diseño y alimentando a la base de datos, no solo con los atributos de diseño, sino también con los valores esperados para un rendimiento óptimo. Alrededor de esta base de datos irán apareciendo las aplicaciones que controlan el ciclo de vida de los componentes, los sensores que recogen la información de operación o la vida útil de los mismos objetos y dispositivos.

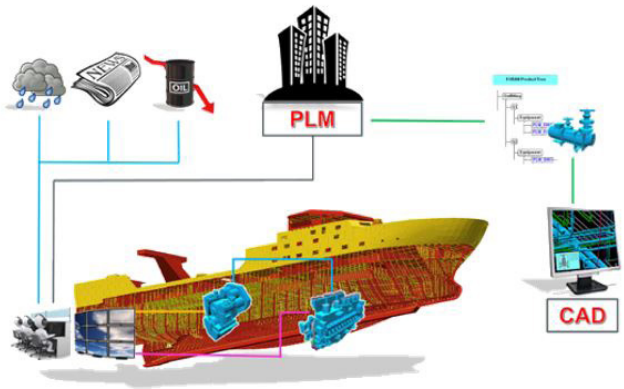


Figura 2. Representación simbólica de la interconexión de las diferentes aplicaciones en el ámbito del diseño naval (Muñoz y Pérez, 2017).

La clave es que todos los dispositivos, sensores y componentes no están conectados directamente a la IoT, pero sí a un núcleo de gestión que controla los datos de intercambio del IoT para aquellos dispositivos que permiten entrar en esa red. De esta manera, es posible aprovechar el hecho de que todos los componentes existentes en el buque tienen su respectivo modelo creado, incorporado y definido desde el sistema CAD. Podríamos decir que el CAD es el lugar de nacimiento de los elementos de la embarcación. Por lo tanto, es el sistema CAD el que sabe de ellos y desde donde se pueden asignar tanto la misión, como el nivel de participación dentro del mundo del IoT.

3. La transformación digital

Como se ha venido comentando a lo largo del artículo, en los proyectos de buques y artefactos navales, el diseño del producto se realiza mediante herramientas de CAD en 3D. Los diferentes componentes con sus propiedades o metadatos, van quedando almacenados en el sistema de modo que la información está disponible para todos los diseñadores que componen un departamento de ingeniería. En las organizaciones, existen departamentos que no participan en el proceso de diseño pero que necesitan acceder al mismo a fin de poder realizar diferentes tareas como revisar, auditar, obtener métricas como el estado de avance de un proyecto, etc. Este tipo de técnicos no necesitan disponer de las herramientas de diseño, sino un acceso más simplificado y para ello estarían disponibles los programas de *software* llamados navegadores o visores.

Estos programas permiten el acceso a la información 3D. Permiten cargar el árbol de componentes del proyecto para poder obtener información de cualquier elemento. Por otra parte, otras herramientas básicas disponibles en este tipo de programas disponen de diferentes modos de navegación, comandos para la toma de medidas como distancias o ángulos, creación de secciones para poder acceder a componentes interiores, etc. El interface con el programa a fin de posibilitar la navegación en nuestro proyecto se realiza mediante el ratón.

Los navegadores permiten la incorporación de modelos humanos al proyecto para estudiar temas de ergonomía, creación de iluminaciones y texturas para obtener modelizaciones avanzadas, movimientos de componentes a fin de realizar simulaciones, etc. Los navegadores pueden conectarse a la base de datos de nuestro proyecto, a fin de poder acceder a la información en tiempo real pero a veces esto no es posible. En ocasiones, existe la necesidad de llevar la información de nuestro proyecto a la obra y si desde la misma tenemos acceso a la red *Ethernet* del astillero, podemos implementar un equipo con un visor que nos permita conectarnos al proyecto. En el caso de que esto no sea posible, los visores deben tener la posibilidad de leer ficheros con la información del proyecto necesaria para obtener el modelado 3D de nuestro producto y los datos de los componentes con un rendimiento óptimo. Por eso, hasta ahora era frecuente implementar los visores en ordenadores portátiles dadas las ventajas de movilidad que esto permite. Los ordenadores portátiles suelen incorporar un procesador con suficiente potencia y tarjetas gráficas que permiten la navegación en el proyecto completo.

Los programas de realidad virtual en el entorno de la construcción naval ofrecen en la actualidad una interfaz de usuario intuitiva que incorpora herramientas de navegación y capacidades para facilitar la navegación del diseñador naval **(**Perez y Muñoz, 2017). La visualización en estos programas se controla directamente desde un ratón o un joystick. Las capacidades más demandadas por la industria naval son:

- Que aparezca la información del árbol de diseño para la posible selección de objetos y para poder visualizar información sobre el modelo y anotaciones.
- Información de referencia disponible, como sistema de referencia y puntos significativos.
- Visualización de atributos del sistema CAD y/o definidos por el diseñador durante la etapa del diseño de detalle, relativos a objetos.
- Medida de distancias y ángulos. Planos de corte y herramientas de búsqueda avanzadas.
- Que se puedan realizar operaciones con grupos de elementos, tales como desmontajes, labores de mantenimiento en el buque,...

- Posibilidad de verificar la ergonomía del diseño mediante la importación a la escena de modelos humanos.
- Que exista un mapa de perspectiva general que siga la posición real de la cámara y que de este modo permita al diseñador u operario del astillero, conocer la posición relativa dentro del modelo, y cambiarla de forma rápida y sencilla seleccionando una nueva posición en el mapa.
- Posibilidad de añadir anotaciones.
- Que se puedan asignar rutas a objetos y operadores, con lo que pueden comprobarse rutas de extracción, rutas de escape e inconsistencias en el diseño.
- Algoritmos avanzados para descubrir colisiones entre objetos, con la opción de resaltarlos a través de sonidos y/o cambios de color, y también guardarlos para futuras navegaciones.

En los últimos años se ha producido un avance espectacular en los dispositivos móviles como tabletas o teléfonos inteligentes. Este *hardware* progresivamente incorpora nuevos procesadores que permiten un mayor rendimiento gráfico. En cuanto al *software*, se han desarrollado sistemas operativos especialmente adaptados para ellos como *Android* o *iOS* que permiten un *interface* con el dispositivo de forma natural mediante acciones táctiles. La gran difusión de este tipo de dispositivos en nuestra vida cotidiana ha precipitado su uso por la empresa. Los desarrolladores de *software* no ajenos a esta realidad ya llevan tiempo preparando aplicaciones orientadas a la empresa y entre ellas aquellas que nos permitan disponer en nuestras tabletas electrónicas de planos del proyecto o modelos 3D del mismo. La disponibilidad de este tipo de dispositivos para los técnicos que realizan tareas de montaje, o supervisión puede permitir un aumento de la productividad al acceder rápidamente a la información del modelo de proyecto tanto en su visualización 3D, como en el acceso a la información general de los componentes, piezas y planos constructivos y de montaje.

Si una conexión *wi-fi* lo permite sería posible conectarse a un servidor de información a fin de ir actualizando la información necesaria, principalmente en forma de ficheros: modelos 3D, planos de detalle, etc. Una dificultad que puede aparecer como una barrera es la necesidad de proporcionar este tipo de conectividad a los talleres donde se realiza el montaje de los equipos o los locales de abordo. Aportar esta conectividad es cada vez más asequible y accesible. El empleo de sistemas *Light Fidelity* (li-fi), sistemas de comunicaciones inalámbricas rápidas y de bajo costo, es una buena alternativa al montaje de cableado específico o ubicación de *routers*. El *li-fi* es una tecnología similar al *wi-fi* en forma de comunicación a través de la luz visible y de un conjunto de comunicaciones ópticas sin cable, en sus siglas en inglés *Optical Wireless Communications* (OWC). Otra de las ventajas de estos dispositivos móviles estaría en la interfaz táctil que permite interactuar con nuestro modelo o piezas mediante gestos del mismo modo que realizamos a diario con nuestros teléfonos inteligentes.

Una línea de evolución de los navegadores es la incorporación de realidad aumentada, de gran ayuda para los técnicos de producción poder desplazarse por el producto fabricado y enfocando con la cámara de nuestro dispositivo móvil a un determinado componente poder obtener información del mismo así como disponer en pantalla la imagen real del mismo superpuesta con el modelo de diseño 3D. Esto será posible mediante el empleo de marcadores que ayuden al dispositivo a posicionarse dentro del proyecto y también por el empleo de módulos para almacenar información en una matriz de puntos o en un código de barras bidimensional, que se conocen como códigos QR (acrónimo en inglés de *Quick Response*).

4. Los buques de guerra y la Industria 4.0

Considerando el tamaño de nuestra Armada, esta debe seguir estando en la punta de lanza de las tecnologías disponibles para que le proporcione la necesaria superioridad en el combate, y esto incluye a las tecnologías digitales que son el corazón del *4.0*. Si debemos expresar los intereses de la Armada en este campo, podemos resumirlos en las siguientes ideas:

- Integración de todos los buques en una red de la Flota *Armada 4.0*.
- Monitorización de los sistemas desde tierra para la optimización de su *mantenimiento predictivo basado en la condición* (CBM por sus siglas en inglés). Control y mantenimiento remoto.

- Introducción de sistemas ciber-físicos. Estudio y análisis de los datos generados a bordo.
- Buque autónomo y automatizado que conlleve una reducción de la dotación.
- Trabajos a bordo con realidad aumentada.
- Generación de respetos a bordo mediante impresión 3D.

De cara a la plataforma de los buques de guerra, a sus operaciones y a las actividades necesarias de mantenimiento, se han potenciado los centros de diagnóstico y el empleo de las tecnologías de la información que permiten disponer de los datos de funcionamiento de los buques desplegados en tiempo real y al mismo tiempo facilitar la asistencia técnica a distancia. Estos *centros de supervisión y análisis de datos monitorizados de la Armada* (CESADAR), es donde se analizan los datos registrados en los *sistemas integrados de control de la plataforma* (SICP) de los buques para la disminución de los gastos de mantenimiento y la optimización de las tareas e intervalos del mantenimiento preventivo, ver una representación de estos conceptos en la figura 3. Del análisis de los datos se asesora a los buques en la mar en tiempo real, se adelantan las tareas de mantenimiento correctivo en puerto y se modifica el mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad de equipos y sistemas.

Figura 3. Representación del CESADAR (Armada).

Los datos operacionales de los motores y turbinas, almacenados en los SICP, se transmiten a través por satélite cuando están navegando. Además de los análisis de datos dinámicos, en el centro se reciben los datos de análisis del agua, fluidos hidráulicos, etc., procedentes de los distintos laboratorios de la Armada y del *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial* (INTA). Al integrar estos servidores en la base de datos del mantenimiento, tanto de vibraciones como termografías, sus análisis son la guía para su mantenimiento predictivo.

Esta organización está formada por seis centros, un núcleo en Cartagena y cinco periféricos en Madrid, Ferrol, San Fernando, Rota y Las Palmas. Los buques amparados por él son más de veinte, entre los que se incluyen las fragatas *F-100 Álvaro de Bazán*, los buques cazaminas, los hidrográficos, los anfibios *LPD* (conocidos por sus siglas en inglés *Landing Platform Dock*), los patrulleros, el *BAC* (acrónimo de *buque de aprovisionamiento de combate*) o el *LHD* (acrónimo en inglés de *Landing Helicopter Dock*) *Juan Carlos I*.

Dada su idiosincrasia como buques de guerra, el funcionamiento, seguridad y resiliencia de los sistemas de información y de mando y control, no solo en las operaciones, son factores críticos para el apoyo a la decisión. Por ello, se añade un esfuerzo en ciber-seguridad que no se centra solo en sistemas e información de carácter clasificado, sino que tiene una fuerte dependencia en todos los ámbitos: operaciones, logística, sistemas específicos para el control de la plataforma, sistemas de combate, navegación, gestión de material, etc.

5. Conclusiones

La industria naval militar se adaptará en los próximos años a las nuevas tecnologías. Existen multitud de tecnologías emergentes y disruptivas que día a día van evolucionando y apareciendo en nuestras vidas, pero que tradicionalmente han costado que se adaptaran a la realidad de la construcción naval militar. Es por tanto necesario implementar de la forma más natural y rápida estas nuevas tecnologías, de tal modo que se puedan ir incorporando tanto en las etapas de diseño, como en los procesos de producción, así como también en los propios productos.

Estos procesos productivos que se mencionan deben de incorporar las nuevas herramientas, diferentes métodos de fabricación, dispositivos de control, verificación y validación de los elementos, mediante productos y servicios descritos a lo largo de este artículo técnico.

Realidad virtual y realidad aumentada, robots y fabricación aditiva se verán de una manera más frecuente en los talleres de montaje, pero también en el propio producto: el buque de guerra. El buque será el continente, vaso comunicador y vínculo de la interconectividad entre todos los elementos que se fabriquen y construyan. Y también el propio buque de guerra, cada vez más inteligente y más conectado con sus propios objetivos y misiones, para informar de su rendimiento, o del estado del ciclo de vida de sus elementos; buques militares que incluso podrán realizar determinadas tareas de forma autónoma.

Pero para que todo eso sea posible, astilleros, oficinas técnicas, suministradores y herramientas informáticas, como los sistemas CAD, habrán de ser facilitadores de la transmisión de toda la información necesaria. Todos los partícipes de la industria naval militar estarán conectados con sistemas de gestión de la información, donde la monitorización y visualización del buque será una parte más de todo el sistema global.

La Armada está rediseñando su estructura de mantenimiento basado en *4.0* desde la puesta en marcha del CESADAR. Se espera un importante salto tecnológico en este campo con la futura serie de *fragatas F-110*.

Referencias

1. *Muñoz, J.A. y Pérez, R. The Internet of Ships: a new design for Smart Ship» The Naval Architect magazine. Enero. 2017. pp. 26-30.*
2. *Pérez, R. y Muñoz, J.A. Design of smart ships for the IoT. ICC 2017. Cambridge, Reino Unido. Marzo. 2017.*
3. *Pérez, R; Muñoz, J.A. y Gutierrez, J.R. Design Rules Evaluation through Technologies of Treatment of Big Data. 17th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries. Pavone, Italia. 2018. pp 448-462.*
4. *Porter, M.E. y Heppelmann, J.E. How Smart, Connected Products Are Transforming Companies. Harvard Business Review. Octubre. 2015.*

Análisis hidrodinámico experimental de la propulsión de buques de guerra

Piñeyro Tabernero, Arturo[1,*]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas» (INTA). Campus Tecnológico de El Pardo (CEHIPAR). Madrid. Email: pineyrota@inta.es (APT).

* Autor principal y responsable del trabajo; pineyrota@inta.es (APT).

Resumen

El proyecto de los modernos buques de guerra constituye un reto de integración entre la arquitectura de los innovadores sistemas de combate y el diseño de las plataformas navales. Una vez definido el perfil y requisitos operativos del futuro buque, un valor añadido del proceso de diseño de la plataforma es la confirmación, en una fase temprana, de cada uno de los requisitos relativos a la propulsión del buque, que determinarán aspectos estratégicos tales como la elección del tipo de planta propulsora, potencia máxima instalada, autonomía, perfil de velocidades, etc.

Los canales de ensayos hidrodinámicos, mediante la experimentación con modelos a escala reducida, juegan un papel importante en los procesos de validación de las formas de la carena y de la optimización de sus apéndices. En los últimos años, el canal de aguas tranquilas (CAT) del Campus de El Pardo del INTA ha atendido sucesivos estudios de buques de guerra, tanto para nuevas construcciones de la Armada española como para marinas extranjeras.

Este artículo pretende presentar el estado del arte de las sucesivas técnicas y procedimientos experimentales realizados en el canal de aguas tranquilas del Campus de El Pardo del INTA, encaminados a la optimización del diseño de las futuras plataformas navales y la verificación de requisitos.

Palabras clave

Ensayos hidrodinámicos, propulsión de buques de guerra, canal de ensayos.

1. Introducción

La definición de la planta propulsora de un buque de guerra está plenamente condicionada por el cumplimiento los requisitos de estado mayor sancionados. La composición y dimensionamiento de la planta se encuentran recogidos en la especificación de contrato, documento técnico previo a la orden de ejecución cuya firma da luz verde al astillero contratista seleccionado para el inicio de construcción de la futura plataforma.

Los canales de experiencias hidrodinámicas realizan estudios con modelos a escala, permitiendo registrar parámetros dinámicos (fuerzas, momentos, trimados, velocidades y aceleraciones lineales y angulares, etc.) y extrapolarlos a plena escala según procedimientos estandarizados y validados. Los estudios realizados constituyen un eslabón valioso de la cadena de diseño, pues permite en la fase de definición del buque, presentar resultados a plena escala de la plataforma y validar los requisitos en términos de propulsión, maniobrabilidad y comportamiento en la mar.

Esta ponencia tiene por objetivo presentar el estado del arte de las sucesivas técnicas y procedimientos experimentales en términos de propulsión, realizados con modelos a escala en los últimos años en el canal de aguas tranquilas (CAT) del Campus de El Pardo del INTA para programas de buques de guerra de superficie contratados por la Armada española y marinas extranjeras, que permiten optimizar hidrodinámicamente los buques y la verificación de requisitos.

2. Desarrollo

2.1. Modelos de carena y propulsores

Cuando el contratista facilita al canal las formas tridimensionales de la plataforma y la geometría de los apéndices, define las condiciones de carga en las que se estudiará el futuro buque y facilita información de la tipología, dimensiones principales y determinadas características preliminares de los propulsores, todavía no diseñados.

A efectos de propulsión, de las múltiples condiciones de carga operativas que un proyecto de buque de guerra suele tener en cuenta a efectos de estabilidad, estructuras, etc., las estudiadas hidrodinámicamente suelen estar próximas a plena carga (PC), por ser las más demandantes y contemplando el margen de crecimiento futuro (MCF), que ha definido la Armada para tener en cuenta el aumento de desplazamiento durante los 30 o 35 años de ciclo de vida del buque. Los desplazamientos y trimados estáticos iniciales definirán las sucesivas situaciones de carga: 90 % PC-100 % PC - 110 % PC.

En relación con los propulsores, y en una primera etapa experimental, el canal propone el uso de «hélices de *stock*», seleccionando propulsores entre los más de 2.500 disponibles que han sido ensayados por el canal en proyectos previos y se aproximen a las principales características definidas: escala, tipología (paso fijo ó variable), numero de palas, paso, cuerda, diámetro total y diámetro del núcleo, revoluciones, relación de áreas (A_E/A_0), etc. Posteriormente, la carena será ensayada con los propulsores definitivos, diseñados con la información obtenida en esta primera etapa.

Alternativamente el contratista puede facilitar al canal modelos de propulsores cedidos por empresas suministradoras de paquetes propulsivos u otras instalaciones experimentales, que se adapten a las capacidades propulsivas demandadas a priori, y que cuyo tamaño sea compatible con la escala del modelo de carena, pues es deseable realizar la experimentación con modelos de carena lo suficientemente grande, entre 7 y 10 m de eslora, para maximizar la precisión en las medidas.

Figura 1. Detalle de modelos de carena y propulsores.

2.2. Canal de aguas tranquilas (CAT)

El canal de aguas tranquilas (CAT) del Campus de El Pardo del INTA es un tanque de agua dulce de 320 m de longitud que posee una gran sección transversal (6,5 m x 12,5 m) para evitar el efecto de bloqueo y con un carro remolcador que permite alcanzar 10 m/s reproduciendo la velocidad escalada del buque.

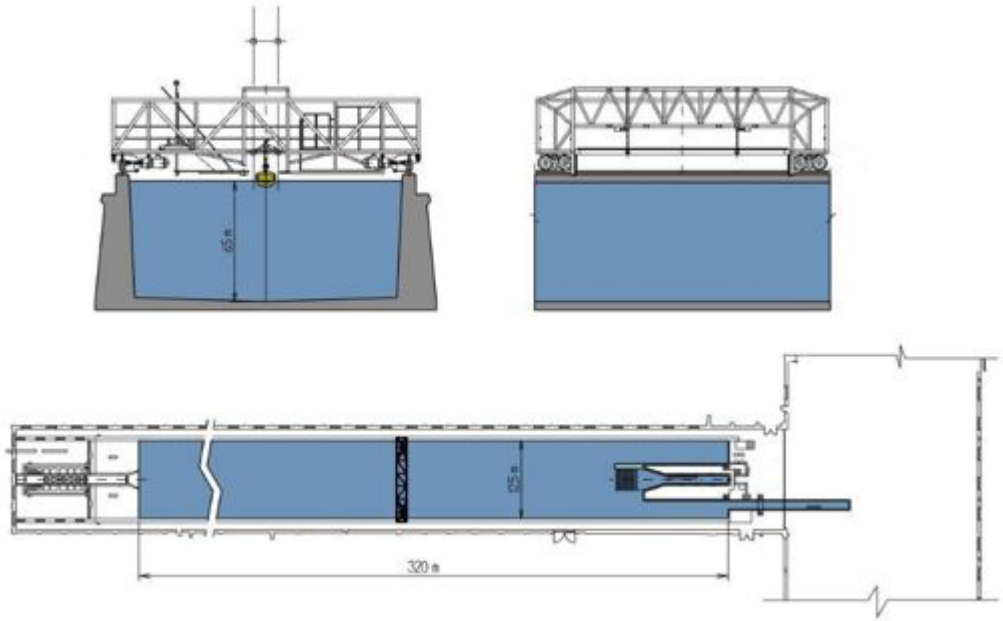


Figura 2. Descripción del CAT.

2.3. Alcance y secuencia de ensayos de optimización

Los buques de guerra configurados generalmente con dos líneas de ejes, poseen un gran número de apéndices bajo la flotación: quillas de balance, aletas estabilizadoras, arbotantes y timones, que contribuyen notablemente a la resistencia al avance del buque.

Por ello, la optimización de los buques de guerra se desarrolla en una primera etapa con ensayos de la carena desnuda y en una segunda fase con estudios de posición de cada uno de los apéndices. La bondad de las formas de la carena desnuda se evalúa comparando los resultados de los ensayos de remolque con

distintas variaciones de las formas principalmente en el cuerpo de proa (lanzada, bulbo o proa con sonar integrado) que permita determinar la configuración óptima que minimice la resistencia al avance de la carena, prestando especial atención a la componente por formación de olas.

Una vez seleccionada la configuración base optimizada del cuerpo de proa, se estudia la posición de los apéndices, realizando ensayos que permitan la correcta orientación de las quillas de balance y de los arbotantes, mediante la visualización local de líneas de corriente en sendos ensayos de remolque a la velocidad de diseño. Más adelante, y con la configuración final del buque se realizará un último ensayo de visualización global de líneas de corriente en la condición de autopropulsión.

Figura 3. Ensayo de visualización global de líneas de corriente.

Para la visualización de líneas de corriente en los arbotantes, generalmente con forma de «V», se disponen cámaras acimutales situadas en la bovedilla de la carena que permitan distinguir las orientaciones demandadas por cada pata del arbotante y observar la variación angular del flujo hidrodinámico a lo largo de su longitud, con el objetivo de definir un ángulo de orientación constante o cierto grado de *«twist»* para las secciones NACA que forman las patas.

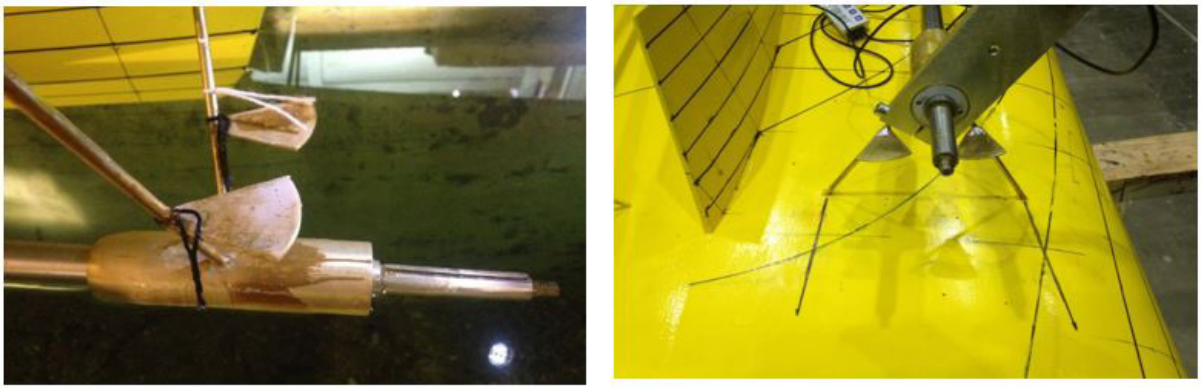


Figura 4. Instrumentación del ensayo de visualización de líneas de corriente en arbotantes.

Una vez orientados arbotantes y quillas, se realiza un *stripping test* (sucesión de ensayos de remolque adicionando secuencialmente apéndices desde proa hacia popa) para evaluar la contribución individual de cada apéndice en la resistencia total del buque y detectar aquellos susceptibles de ser rediseñados o reposicionados si las desviaciones individuales resultan elevadas. La secuencia experimental sería la siguiente:

- Carena desnuda (línea base).
- Carena con quillas de balance.
- Carena con quillas y aletas estabilizadoras.

- Carena con quillas, aletas, arbotantes.
- Carena con quillas, aletas, arbotantes y bocinas.
- Carena con quillas, aletas, arbotantes, bocinas y timones.

Experimentalmente se evidencia que la contribución de resistencia debido a todos los apéndices puede ser del orden de un 25 % el valor de la carena desnuda, siendo los timones (aún posicionados a la vía) y los arbotantes los que originan individualmente la mayor desviación.

Figura 5. Detalle de los apéndices orientados.

Con la carena optimizada en el cuerpo de proa y con los apéndices orientados (excepto los timones que permanecen a la vía), se procede a incorporar los propulsores e iniciar la fase de optimización del cuerpo de popa, realizando ensayos de autopropulsión con las variaciones de formas de popa, con colas de pato o cuñas con distintas longitudes y ángulos de deflexión.

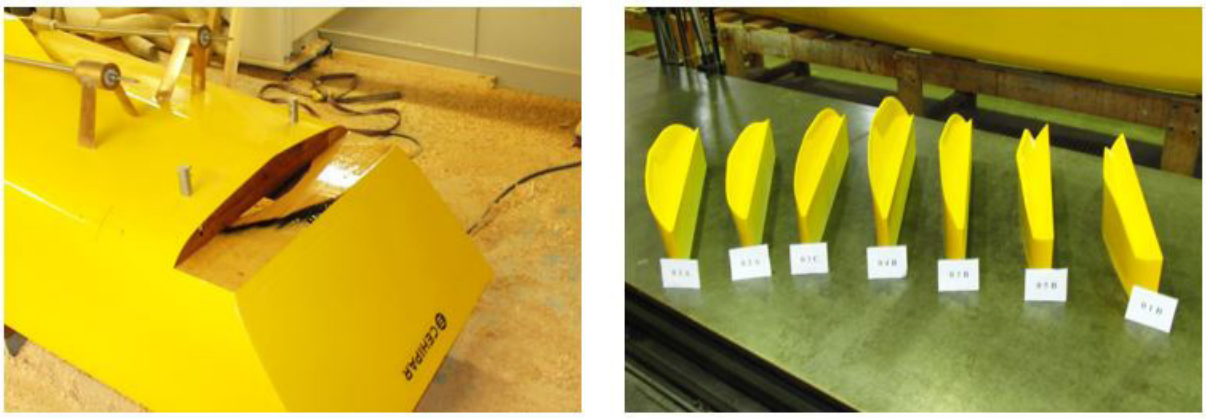


Figura 6. Detalle del cajeado de la popa y diferentes configuraciones de popas.

Todos los ensayos de autopropulsión se realizan con un mismo sentido de giro de los propulsores elegidos de forma preliminar en base a la experiencia previa y será confirmado posteriormente. La configuración óptima del cuerpo de popa será la resultante de la menor potencia entregada a la hélice a escala modelo (DHP_M). Es importante para cada configuración de popa, realizar ensayos a distintas velocidades pues las configuraciones óptimas a altas velocidades suelen ser configuraciones con cuñas de altos grados de deflexión que, sin embargo, penalizan mucho a bajas velocidades.

Una vez cerrada la configuración final de la popa se procede a realizar un ensayo de estela a la velocidad de diseño del propulsor, para determinar la variación de las componentes tridimensionales de la velocidad del agua (V_A) o de la estela (coeficiente adimensionalizado con la velocidad del modelo, definido

como $1 - V_A / V_M$) a su paso por el disco de la hélice. El grado de homogeneidad de los resultados obtenidos colabora a confirmar la correcta configuración del buque y proporciona la información necesaria para el diseño de los propulsores definitivos.

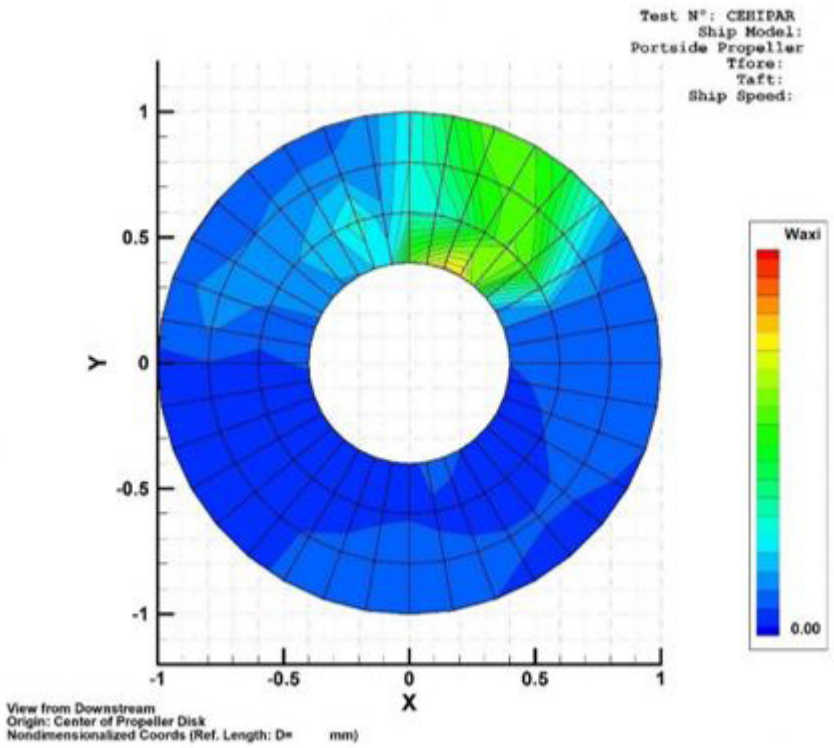


Figura 7. Ejemplo de los resultados de estela axial en la línea de babor de un buque.

Solo faltaría definir el sentido de giro de los propulsores y a continuación buscar el ángulo neutro de los timones. Para definir el sentido de giro, basta comparar los valores de empuje y de DHP_M procedentes de ensayos de autopropulsión con los propulsores girando en sentido supra-divergente, para después repetirlos con sentido de giro supra-convergente, teniendo la precaución de hacerlo a velocidades lo suficientemente altas para apreciar las diferencias.

Para buscar el ángulo neutro de los timones se realiza un análisis comparativo de resultados procedentes de nuevos ensayos de autopropulsión (a velocidad y deducción de fricción constantes) variando conjuntamente la orientación de ambos timones de tal forma que se barra desde los 6º con sus bordes de ataque hacia crujía hasta 6º con sus bordes de ataque hacia los costados, buscando el mínimo de la curva de DHP_M. Vuelve a ser importante la elección de la velocidad del buque para su optimización, pues a mayores velocidades los ángulos experimentales óptimos resultan ser algo menores.

3. Resultados y discusión

En este momento ya se dispone de la configuración final de la plataforma optimizada para la condición de carga de diseño y para las velocidades definidas. Solo resta obtener la curva de potencia–velocidad a plena escala, para verificar que la planta propulsora propuesta cumple con los requisitos de propulsión. Experimentalmente es necesario realizar un último ensayo de autopropulsión, dos ensayos de resistencia al avance (con y sin apéndices) con la configuración final del buque, así como realizar el post-proceso de extrapolación a plena escala.

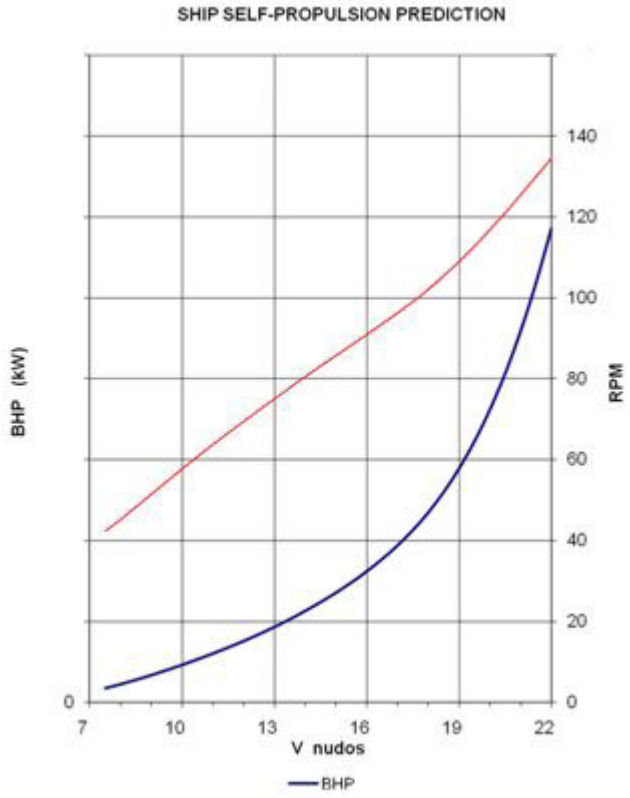


Figura 8. Curva potencia – velocidad de un buque auxiliar.

En las plantas de propulsión combinadas (motor eléctrico y/o motor diésel y/o turbina de gas), los requisitos están asociados a la capacidad de alcanzar las velocidades máximas y de crucero definidas marcha avante y en la condición ciaboga, en los modos de operación definidos de la planta: modo individual de cada componente de la planta y modo combinado.

4. Conclusiones

En la ponencia se ha expuesto el estado del arte y la secuencia experimental de los estudios encaminados a la optimización hidrodinámica de un buque de guerra desde el punto de vista de propulsión, describiendo el alcance y secuencia de los trabajos experimentales realizados en el canal de aguas tranquilas (CAT) del Campus de El Pardo del INTA, desde la recepción de las formas propuestas para el casco y apéndices hasta la predicción de velocidad y verificación de los requisitos propulsivos.

Agradecimientos

El autor agradece la colaboración del personal del Área de Diseño, Producción e Instrumentación de la Subdirección General de Sistemas Navales del INTA que ha participado en los estudios y ensayos experimentales presentados en este comunicado.

Referencias

1. *Harvald AA. Resistance and propulsion of ships. Ocean Engineering. A Wiley Series; 1983.*
2. *ITTC Performance Prediction Method 1978. ITTC Recommended Procedures and Guidelines (7.5-02 03-01.4); 2011.*

Flujo aerodinámico sobre el helicóptero en maniobra de aterrizaje sobre una fragata

Bardera Mora, Rafael[1,*], Matías García, Juan Carlos[1]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas», Ctra. de Ajalvir, km. 4,5, 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid). Email: barderar@inta.es (RBM), matiasgjc@inta.es (JCMG).

* Autor principal y responsable del trabajo; barderar@inta.es (RBM).

Resumen

La configuración geométrica de la superestructura de una fragata genera su propio entorno aerodinámico, ejerciendo una notable influencia sobre las operaciones de helicópteros que se desarrollan en su cubierta de vuelo. Este flujo aerodinámico se caracteriza por presentar condiciones extremadamente adversas durante la fase de aterrizaje, aumentando la carga del piloto y el riesgo de accidente durante la ejecución de las mismas.

El ensayo de una maqueta de fragata en el túnel T1 del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas» ha permitido reproducir el flujo aerodinámico a escala reducida en las condiciones aerodinámicas típicas presentes durante la maniobra de aterrizaje del helicóptero.

La investigación del flujo aerodinámico a que se encuentra sometido el helicóptero durante el aterrizaje, se ha llevado a cabo mediante técnicas experimentales no-intrusivas, como la velocimetría por imágenes de partículas (PIV) que nos ha proporcionado medidas del campo de velocidades y de turbulencia, las cuales nos han permitido caracterizar el flujo incidente sobre la aeronave durante las operaciones de aterrizaje sobre una fragata, para de esta forma, determinar las regiones de la cubierta de vuelo más conflictivas de cara a la operación de helicópteros.

Palabras clave

Fragata, helicóptero, aerodinámica, buques.

1. Introducción

Los helicópteros se presentan actualmente como una herramienta operativa muy útil para las operaciones militares en fragatas. Permiten, por ejemplo, dar soporte para la guerra antisubmarina y de superficie, tareas de vigilancia, o incluso transferencia de tropas entre diferentes buques [1]. Por ello, su operación en fragatas se presenta como un elemento esencial entre las operaciones navales modernas.

En general, la superestructura de un buque es básicamente una combinación de cuerpos poco aerodinámicos y que generan un flujo muy complejo alrededor del buque [2], afectando por tanto a las operaciones de un helicóptero sobre el mismo. Este hecho hace difíciles e incluso, en determinadas circunstancias, arriesgadas las operaciones de despegue y aterrizaje. Como se puede ver en la *figura 1*, la posición más habitual para la plataforma de helicópteros en una fragata es en la popa. Es un punto en donde la superestructura del buque genera una gran burbuja de recirculación ocasionada por el desprendimiento del flujo. Esta estructura de flujo, en contraste con la corriente libre que experimenta el helicóptero durante el procedimiento de aproximación al buque, es la que provoca oscilaciones y movimientos de baja frecuencia sobre el helicóptero, elevando la carga de trabajo del piloto durante la maniobra [3].

Figura 1. Plataforma de despegue y aterrizaje de helicópteros en la popa de una fragata.

El objetivo de este artículo es la obtención de mapas de velocidad en el entorno aerodinámico del helipuerto de una fragata mediante la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Así, se presentará la estructura de flujo presente en la maniobra de aterrizaje de un helicóptero, realizando ensayos en túnel de viento con un modelo de fragata simplificada (SFS2, «*Simple Frigate Shape*»).

2. Maniobra de aterrizaje de helicópteros en fragatas

En todos los ejércitos es común que existan procedimientos y maniobras estandarizadas relativas a las operaciones de aeronaves en buques militares. El caso del aterrizaje de helicópteros sobre fragatas no es una excepción, y una de las maniobras más comunes es el procedimiento de aterrizaje hacia la popa (*Foreward Landing Procedure*, figura 2). Esta maniobra se realiza en tres pasos [4]:

1. Aproximación al buque hasta una posición de espera situada al lado del mismo. Es preferible que el helicóptero se sitúe en el lado de babor para que el piloto tenga una mejor visión de la cubierta de la fragata. Además, el eje longitudinal del helicóptero debe ser paralelo a la línea central del buque.
2. Vuelo lateral hasta colocar el helicóptero en posición sobre el punto de aterrizaje.
3. Descenso vertical y aterrizaje.

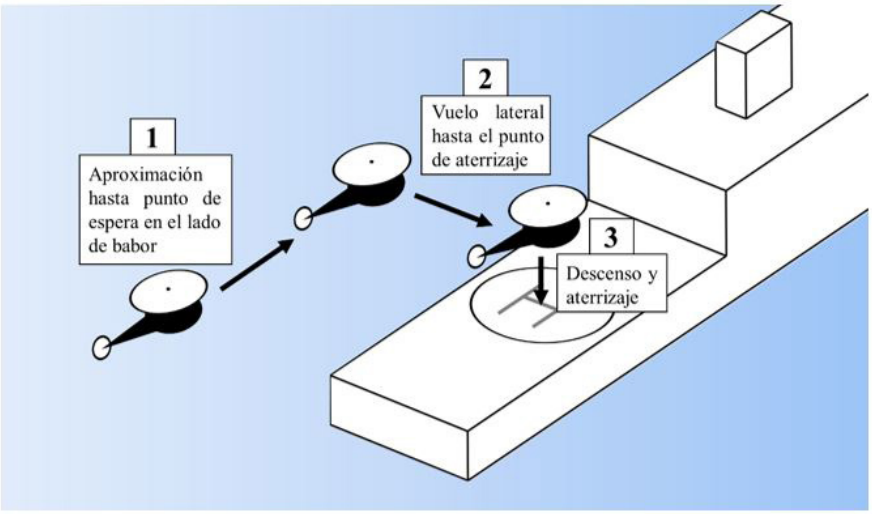


Figura 2. Esquema del procedimiento de aterrizaje hacia la popa en una fragata.

Para los ensayos tomaremos el punto de espera en el lado de babor a una distancia del punto de aterrizaje igual al ancho de la fragata. De esta forma, el desplazamiento lateral comprende la mitad sobre el agua y la mitad sobre la cubierta.

3. Montaje experimental de ensayos

Para caracterizar el entorno aerodinámico del helipuerto en una fragata, se llevaron a cabo ensayos en el túnel aerodinámico n.º 1 del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas». Las instalaciones se componen de un túnel de circuito cerrado y cámara de ensayos abierta de 3×2 m^2. En él, es posible alcanzar una velocidad máxima del flujo de hasta 60 m/s con una intensidad de turbulencia baja, menor que 0,5 %.

La figura 3 muestra las dimensiones del modelo de la fragata utilizada en los ensayos. Se trata de un modelo de fragata simplificado, a escala 1:85, denominado SFS2 («*Simple Frigate Shape 2*»). Esta maqueta representa la superficie del buque situada por encima de la línea de flotación, y la superestructura y chimenea mediante bloques prismáticos muy simples, que imitan la geometría poco aerodinámica de las fragatas convencionales. Este es un modelo muy utilizado para investigación en aerodinámica, dado que su sencillez geométrica permite una comparación directa entre resultados experimentales y aquéllos obtenidos mediante dinámica de fluidos computacional (CFD).

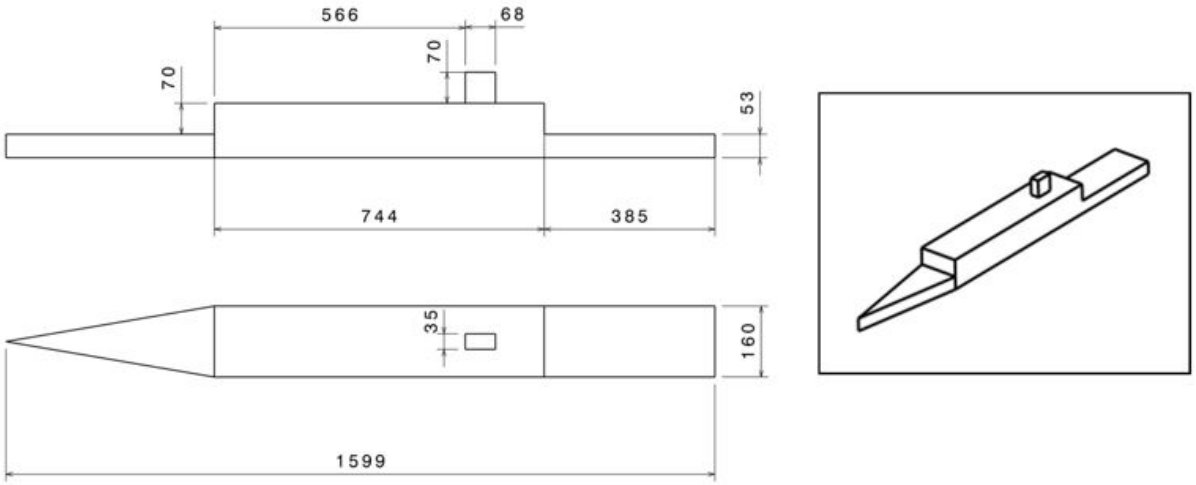


Figura 3. Dimensiones en mm de la fragata SFS2 a escala 1:85.

Para los ensayos, dado que el plano láser del sistema de medida PIV disponible en el túnel es vertical, y se busca obtener planos horizontales, el modelo se fijó a una pared vertical como se muestra en la figura 4. Además, se ancló con un pasador que permite el giro del modelo para poder así ensayar con distintos ángulos de incidencia de la corriente sobre la cubierta (WOD «*Wind Over Deck*») de 0º, 15º y 30º. Dado que la maniobra que realizan los helicópteros debe realizarse a una altura de 5 m sobre la cubierta, se tomaron los planos a una distancia de 58 mm sobre la base de la maqueta que representa el helipuerto.

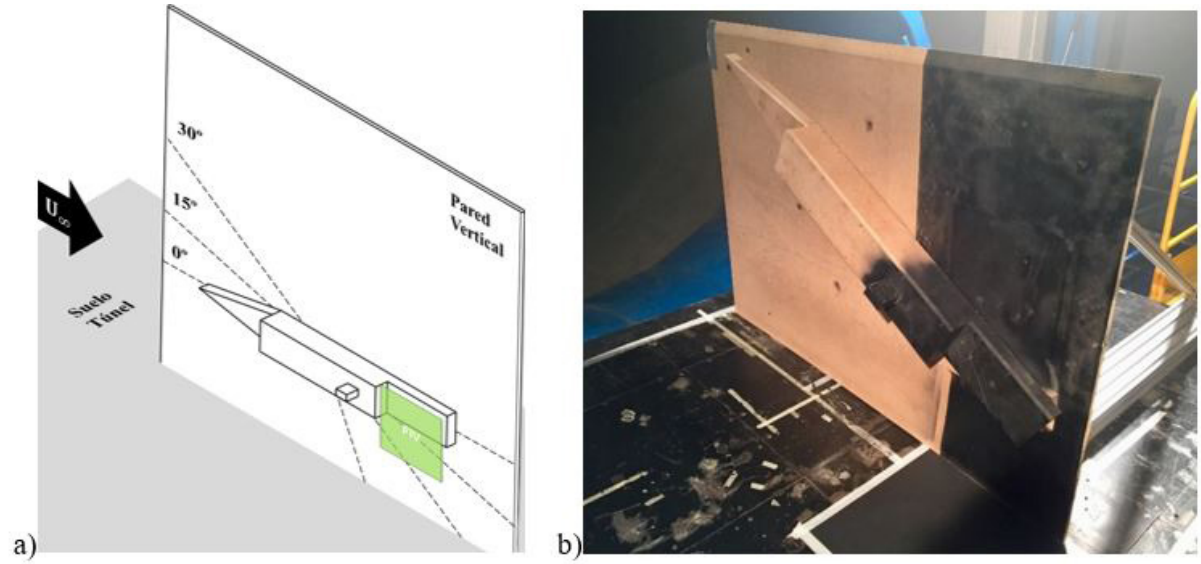


Figura 4. a) Esquema de posicionamiento de la fragata y el plano de medida de velocidades PIV. b) Modelo de fragata SFS2 colocado en la cámara de ensayos del túnel a WOD = 30º.

Todos los ensayos se realizaron a una velocidad de 10 m/s, lo que dadas las dimensiones de la fragata resulta en un número de Reynolds basado en la anchura de la maqueta de $1{,}09 \times 10^5$. Este valor se sitúa por encima del valor crítico () necesario para cumplir las leyes de semejanza dinámica entre el flujo sobre la maqueta y sobre el buque real [5].

3.1. Técnica de medida: PIV

La técnica de medida utilizada para los ensayos fue la velocimetría por imágenes de partículas o PIV (*Particle Image Velocimetry*) [5-8]. Se trata de una avanzada técnica de medida de velocidad no intru-

siva que necesita sembrar la corriente de aire con partículas de muy pequeño tamaño, las cuales son iluminadas mediante un plano de luz láser para poder ser capturadas en dos fotografías muy seguidas, separadas un tiempo corto Δt.

Así, realizando una correlación entre las imágenes podemos obtener un desplazamiento medio de las partículas ($\Delta\bar{X}$). Y c omo conocemos el tiempo entre capturas (Δt), podremos obtener la velocidad con la siguiente expresión:

$$\bar{u}(\bar{x},t) = \frac{\Delta\bar{X}(\bar{x},t)}{\Delta t} \qquad (6)$$

Los equipos necesarios para utilizar la técnica de medida son: generador de partículas, sistema de iluminación, sistema de registro de imágenes, sincronizador y sistema de procesado. Como generador de partículas es habitual utilizar atomizadores Laskin, que permiten generar partículas muy pequeñas que puedan adquirir en poco tiempo la velocidad local del flujo. El sistema de iluminación consta de dos láseres pulsados Nd:YAG *(Neodymium: Yttrium Aluminium* Garnet). Para capturar las imágenes se utiliza una cámara digital, que consta de un sensor CCD y un objetivo o lente que permite regular la entrada de luz y el enfoque. Es necesario un sincronizador que establezca el momento adecuado en el que se disparan los láseres y se toman las fotografías con la cámara. Y por último, debe disponerse de un sistema de procesado que realice la correlación entre los pares de imágenes para obtener los mapas de velocidad deseados. La *figura 5* muestra el esquema simplificado de funcionamiento del sistema PIV.

Todo lo cual permite que el PIV tenga dos importantes ventajas frente a los sistemas tradicionales: su medida no es intrusiva (el sistema no perturba la corriente) y permite obtener mapas de velocidades

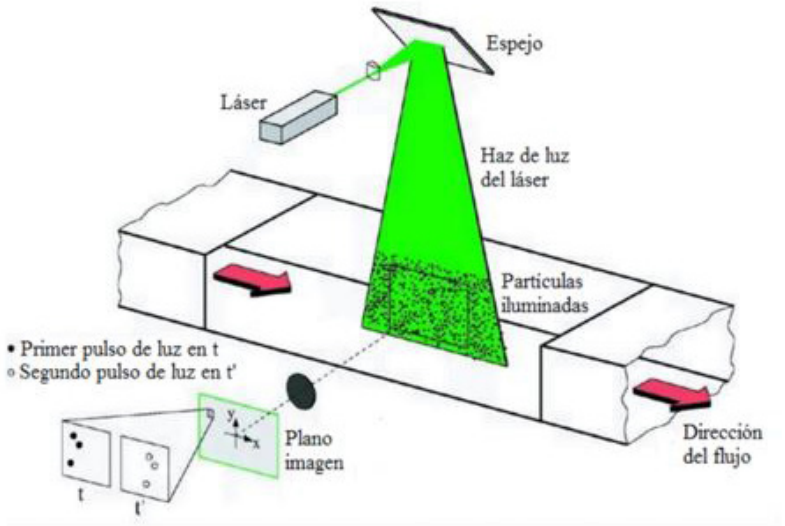


Figura 5. Posición de anemómetros en el mástil sobre el puente de mando en una fragata.

globales y no en un solo punto.

4. Resultados y discusión

4.1. Mapas de velocidad e intensidad de turbulencia

Se muestran a continuación los mapas de velocidad adimensionalizados con la corriente libre del túnel, obtenidos de realizar los ensayos PIV al modelo de fragata SFS2 en los casos de . A su derecha, se representan también los mapas de intensidad de turbulencia. Todos ellos están realizados a la misma altura sobre la cubierta del buque (58 mm sobre la maqueta). En los mapas se indica además una línea negra que marca la trayectoria que debe seguir el helicóptero durante la maniobra de aterrizaje hacia el

helipuerto situado en la popa descrito en el *apartado 2*, y se delimita con una línea discontinua en rojo el volumen que ocuparía el plano del rotor durante la misma.

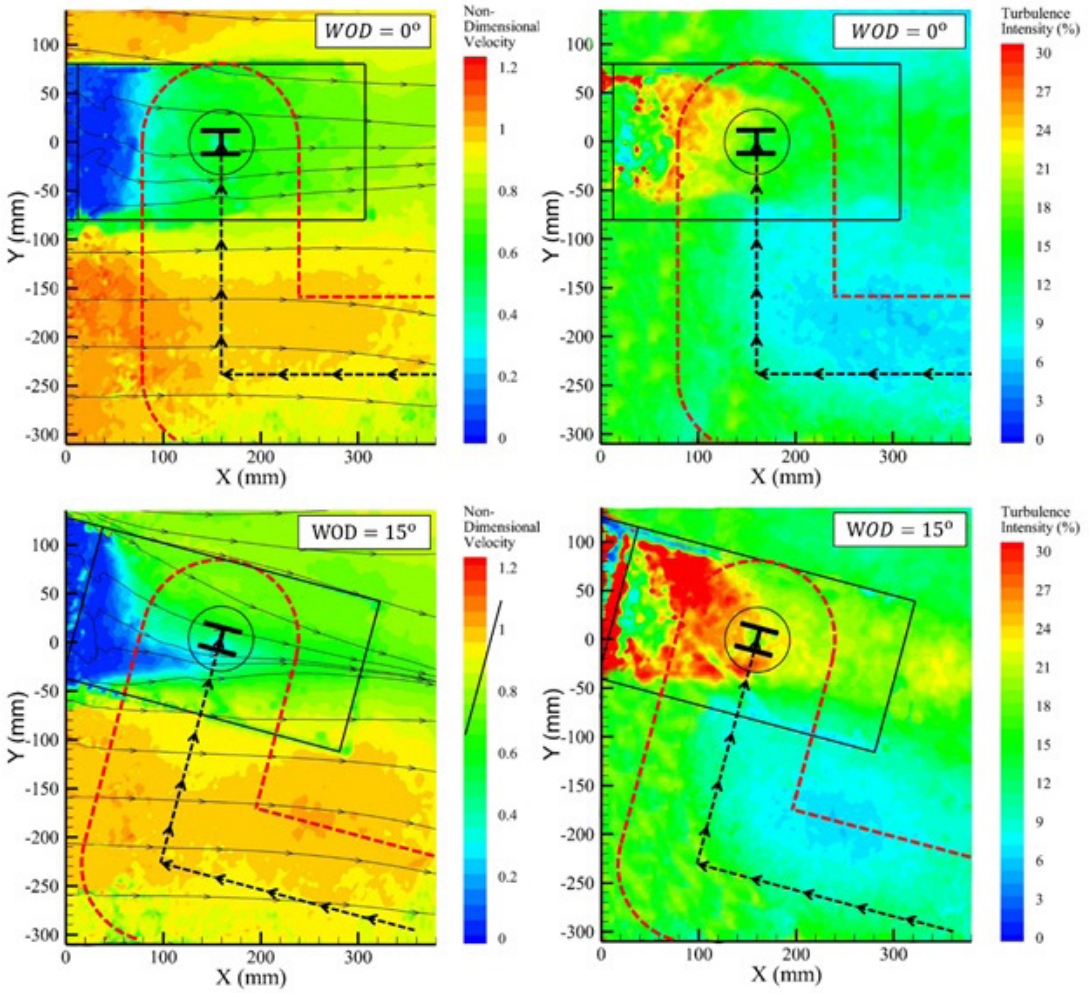


Figura 6. Mapas de velocidad adimensional e intensidad de turbulencia a 0° y 15°. Trayectoria de aterrizaje del helicóptero marcada.

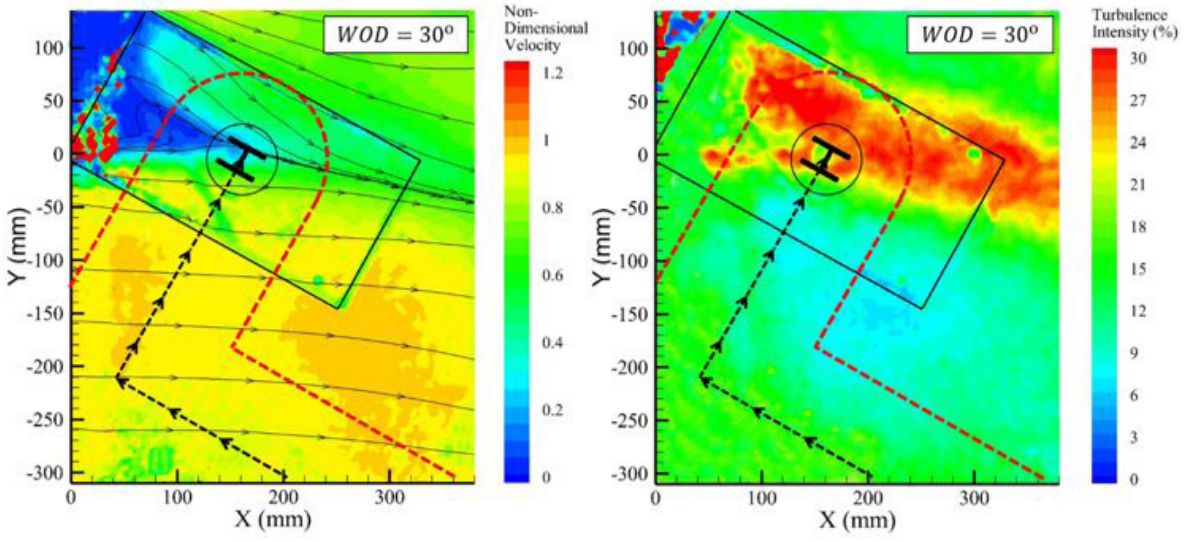


Figura 7. Mapas de velocidad adimensional e intensidad de turbulencia a 30º. Trayectoria de aterrizaje del helicóptero (línea discontinua negra).

Observando los mapas de las *figuras 6 y* 7 puede decirse que en los tres casos aparece una zona de baja velocidad causada por el desprendimiento de la corriente en la zona inmediatamente posterior al escalón descendente que forma el hangar con la base de la plataforma del helipuerto (*x~50 mm; y~0 mm*). En cuanto a la operación del helicóptero, es claramente visible que aunque durante gran parte de la maniobra está sometido a una corriente limpia, en la última fase de la maniobra, cuando se desplaza lateralmente hacia el punto de contacto, su rotor experimenta un gran cambio de velocidades incidentes, ocasionado por la presencia de la superestructura de la fragata. Esto hace aumentar también la turbulencia en la región, complicando la maniobra y aumentando por tanto la carga de trabajo a la que se verá sometido el piloto en esa última fase del aterrizaje. Por último, comentar que la intensidad de turbulencia es mayor según aumenta el ángulo de incidencia de la corriente. Esto hará que la operación sea más arriesgada si el viento incide con 30 grados con respecto a la situación en que la corriente incidente está contenida en el eje de simetría del barco (*WOD*=0º).

5. Conclusiones

Los mapas de velocidad obtenidos mediante la técnica PIV han permitido mostrar que la maniobra de aterrizaje de helicópteros sobre fragatas es una maniobra muy compleja para los pilotos. Esto se debe al gran cambio de velocidades y al incremento de intensidad de turbulencia que experimenta el rotor del helicóptero durante el desplazamiento lateral hacia el punto de toma, siendo mayores a mayor ángulo de incidencia de la corriente.

Además, los datos experimentales presentados en este artículo constituyen una base muy útil de cara a la comparativa y validación de datos en códigos numéricos de aerodinámica computacional. Esto es así porque se ha utilizado una maqueta de fragata muy simplificada (SFS2) que debido a su sencillez geométrica, resulta fácil de mallar y obtener resultados en CFD que permitan una fácil intercomparación y validación de resultados experimentales y numéricos.

Por último, ha quedado patente que es de gran importancia la realización de ensayos en túnel de viento de las fragatas, orientados a certificar las maniobras de los helicópteros y así establecer las envolventes de vuelo en función de las condiciones de viento, que limiten y hagan las operaciones de despegue y aterrizaje de helicópteros sobre fragatas lo más seguras posibles. También debe destacarse que todo nuevo buque diseñado debería ser ensayado de esta forma, para detectar posibles peculiaridades aerodinámicas ocasionadas por la geometría de su superesctructura y así determinar correctamente las envolventes de vuelo de las maniobras de aeronaves sobre su cubierta.

Agradecimientos

Los autores agradecen su colaboración al personal del Área de Ensayos Aerodinámicos del INTA que ha participado en los ensayos presentados en este comunicado.

Referencias

1. *Kääriä CH, Wang Y, White MD, et al. An experimental technique for evaluating the aerodynamic impact of ship superstructures on helicopter operations. Ocean Eng 2013; 61: 97-108.*
2. *Swales C, Breeze G, Swales C, et al. LDV measurements above the flight deck of a model frigate. In: 35th aerospace sciences meeting & exhibit, Reno, NV, 6-9 January 1997. Reston, VA: AIAA.*
3. *Shafer DM. Active and passive flow control over the flight deck of small naval vessels. Master's Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, VA, 2005.*
4. *Foeken M, Pavel M. D., Investigation on the simulation of helicopter/ship operations. Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology Kluyverweg 1, 2629 HS, Delft, The Netherlands.*

5. *White, F. Dimensional Analysis and Similarity. In Fluid Mechanics. Fourth Edition. McGraw-Hill Companies, Inc. 2002, pp. 298-299.*
6. *Raffel M, Willert CE, Wereley ST, et al. Particle image velocimetry: a practical guide. New York: Springer, 2007.*
7. *Adrian RJ and Westerweel J. Particle image velocimetry. Cambridge, MA: Cambridge University Press, 2011.*
8. *Prasad AK. Particle image velocimetry. Curr Sci 2000; 79(1):10.*

Estimación de parámetros de un modelo de maniobra no lineal de un vehículo subacuático no tripulado: un enfoque de inferencia indirecta

Revestido Herrero, Elías[1,*], Llata García, José Ramón[1] y Velasco González, Francisco Jesús[1]

[1] Dep. Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática, Univ. Cantabria; Email: revestidoe@unican.es (ERH), ramon.llata@unican.es (RLG), velascof@unican.es (FVG).

* Autor principal y responsable del trabajo; revestidoe@unican.es (ERH).

Resumen

En este trabajo, se propone la aplicación de técnicas de inferencia indirecta para la estimación de parámetros de un modelo de maniobra no lineal. Para este cometido, se dispone de datos de diferentes ensayos, que se llevaron a cabo con un vehículo subacuático no tripulado con forma de torpedo en las instalaciones del Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo CEHIPAR, Madrid. El modelo obtenido se valida mediante métodos gráficos y estadísticos, mientras que las propiedades estadísticas de los parámetros estimados evalúan mediante un estudio de Monte Carlo de 100 realizaciones.

Palabras clave

Modelo de maniobra no lineal, inferencia indirecta, vehículo subacuático no tripulado, mínimos cuadrados ordinarios.

1. Introducción

La aplicación de vehículos no tripulados en el ámbito naval se conoce ampliamente en el ámbito científico, uno de los sectores que están impulsando esta tecnología con más fuerza en los últimos años es el militar y de seguridad [1]. La incorporación de vehículos no tripulados en defensa, han contribuido al estado del arte de los sistemas no tripulados [8] para misiones peligrosas o de alto riesgo, tales como el seguimiento, la detección y neutralización de minas. Hoy en día, los autonomous *underwater vehicles-unmanned underwater vehicles* (AUV-UUV) son de suma importancia, tanto para aplicaciones y procedimientos para la exploración submarina en aplicaciones de defensa y civiles.

Para este tipo de aplicaciones con vehículos no tripulados, en primer lugar es muy habitual, con objeto de desarrollar posteriormente un sistema de control adecuado, la identificación de modelos de maniobra no-lineales de seis grados de libertad (6GDL) obtenidos a partir de ensayos. En la literatura se encuentran diferentes tipos de técnicas para la obtención de estos modelos, ver [2][10] y sus referencias. Sin embargo, existen técnicas que todavía no se han aplicado a este cometido como son las técnicas de inferencia indirecta. Estas técnicas se han utilizado ampliamente para el modelado de series temporales en el área de econometría [4]. Posteriormente, las técnicas de inferencia indirecta se adaptaron para incluir sistemas con entradas exógenas y para aplicarlas al problema de identificación de sistemas [12]. Este último enfoque es el que aplica en este trabajo, para la estimación de parámetros de un modelo de maniobra no lineal de un vehículo subacuático no tripulado. En la literatura se encuentran trabajos en los que se aplican estas técnicas a un modelo no lineal de tanques [5] y también a un modelo en el dominio de la frecuencia de una maquina síncrona [1]. Sin embargo, no se encuentran trabajos que apliquen estas técnicas a modelos de maniobra no lineales. Además este método proporciona mejores resultados en lo que se refiere a la exactitud y a la eficiencia de los parámetros estimados, con respecto a otros métodos existentes en literatura como pueda ser el método de variables instrumentales [12].

En el presente trabajo se aplican técnicas de inferencia indirecta a la estimación de parámetros de un modelo de maniobra no lineal correspondiente a un vehículo no tripulado con forma de torpedo. Se proponen dos casos de estudio uno con datos simulados para verificar las propiedades estadísticas del método aplicado y otro con datos reales adquiridos en las instalaciones del Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo CEHIPAR, donde se valida el modelo con métodos gráficos y estadísticos.

2. Modelo de maniobra

El modelo de maniobra no lineal de 6 GDL se puede expresar de la siguiente forma [3]:

$$\begin{aligned} M\dot{\upsilon} + C(\upsilon)\upsilon + D(\upsilon)\upsilon + g(\eta) &= \tau \\ y = \eta + v \ , \ \dot{\eta} &= J(\eta)v \end{aligned} \quad (1)$$

donde $\eta = [x,y,z,\phi,\theta,\psi]^T$ es el vector de posición y ángulos de Euler, $\upsilon = [u,v,w,p,q,r]^T$ son las velocidades lineales y angulares, $\tau_ = [X,Y,Z,K,M,N]^T$ son las fuerzas y momentos w es el ruido en la medición. M es la matriz de masa adicional, $C(\upsilon)\upsilon$ es el término de Coriolis, $g(\eta)$ es la matriz de restauración, $J(\eta)$

es la matriz de rotación y $D(v)$ representa el amortiguamiento hidrodinámico, que es una combinación de términos lineales y no lineales. Todas los parámetros de las matrices de la ecuación (1) considerando las simetrías del vehículo objeto de estudio de este articulo (ver figura 1) se pueden encontrar en Fossen [3].

El empuje, del sistema de propulsión del vehículo, se puede expresar como:

$$T = \rho D_h^4 K_T n|n|(1-t) \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del agua, D_h es el diametro de la hélices, n son las revoluciones de la hélice por segundo, t es el factor de empuje (valores típicos de 0.05 a 0.2) y K_T es el coeficiente adimensional [3]. Basándose en la ecuación de empuje (2) y el momento de guiñada, la siguiente expresión se obtiene según Refsnes [9]:

$$\begin{bmatrix}\tau_{X,th}\\ \tau_{N,th}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 1\\ d_p & -d_p\end{bmatrix}\begin{bmatrix}T_p\\ T_s\end{bmatrix} \quad (3)$$

donde $\tau_{X,th}$ es la fuerza de avance , $\tau_{N,th}$ es el momento de guiñada, d_p es la distancia del centro de masas a la he´lice, T_p es el empuje de estribor y T_S es el empuje de babor. Además, el angulo de balance $\phi = 0$:

$$\tau_{M,th} = -(T_p - T_s d_p)\ sin\ (\phi) \quad (4)$$

La fuerza de propulsión de arfada, la proporciona la hélice vertical del vehículo ($\tau\ Z_{,th} = T\ (n_v)$). Donde T es el empuje definido en (2) y n_V son las revoluciones de la hélice vertical.

Como resultado, las fuerzas generadas por los elementos de propulsión son $\tau = [\tau_{x,th}, 0, \tau_{z,th}, 0, \tau_{M,th}, \tau_{N,th}]$.

3. Pruebas en canal

En esta sección se enumeran las pruebas que se realizaron en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR) para la estimación de parámetros del modelo matemático que se ha definido anteriormente. Para ello, se ha utilizado un vehículo en forma de torpedo comercial, que tiene una longitud máxima de 1,65 m y un radio de 0,17 m. En la figura 1 se muestra el montaje del vehículo en el canal de aguas tranquilas del CEHIPAR. Las pruebas realizadas fueron las siguientes: remolcado a diferentes velocidades, deriva estática, cabezada estático (como el anterior pero con el vehículo gira 90 grados), balance dinámico, guiñada dinámico (como el anterior pero con el vehículo gira 90 grados), aceleración y el frenado, arfada dinámica (como el anterior pero con el vehículo gira 90 grados) (para más detalles sobre los ensayos realizados ver Revestido [11] y Phillips [7]).

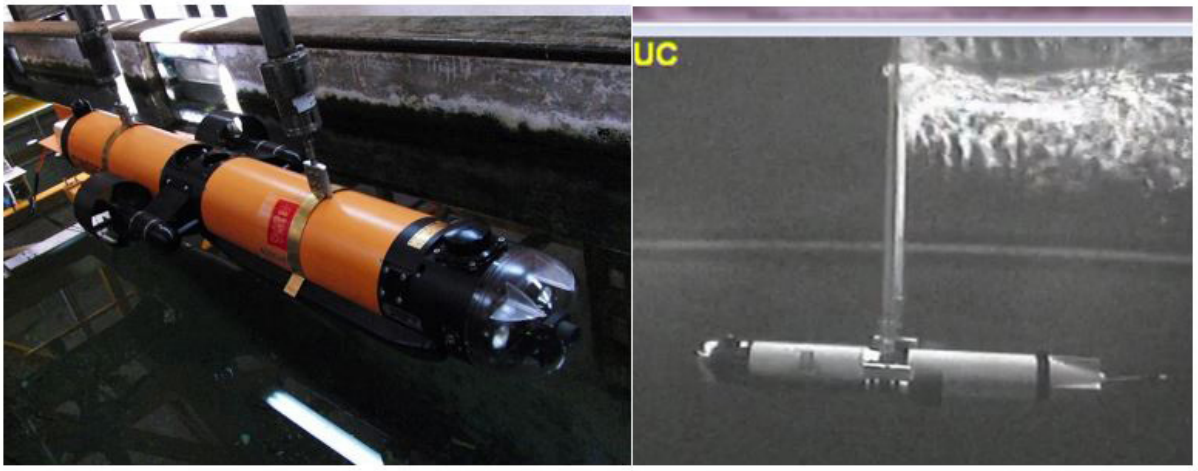


Figura 1. (Izquierda) montaje del vehículo en las instalaciones del CEHIPAR; (derecha) ensayo de cabezada dinámico.

4. Inferencia indirecta

El método de inferencia indirecta utiliza un modelo «mal especificado» cuyos parámetros se pueden estimar mediante datos del sistema verdadero. El método también utiliza un modelo parametrizado cuya estructura es conocida y corresponde a la estructura real del sistema (en este caso el modelo de maniobra ecuación (1)), este modelo se emplea para obtener datos simulados con el modelo real. El objetivo del método es obtener los parámetros del modelo real que minimicen la distancia entre las salidas generadas por el modelo mal especificado obtenido con datos del sistema verdadero y las salidas generadas por el modelo mal especificado obtenido con datos simulados. En la figura 2 se muestra un diagrama de bloques del método de inferencia indirecta.

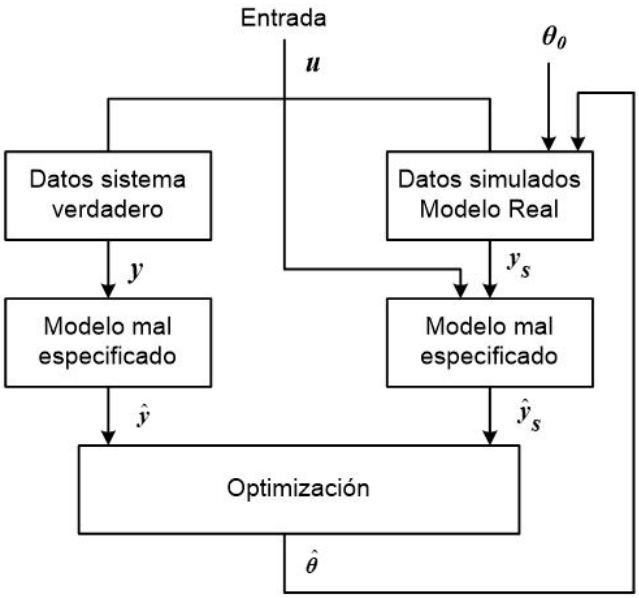


Figura 2. Diagrama de bloques del método de inferencia indirecta.

Para la estimación de los parámetros del modelo mal especificado estimado con datos del sistema verdadero y el modelo mal especificado estimado con dato simulados del modelo real (ver figura 2), se aplica el método de mínimos cuadrados ordinarios. Todos los parámetros que se han estimado, se refirieren a un sistema de coordenadas ortogonal a derechas con centro en el eje del cilindro a una distancia de 785 mm del extremo de proa del vehículo (a la altura del cáncamo de sujeción situado entre el orificio del propulsor vertical y el orificio de compensación). Para la estimación de los parámetros se ha planteado, el modelo clásico de regresión lineal, que se puede escribir con la siguiente notación:

$$y = \varphi\,\theta + w \quad (5)$$

donde,

$y = [y_1\, y_2 ... y_N\,] = N \times 1$ vector de mediciones de salida.

$\theta = [\theta_0\, \theta_1 ... \theta_n] = n_p \times 1$ vector de parámetros desconocidos, $n_r = n_p + 1$ $\varphi = [1\ \varphi_1\ \varphi_2 ...\ \varphi_n] = N \times n_r$ matriz de regresores.

$w = [w_1\, w_2 ... w_N\,] = N \times 1$ vector de errores en la medición.

N = Numero de muestras.

n_p = Numero de parámetros.

Donde θ_0 es el parámetro de sesgo, que se corresponde con el regresor de unos incluido en φ. Es conveniente introducir en el modelo este parámetro, para estimar el posible sesgo que puedan tener los datos, incluso en el caso de que se obtengan valores de θ_0 próximos a cero.

5. Resultados y discusión

En este artículo se proponen dos casos de estudio para la estimación de la fuerza de desplazamiento transversal *Y* de la ecuación (1): uno de ellos con datos simulados y el otro con datos adquiridos en las instalaciones del CEHIPAR. En el primero de ellos se verifican las propiedades estadísticas del estimador basado en inferencia indirecta mediante un estudio de Monte Carlo de 100 realizaciones. El modelo mal especificado se conforma eliminando el término no lineal de la ecuación *Y*. En la tabla 1 se muestran los resultados de este estudio para la fuerza de desplazamiento vertical, donde se observa cómo el método de inferencia converge a los parámetros verdaderos con valores de sesgo inferiores al 1 %. Además, los valores bajos de desviación estándar de cada uno de los parámetros indican que el método aplicado es eficiente. Por otra parte, en la figura 3 se muestran las distintas iteraciones llevadas a cabo por la rutina de optimización para una de las realizaciones del estudio de Monte Carlo. Para la implementación de esta rutina se ha utilizado la función *fminsearch* de la *toolbox* de optimización de Matlab.

	Yvdot	Yv	Yvv
Param. verdaderos	-101,3305	-71,2574	-64,7885
Media	-101,3285	-70,8020	-64,2180
Desviación estándar	0,02150	0,1380	0,5676
Sesgo	0,002 (0,019 %)	0,4554 (0,639 %)	0,5705 (0,88 %)

Tabla 1. Estudio de Montecarlo de 100 realizaciones distintas, inicialización con 10 % error adicional en los parámetros verdaderos

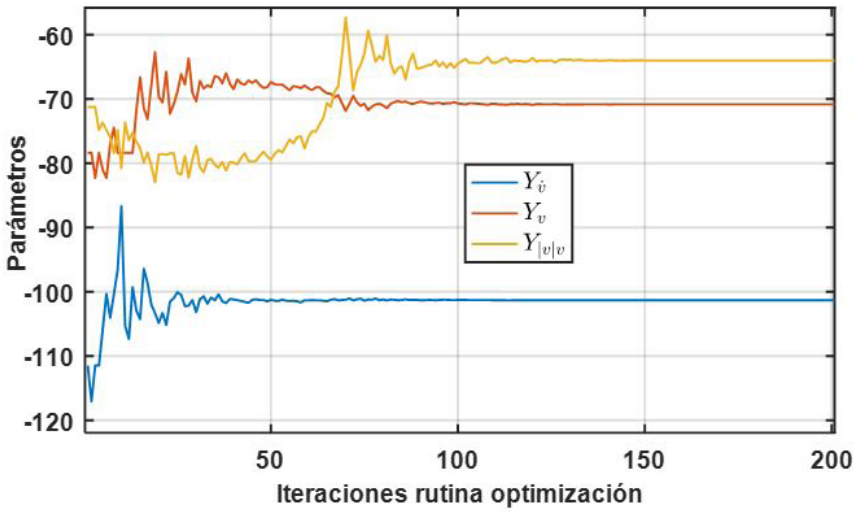


Figura 3. Diagrama de bloques del método de inferencia indirecta.

En el segundo caso se estiman los parámetros utilizando datos adquiridos en los ensayos en canal y se valida el modelo utilizando un conjunto de datos diferente al utilizado en la estimación. De los datos adquiridos en las instalaciones del CEHIPAR se utilizaron la mitad de los datos para la estimación de los parámetros y la otra mitad para la validación. En la figura 4 se muestran los resultados de ajuste a los datos medidos, obtenidos por el método de inferencia indirecta para la estimación de la fuerza vertical. Otra forma de validar el modelo es mediante el cálculo del coeficiente de determinación , que proporciona información de en qué medida, el modelo que se ha obtenido, es capaz de reproducir los datos medidos, y representa el porcentaje de variaciones de salida reproducidos por el modelo:

$$R_2(\%) = \frac{\sum(\hat{D} - \bar{D})^2}{\sum(\hat{D} - D)^2 + \sum(\hat{D} - \bar{D})^2}$$

Donde D y representan los datos medidos y su media respectivamente, y los datos estimados por el modelo obtenido. Para los datos adquiridos de fuerza de desplazamiento transversal se ha obtenido un coeficiente de determinación de 97,61 % que corrobora el buen ajuste mostrado en la figura 4.

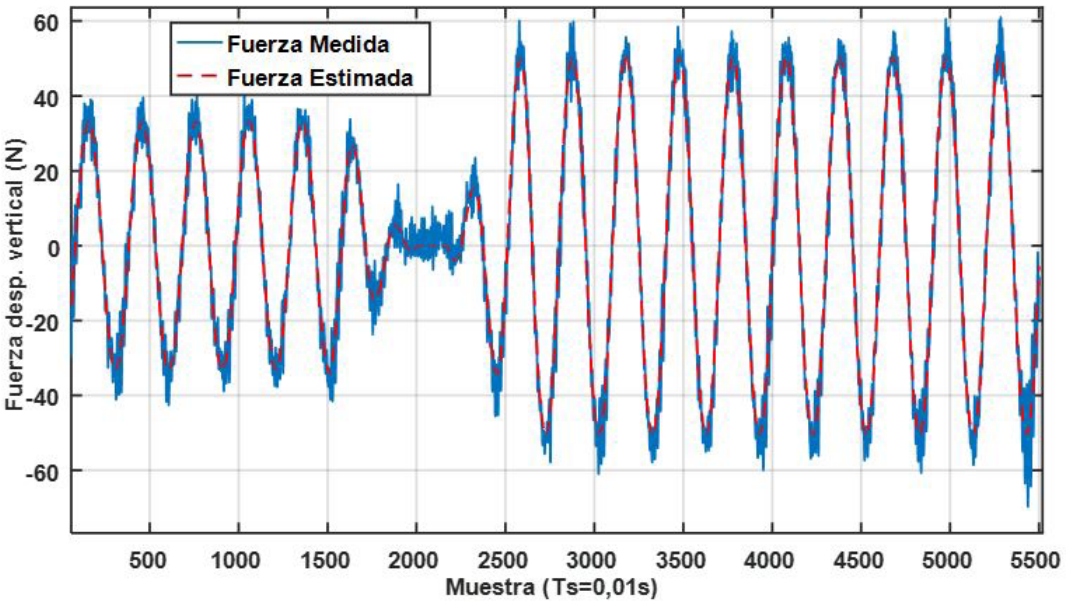


Figura 4. Diagrama de bloques del método de inferencia indirecta.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto la aplicación de técnicas de inferencia indirecta para la estimación de los coeficientes hidrodinámicos pertenecientes a un modelo de maniobra no lineal de un vehículo subacuático. Se ha realizado un estudio de la aplicación del método para la estimación de la fuerza de desplazamiento vertical del vehículo. Los resultados obtenidos con datos simulados indican valores bajos de sesgo y varianza de los parámetros estimados, inferiores al 1 %. Por otro lado, los resultados de validación del modelo con los datos adquiridos en el CEHIPAR muestran un buen ajuste con un valor de coeficiente de determinación cercano al 100 %. En posteriores investigaciones, se extenderá la aplicación de las técnicas de inferencia indirecta al modelo de maniobra no lineal completo de 6 grados de libertad.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por el programa SODERCAN/FEDER de la Universidad de Cantabria (Code: JU16).

Referencias

1. *Allingham, D.; Welsh, J. S.; Godoy, B. I. & Tusek, J. On the use of indirect inference in equivalent circuit parameter estimation of a synchronous machine 2009 Australasian Universities Power Engineering Conference, 2009, 1-5.*
2. *Garnier, H. & Wang, L. (Eds.) Identification of Continuous-Time Models From Sampled Data 1 Springer, 2008, 1-29.*

3. *Fossen, T.I. Guidance and control of ocean vehicles. En Libro; Editor, F., USA: Wiley; New York, 1994.*
4. *Ghysels E., Khalaf L., and C. Vodounou. Simulation based inference in moving average models. Annales d'Economie et de Statistique, 69:85–100, 2003.*
5. *Larsson, C. A.; Hjalmarsson, H. & Rojas, C. R. Identification of nonlinear systems using misspecified predictors 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2010, 7214-7219.*
6. *Ljung, L., 1987. System identification: theory for the user.*
7. *Yildiz, O. Yilmaz, A. and Gokalp, B. State-of-the-art system solutions for unmanned underwater vehicles. Radioengineering, 2009, pp.590–600.*
8. *Riola, J. La política de I+D en Defensa: Metas y retos tecnológicos. En Las Tecnologías de Doble Uso: La Investigación y el Desarrollo al Servicio de la Sociedad Civil y Militar. España: Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier, 2011, pp. 13-22.*
9. *Refsnes, J.E.; Sorensen, A.J. Design of control system of torpedo shaped ROV with experimental results. OCEANS '04. MTTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04, 2004, pp.264,270.*
10. *Revestido E., Velasco F.J., (2012) Two-Step Identification of Nonlinear Manoeuvring Models of Marine Vessels, Ocean Engineering, Volume 53, Pages 72-82.*
11. *Revestido Herrero Elías, Velasco Francisco J. and Riola Rodríguez J.M. (2018) Improving parameter estimation efficiency of a non linear manoeuvring model of an underwater vehicle based on model basin data, Applied Ocean Research 76, 125-138, doi: 10.1016/j.apor.2018.04.012.*
12. *Welsh, J. S.; Agüero, J. C. & Alamir, M. Continuous-Time System Identification Using Indirect Inference IFAC Proceedings Volumes, 2009, 42, 1169 – 1174.*

3f. Plataformas aeroespaciales

RPAS y la extinción nocturna de incendios forestales: «Proyecto NitroFirex»

Bordallo Álvarez, Luis María[1, *] / Burwitz Schwezoff, Alexander[2]

[1] Comandante (retirado) EA, Cuerpo General, EO, OA, Paseo Habana 82 (4.ºL), 28036 MADRID. Correo electrónico: luisbordallo@NitroFirex.com (LBA).

[2] Capitán EA, Cuerpo General, MO, Operaciones Aéreas, Juan Bautista Montenegro, 7, 28850 Torrejón de Ardóz, MADRID. Correo electrónico: alexander.burwitz@NitroFirex.com (AWS).

* Autor principal y responsable del trabajo: Luis M Bordallo Álvarez; correo electrónico: luisbordallo@NitroFirex.com (LBA)

Resumen

La madurez de las tecnologías para la guía y el control de RPAS permiten proponer innovadoras opciones operativas como la capacidad de rociar o espolvorear una cantidad significativa de agente en un punto preestablecido en la atmósfera. NitroFirex es un innovador proyecto que integra dos tecnologías de la industria de defensa, las de bombas guiadas/planeadas y la de RPAS desarrolladas en la actualidad de manera independiente, para integradas en un mismo vehículo aéreo no tripulado conseguir una capacidad única en todo el mundo como es la extinción de incendios forestales desde el aire por la noche.

Para solucionar las limitaciones de los medios aéreos actuales que no permiten la operación nocturna, NitroFirex aporta un novedoso concepto: depósitos planeadores autónomos (DPA) no tripulados que contienen el agente extintor que tras ser soltados, de uno en uno desde un helicóptero, colgados como «bamby» o lanzados, varios en secuencia, desde la rampa trasera de aviones de transporte, que actúan como aviones lanzadores (AL) se dirigen autónomamente al foco del incendio para descargar su contenido con gran precisión y con la misma capacidad de guía y planeo que una bomba guiada y recuperarse posteriormente, ya vacío como un RPAS, la base de operación de los ALs a 500 pies o inferior, propulsado por un pequeño motor reactor, con el fin de ser reutilizado lo antes posible.

Las tecnologías necesarias para la integración propuesta están desarrolladas, disponibles y madura y supone una importante reducción de costes en la fase de I+D, y en las posteriores de producción y operación.

Los DPA de NitroFirex pueden también ser empleados en aplicaciones militares para la suelta de bombas de caída libre, para enfriar el reactor una emergencia atómica, para dispersar el antídoto en caso de ataque terrorista químico o biológico, para la fumigación nocturna de plantaciones de droga.

Palabras clave

Grandes incendios forestales, extinción nocturna, aviones lanzadores (AL), depósitos planeadores autónomos (DPA), AIRBUS, DARPA.

1. Introducción

Puede que sea el controvertido cambio climático o puede que sea la presión humana sobre el entorno natural o por ambos a la vez, pero lo cierto es que año tras año alarmantes noticias sobre devastadores incendios forestales acaparan los medios informativos. Los pasados veranos pudimos ver cómo catastróficos incendios forestales asolaban EE. UU., Portugal, Chile o Australia, y especialmente en España, en temporadas anteriores fueron Rusia, Indonesia, Bolivia, Israel, California, Canadá o Grecia las que soportaban impotentes la devastación de su patrimonio natural y por desgracia en los años venideros es más que probable que sigamos sufriendo esta moderna plaga que asola nuestros bosques.

Ante esta amarga realidad hay que preguntarse si tanto a nivel político como económico y técnico se están aportando los recursos necesarios para solucionar o al menos paliar tanto desastre. Por desgracia no cabe otra respuesta que una rotundamente negativa.

Según estimaciones del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) los incendios forestales suponen entre un 14 y un 20 % de todo el CO_2 proyectado a la atmósfera anualmente, en cambio toda la actividad de la aviación comercial a nivel mundial significa un 2 % de todas las emisiones. Pues bien, se está invirtiendo una gran cantidad de recursos políticos, económicos y científicos para reducir del 2 % al 1 % las emisiones de CO_2 que implica la actividad aérea comercial.

Un ejemplo de ello es el proyecto europeo *CLEAN SKY 2*, con un presupuesto estimado en 4.000 M€ y que trata de conseguir este objetivo obteniendo una mayor eficiencia de los motores, con el empleo de biocombustibles, con alas inteligentes, reduciendo el de peso de los aviones, etc. y paradójicamente se realiza muy poco esfuerzo tecnológico en evitar o reducir ese 14-20 % de emisiones que implican los incendios forestales, sobre todo con los medios aéreos que son los más versátiles y eficaces.

¿Cómo con la inquietud social que causan, preocupación política que suscitan y las cuantiosas pérdidas económicas que generan los incendios forestales, se utilizan tan pocos recursos tecnológicos para combatirlos con la mayor eficacia operativa y eficiencia económica posible? ¿Cómo, por ejemplo, disponiendo de tecnologías que nos permiten literalmente «colar» por una ventana una bomba guiada, con 200 o 300 kg de explosivo, soltada por un caza a decenas de kilómetros (ver foto adjunta), no empleamos esa misma tecnología para «descargar», de noche 2.000 o 3.000 litros de agua sobre una masa forestal en llamas?, (ver foto).

Figura 1.

¿Cómo en un sector de la aeronáutica que mueve anualmente tantos miles de millones a nivel mundial se sigue utilizando una operación de alto riesgo para las tripulaciones con métodos, técnicas y procedimientos y desarrollados hace mas de 60 años? ¿Cómo no se integran tecnologías disponibles para desarrollar la capacidad de descargar sobre el incendio mas cantidad de agente extintor en menos tiempo, sin riesgo para las tripulaciones, a menor coste por litro lanzado pero sobre todo poder hacerlo de noche que es la gran carencia operativa de los medios aéreos actuales?

2. El concepto NitroFirex

La madurez de las tecnologías para el guiado y control de los sistemas aéreos no tripulados (RPAS) permite plantear innovadoras opciones operativas como es la capacidad «rociar» (un liquido) o esparcir (un sólido en polvo) una cantidad importante de agente en un punto programado de la atmosfera.

Es el caso de NitroFirex, un innovador proyecto español que integra tecnologías de la industria de defensa para alcanzar esta capacidad operativa que puede ser de aplicación en la lucha nocturna contra incendios forestales, para la fumigación nocturna de plantaciones de droga, para enfriamiento del reactor en una emergencia atómica, para la dispersión de antídoto en caso de un ataque terrorista químico o biológico, para activar fenómenos meteorológicos como sembrar nubes con yoduro de palta para provocar lluvia o evitar pedrisco.

De todas estas posibles aplicaciones, la extinción de incendios forestales es, debido al daño ecológico que ocasiona, a la alarma social que genera y a las pérdidas humanas y económicas que producen, la que el proyecto NitroFirex pretende desarrollar con máxima prioridad, sobre todo su empleo nocturno planteado como necesario complemento de los medios aéreos de lucha contra incendios diurnos.

La capacidad de transportar gran cantidad de carga útil (agente extintor en caso de los incendios forestales) a la zona de operaciones lo realizan aviones de transporte o helicópteros pesados/medios que estén diseñados para acarrear gran cantidad de carga de pago a gran velocidad y a un coste por unidad transportada muy inferior a un avión pequeño.

Lo que NitroFirex efectúa es transportar esa carga útil desde el helicóptero o avión de transporte al punto programado de suelta (rociado o espolvoreado) y posteriormente recupera el vehículo para su reutilización.

Por ello el concepto NitroFirex consiste en unos depósitos planeadores autónomos (DPA) no tripulados que contienen una cantidad de 2.500±250 litros de carga útil. Tras ser soltados, de uno en uno desde un helicóptero, colgados como «bamby» o lanzados, varios en secuencia, desde la rampa trasera de aviones de transporte, que actúan como avión lanzador (AL) se dirigen autónomamente al foco del incendio para descargar su contenido con gran precisión y recuperarse posteriormente a base mediante un pequeño motor a reacción (ver fotos adjuntas).

Figura 2.

Una vez efectuada la descarga del agente extintor sobre el incendio, estos depósitos son recuperados mediante una maniobra de «escape» de la zona de peligro aprovechando tanto su gran y repentina pér-

dida de peso como su velocidad remanente. Una vez realizada la maniobra de escape el DPA, ya vacío, se recupera propulsado con su reactor para retornar autónomamente a la base de operaciones del avión lanzador para ser reutilizado lo antes posible.

3. Proyecto NitroFirex

Aunque como citábamos en el párrafo anterior el concepto es de amplia aplicación, NitroFirex es un proyecto completamente innovador encaminado a la extinción de incendios forestales desde el aire por la noche.

Como veíamos, el elemento principal a emplear son DPA, lanzados a media cota, desde helicópteros medios o pesado como pueden ser los modelos H-225, H-215 H-175 de Airbus helicópteros, los B-412, B-214, B-212 de Bell, los S61, S65, S70 Sikorsky o los Kamov-32 entre otros o por la rampa trasera de la bodega de carga de aviones de transporte, como pueden ser los C-295, C-27J**,** C-130 Hércules, AN-12, KC-390, A-400M, IL-76, C-17 o incluso aviones con mayor capacidad de carga, que actúan como avión lanzador (AL). Estos depósitos conteniendo agente extintor, tienen capacidad de planeo y están dotados de un sistema de guiado (satélite, inercial e infrarrojos) para dirigirse de manera autónoma a la zona incendiada y descargar su contenido en el foco del incendio, de manera secuencial con gran precisión.

Figura 3.

Principalmente por seguridad y pero también por economía, los «depósitos planeadores» son recuperables. Una vez efectuada la «suelta» de su carga útil de agente extintor sobre el incendio, el DPA efectúa una maniobra de «escape» de la zona de peligro, finalizada la cual el depósito planeador vacío se transforma, gracias a la activación de un pequeño motor que lo propulsa, en un RPAS cuyo objetivo es recuperarse autónomamente a la base de operación del AL para ser reutilizado lo antes posible, esta recuperación se realiza de noche, a 500 pies, con el vuelo programado por zona no habitada y dotado con un paracaídas y airbag para que en caso de un fallo de motor o cualquier otra emergencias el DPA tenga asegurado un «aterrizaje blando» en lugar no programado.

En definitiva, el DPA vuela durante no más de 90 segundos desde el avión lanzador al punto de descarga sobre el incendio como una bomba guiada, con mas carga útil, mas superficie alar e igual capacidad de planeo y guía, y como un RPAS que navega de noche, a 500 pies sobre el suelo y 70 km de velocidad, desde la finalización del «escape» a la toma de tierra.

Figura 4.

En modo alguno el proyecto NitroFirex pretende sustituir a los medios aéreos diurnos, que han demostrado su eficacia durante décadas, sino ser su complemento nocturno para conseguir que el combate contra los incendios forestales desde el aire sea H-24 (*non stop fighting*) y aprovechar, como muy bien saben las esforzadas tripulaciones que a ello se dedican, las mejores condiciones meteorológicas que ofrece la noche para la extinción nocturna.

En los gráficos adjuntos se puede analizar las ventajas que tanto desde el punto de vista operativo (litros lanzados por hora de operación) como económico (litros lanzados por hora de vuelo y coste el litro lanzado) y según los tipos de AL utilizados aporta el desarrollo del concepto NitroFirex (gráficos n.º 1, 2 y 3).

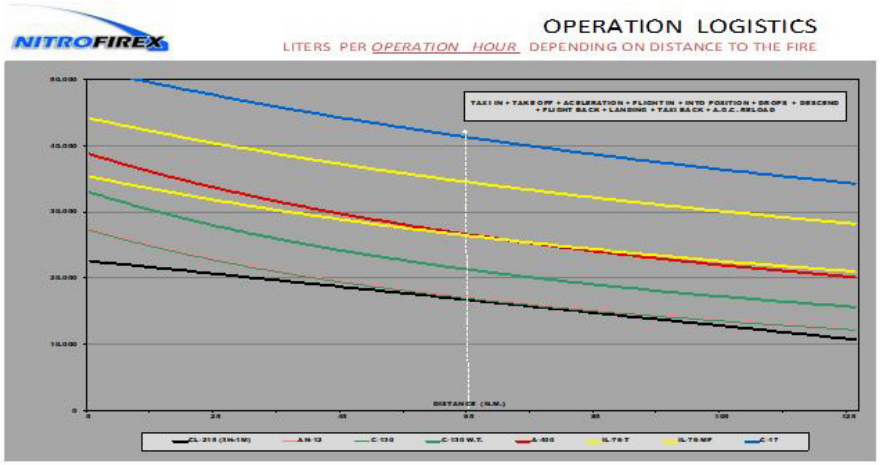


Figura 5. Gráfico n.º 1.

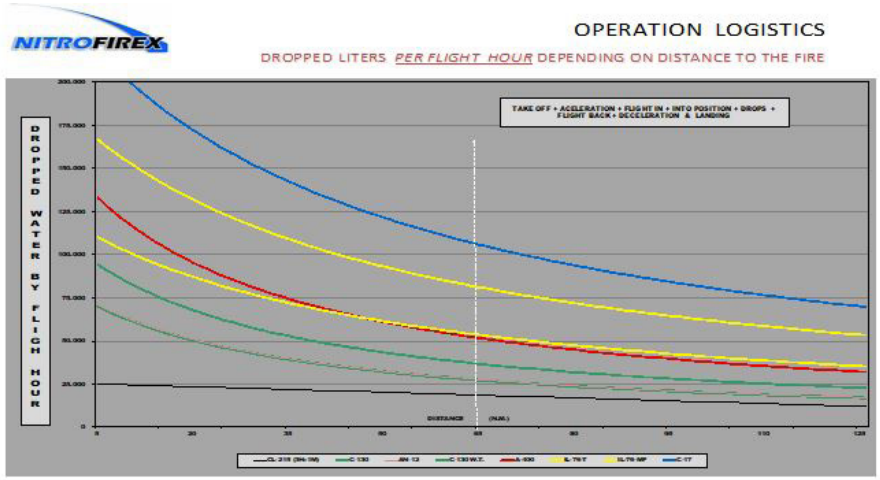


Figura 6. Gráfico n.º 2.

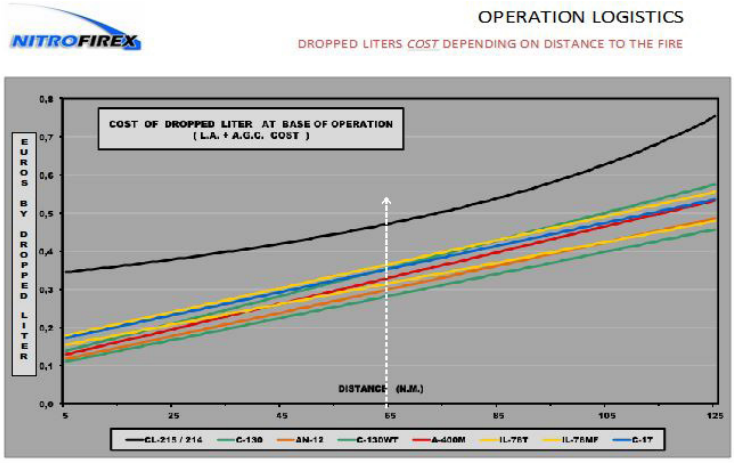


Figura 7. Gráfico n.º 3.

4. La industria aeronáutica y el proyecto Nitrofirex

En el incipiente y prometedor mundo de la aviación no tripulada, tanto las empresas aeronáuticas como los diferentes gobiernos y organismos procuran tomar posiciones con objeto de estar bien situados en la apasionante carrera por el futuro mercado, civil y militar, que las múltiples aplicaciones de los RPAS pueden aportar.

La Agencia Espacial Europea EASA ha establecido directrices para la regulación de la operación de los RPAS estableciendo como criterio «los riesgos específicos de la operación», estableciendo las categorías abierta, específica y certificada, siendo los DPA de NitroFirex por su peso, perfil de vuelo y riesgos de la operación un claro exponente de la «categoría específica».

El mercado de los RPAS de categoría abierta está realmente saturado, encontrándose en el mercado ingente cantidad de modelos y cientos de posibles aplicaciones. Por todo lo anterior el planteamiento debe ser el de buscar proyectos que planteen su operación dentro la categoría «específica» que es donde realmente a corto y medio plazo va a estar el negocio de la aviación no tripulada y que servirá de puente para el desarrollo, a largo plazo, de la categoría final «certificada».

La confirmación de la viabilidad del concepto operativo patentado por NitroFirex hace años se puede ver el siguiente vídeo comparativo: https://www.dropbox.com/s/5r89j1lc9u3mwkz/VIDEO%20COMPARTIVO-2%20copia.mp4?dl= 0. Este vídeo está confeccionado con las secuencias clave del vídeo NitroFirex, publicado en 2012 (https://www.youtube.com/watch?v=MTOjTWSHR64&feature=youtu.be.) y los vídeos publicados por Airbus en 2017 (https://www.youtube.com/watch?v=qCL1e1MJtSw&feature=youtu.be) y por DARPA, en 2015 (www.youtube.com/watch?v=df__CjHECws).

Como se puede ver, AIRBUS, con su programa *Future Air Power*, y DARPA en su programa Gremlins, asignado para ser desarrollado por Boeing y General Atomics, ambos desarrollan el concepto operacional patentado por NitroFirex pero solo para aplicaciones militares.

Si el concepto operativo patentado por NitroFirex puede desarrollarse para aplicaciones militares descargando armamento, ¿por qué no puede desarrollarse para necesaria y urgente aplicación civil como es la extinción aérea nocturna de incendios forestales, descargando agente extintor?

El desarrollo de «tecnologías duales» que se pueden usar indistintamente para aplicaciones militares y civiles es una realidad en el mundo de hoy. Por lo tanto, teniendo en cuenta el potencial tecnológico que representan las empresas y organismos mencionados anteriormente, es difícil justificar ante los responsables gubernamentales implicados en la extinción de incendios forestales, ante los medios de comunicación y ante la sociedad civil en general que la idea patentada por NitroFirex hace años para aplicaciones civiles, solo se proyecta su desarrollo para fines estrictamente militares.

Además, como se mencionó anteriormente, el innovador drone patentado por NitroFirex puede ser utilizado para otras aplicaciones como son la fumigación nocturna de plantaciones de drogas, la dispersión

de un antídoto en caso de un ataque terrorista químico o biológico, el enfriamiento del reactor en una emergencia atómica, la activación de fenómenos meteorológicos como sembrar nubes con yoduro de palta para provocar lluvia o evitar pedrisco, la fumigación o siembra en lugares inaccesibles o remotos, la ayuda humanitaria en lugares de conflicto y por supuesto para empleo puramente militar con solo cambiar el tipo de carga útil transportada a bordo del los DPAS, ya sean agentes líquidos, agentes solidos en polvo, pequeños paquetes de ayuda humanitaria o armamento convencional, bombas de caída libre o guiadas, misiles, etc.

5. Conclusiones

Cuando tanto a nivel político como social y económico, la ecología es un tema candente en todas su vertientes (cambio climático, emisiones de CO2, desforestación, etc.), carece de sentido que, en pleno siglo XXI, con las tecnologías que hay disponibles no nos hayamos preocupado de integrarlas para poder combatir los incendios forestales por la noche.

Hace casi cincuenta años que el hombre puso el pie en la Luna, en la actualidad se dispone de tecnología para envía enviar a Marte un vehículo de exploración no tripulado para operar mas de seis años de manera automática, se tiene capacidad para construir aviones de transporte de pasajeros como el Airbus 380, cazas como el Eurofighter o trasporte militares como el A-400, pero de noche se nos queman los bosque porque no hemos integrado las tecnologías disponibles y se carece de la capacidad técnica para poder operar desde el aire. ¡¡¡Algo debemos estar haciendo mal!!!

Para hacernos una idea de las cifras que se barajan en la extinción de incendios, mencionaremos que solo en los países en los que NitroFirex está patentado (Europa, USA, Canadá, Australia y Federación Rusa) se queman al año una superficie media cercana a los 10 millones de hectáreas, lo que a su vez representa menos del 10 % de todo lo que se quema en el mundo, solo el 1,8 % de estos 10 millones hectáreas es la superficie que se pierde en España de media anualmente.

Entre pérdidas y gastos los incendios forestales suponen, al año de media para España, bastante más de 300 millones de euros. Si el 1,8 % de la superficie calcinada requieren estos gastos de millones, ¿cuantos millones se gastan anualmente solo en los países occidentales en los que NitroFirex esta patentado, 8.000 o 10.000 M€ siendo conservadores?

Con la ingente cantidad de recursos económicos y humanos que las flotas de extinción mueven a nivel mundial, no deja de ser una paradoja que la industria aeronáutica no se haya planteado invertir para modernizar la operación la extinción de incendios forestales además de evitar riesgos a las tripulaciones que lo realizan. Las tecnologías están desarrolladas, maduras y disponibles desde hace tiempo, solo hay que conseguir su integración para el objetivo que nos atañe y preocupa.

El empleo de DPA autónomamente guiados, como los propuestos en el proyecto NitroFirex, permiten la operación nocturna desde el aire en la extinción de incendios forestales, eliminando los riesgos para las tripulaciones y aumentando la precisión y concentración de las descargas, además de incrementar la cantidad de agua lanzada tanto por hora de operación como por hora de vuelo así como abaratar el coste del «litro lanzado» con respecto a los medios aéreos de empleo diurno.

Además, al ser los aviones y helicópteros de transporte «no exclusivos», que pueden seguir volando el resto del año una vez concluida la campaña estival de incendios forestales, permite disminuir en gran medida el coste final por hora de vuelo realizada (un aeronave, dos misiones) tanto en las realizadas en tareas de extinción de incendios así como en las efectuadas como transporte (amortización, mantenimiento, abastecimiento, personal, etc.).

El debate acerca de los medios aéreos para la extinción de incendios no debería ser si avión o helicóptero, anfibio avión terrestre, monomotor, bimotor o gran poli-motor, el debate debería ser si estamos utilizando los medios tecnológicos apropiados para combatir adecuadamente los incendios forestales desde el aire o no.

O integramos las tecnologías modernas disponibles para desarrollar la capacidad operativa de descargar más cantidad de agente extintor en menos tiempo sobre el incendio forestal y poder hacerlo durante las

24 horas del día y hacerlo de manera más segura y económica que los medios aéreos diurnos actuales o nuestros bosques se calcinarán irremediablemente. NitroFirex debe plantearse como el complemento nocturno a los medios aéreos de extinción convencionales para conseguir que el combate contra los incendios forestales desde el aire sea H-24: *non stop fighting*.

De qué vale operar importantes medios aéreos durante el día si por la noche el fuego continúa progresando sin control y a la mañana siguiente han de iniciar de nuevo la operación. La gran carencia de los medios aéreos de lucha contra incendios forestales es la capacidad de operación nocturna y su desarrollo es donde deben concentrarse los esfuerzos de las agencias responsables, así como de los operadores y las compañías aeronáuticas.

Si lo comparamos con todos los demás sectores de la aviación donde las innovaciones han sido realmente significativas durante las últimas décadas, paradójicamente en el sector de la lucha aérea contra incendios no se han implementado tecnologías aeronáuticas modernas hasta la fecha.

Estamos utilizando técnicas y procedimientos desarrollados hace unos 70 años en una operación exclusivamente diurna y de alto riesgo para las tripulaciones y cada día es más claro que estos métodos son insuficientes para combatir los catastróficos incendios que, debido al cambio climático, destruyen los bosques de medio mundo. Es necesario enfatizar que debemos asumir que estamos usando armas obsoletas contra un enemigo cada día más potente y estamos perdiendo la batalla.

Los grandes incendios, los destructivos son los que duran un día, una noche y a la mañana siguiente están fuera de control, por ello la prioridad debe ser desarrollar la capacidad operativa de extinción de incendios forestales aéreos de la primera noche y este es el objetivo principal de NitroFirex. Esta capacidad operativa solo puede lograrse mediante el desarrollo de un innovador RPAS «específico» como el ya patentado por Nitrofirex.

Siendo el mencionado desarrollo un claro ejemplo de «tecnología dual» ya que, como veíamos en el epígrafe anterior, los DPA de Nitrofirex pueden ser utilizados, además de para la extinción nocturna de incendios forestales, en diferentes empleos civiles así como en su empleo estrictamente militar.

El vuelo en formación de CubeSats y sus aplicaciones en Defensa

Alonso, Gustavo[1], Cubas, Javier[1,*], Pérez-Grande, Isabel[1] y Sanz-Andrés, Ángel[1]

[1] Instituto Universitario de Microgravedad Ignacio Da Riva, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio, Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM), Plaza Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid.

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: javier.cubas@upm.es

Resumen

El CubeSat se ha convertido en un concepto cada vez más extendido en diversos tipos de misiones espaciales debido a la estandarización, el diseño relativamente sencillo y su bajo coste, haciendo el espacio más accesible y poniéndolo al alcance de prácticamente cualquiera. Sin embargo, las limitaciones de espacio, peso y potencia del concepto podrían considerarse como un obstáculo para la calidad de las aplicaciones que se llevan a cabo en estas misiones.

Misiones recientes como CanX-4 y 5 han demostrado que los CubeSats ya tienen la tecnología necesaria para llevar a cabo el vuelo de formación. El vuelo en formación de varios de estos CubeSats multiplica las posibilidades de realizar misiones complejas con estos pequeños satélites. En primer lugar, permite la distribución de equipos entre varios satélites cercanos (por ejemplo, colocando comunicaciones o procesando datos en solo uno de los satélites). También es posible usar el vuelo en formación para construir «grandes estructuras móviles» en órbita. La misión CANYVAL-X de la NASA está diseñada para demostrar cómo dos pequeños satélites en formación se pueden usar como un único telescopio grande. Finalmente, es posible usar satélites pequeños junto con un gran instrumento científico. El CubeSat viajaría como un *piggyback* al lado de la nave principal y podría desplegarse una vez en órbita, pudiendo utilizarse, por ejemplo, como calibrador para los instrumentos de la nave principal, obteniendo así mediciones más precisas. Además, el pequeño peso y costo de los CubeSats les permitiría agregarse a la misión principal sin tener un gran impacto, y se pueden concebir como mejoras científicas de la misión principal sin ponerla en peligro.

En esta ponencia, presentamos las posibilidades del vuelo en formación de CubeSats en aplicaciones de interés para la defensa y la seguridad y algunos conceptos de misión en los que estamos trabajando.

Palabras clave

Espacio, CubeSats, vuelo en formación, comunicaciones, observación.

1. Introducción

El CubeSat es un estándar de diseño de pequeños satélites (unidades de 10×10×10 cm, lo que se conoce por 1U) desarrollado por la Universidad de Stanford en 1999. El sistema está pensado para ser fácilmente escalable (a través de la unión de varias unidades) y ha tenido una gran difusión desde su creación. Inicialmente concebido con fines académicos, el estándar es cada vez más utilizado con fines comerciales o científicos. El éxito de la tecnología CubeSat es debido a su estandarización y popularidad, lo que ha permitido reducir los costes de desarrollo de un satélite hasta estar al alcance de una gran cantidad de potenciales usuarios. La tecnología CubeSat evoluciona muy rápidamente, lo que hace unos años era impensable hacer con satélites de unos pocos kilos ahora está al alcance de cualquier CubeSat. Esto se debe a los grandes avances en miniaturización de procesadores y sensores. Así como las drásticas reducciones en consumo de potencia de la electrónica y las mejores capacidades de las baterías. El aumento del interés en este tipo de satélites también ha propiciado la aparición de un mayor número de empresas fabricantes y con ello una rápida reducción de costes.

La capacidad de medir el posicionamiento entre CubeSats es un limitante para el vuelo en formación de los mismos. Los satélites deben ser capaces de posicionarse entre sí con precisión. A ser posible de manera autónoma. La precisión en la medición de las distancias relativas era hasta ahora un problema para desarrollar misiones complejas y con requerimientos de colocación precisos. Esto incluye telescopios o antenas modulares. Sin embargo, misiones como la CanX-4 (sección 1.1) han demostrado que la tecnología actual es capaz de medir las distancias entre satélites con precisiones de centímetros a un coste relativamente bajo. La misión CanX-4 [1] refina las señales de GPS para medir las distancias relativas entre los satélites. Desde el punto de vista de la defensa, la dependencia de las señales de GPS no es deseable, ya que se trata de una señal cuya gestión es externa y que puede ser comprometida y/o degradada. Una alternativa posible sería el empleo de la señal de la constelación Galileo. Hasta hace pocos años estas hubiesen sido las únicas alternativas viables para la medición de distancias en el vuelo en formación de satélites, sin embargo, en la actualidad ya existen sistemas comerciales mediante radio frecuencia (RF) que serían capaces de suplir la dependencia de las señales GPS; convirtiendo un pequeño grupo de CubeSats equipado con transpondedores, en una formación de satélites capaz de auto-alinearse de manera independiente y sin necesidad de señales externas. Esta tecnología puede obtenerse comercialmente, un ejemplo es el sistema *Swift RelNav de Tethers Unlimited* [2]. Este instrumento (que ocupa menos de una unidad de CubeSat) es capaz de determinar las distancias y posiciones relativas entre los CubeSats de una constelación, a distancias de varios kilómetros con precisiones de 0,1 m y menos de 1 grado; al mismo tiempo que proporciona comunicaciones entre los satélites.

Otro problema que se puede presentar en el vuelo en formación de los CubeSats es la precisión en las maniobras orbitales. Las correcciones y cambio de órbitas de los satélites son una actividad frecuente entre los satélites actuales. Se realizan principalmente con *thrusters* o propulsores de muy variadas tecnologías. Pueden ser químicos, iónicos o simplemente de gas frío a presión. Sin embargo, para correcciones orbitales la precisión requerida no es tan alta como en el caso del vuelo en formación. Y las necesidades de colocación no suelen estar en el margen de los centímetros. Hasta hace unos pocos años

la miniaturización de los *thrusters* era un problema pendiente para llevar a cabo un vuelo en formación de CubeSats exitoso y preciso. Las tecnologías existentes de muy bajo impulso, como los motores iónicos, eran demasiado pesadas o consumían demasiada potencia como para ser incluidas en un CubeSat. Actualmente existen varias alternativas capaces de proporcionar impulsos del orden de mN o incluso µN de manera controlada y precisa. Entre ellas se pueden mencionar los motores de gas frío como NanoProp de GomSpace [3] o el motor iónico IFM Nano Thruster de Enpulsion [4], ambos ejemplos reseñables por ser tecnologías maduras que ya se encuentran a la venta.

Los avances en miniaturización y precisión que se han conseguido controles de actitud son similares. Es especialmente relevante la reducción de tamaño y costes de los *star-trackers* [5], que finalmente permiten que los pequeños satélites puedan alcanzar precisiones de segundos de arco en la determinación de la orientación. También han sido importantes, como se mencionaba anteriormente, los avances en microprocesadores, baterías y consumos de la electrónica. Todo esto ha llevado a que por primera vez y desde hace escaso tiempo, sea posible hablar del vuelo en formación de CubeSats como una posibilidad real a la hora de planificar una misión.

2. Vuelo en formación de CubeSats, algunos ejemplos

En los próximos años se espera que esta rápida evolución siga su curso, y las capacidades de los CubeSats seguirán aumentando. Sin embargo, para situarnos, conviene hacer un breve resumen sobre lo que ya son capaces de hacer los CubeSats en cuanto a vuelo en formación. En este apartado se presentan algunas misiones, propuestas o en desarrollo, que demuestran que la tecnología actual ya está lista para el vuelo en formación de pequeños satélites.

2.1. CanX 4-5

La misión CanX 4-5 [1] (figura 1) llevada a cabo por el Instituto de Estudios Aeroespaciales de la Universidad de Toronto, Canadá. Es una misión de demostración tecnológica compuesta por dos CubeSats de 8 unidades cada uno. Con esta misión se pretendía mostrar las capacidades tecnológicas de los CubeSats y demostrar que el vuelo en formación es posible de una manera práctica. Los satélites determinaban su posición, tanto general como relativa, a través de la señal GPS y técnicas diferenciales. El control de posición se llevaba a cabo con *micro-thusters* de gas frío (SF_6) capaces de dar impulsos de entre 12,5 y 50 mN. Finalmente, las comunicaciones entre satélites se realizaban en banda S. Entre los objetivos de la misión estaban demostrar el mantenimiento autónomo de formaciones de vuelo desde los 50 a los 1.000 metros; demostrar que es posible determinar la posición con un error de menos de 10 cm y controlarla con errores por debajo del metro; demostrar el funcionamiento de las comunicaciones y los algoritmos de vuelo.

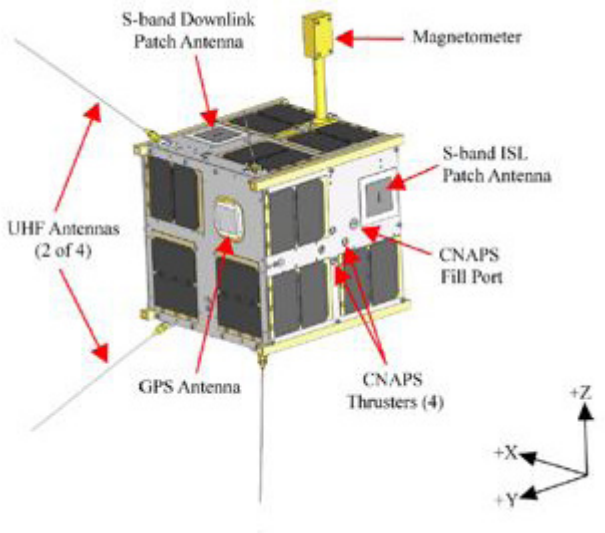


Figura 1. El satélite canadiense CanX-4 (el CanX-5 es idéntico) [1].

La misión fue lanzada en 2014 y tras solo cuatro meses se consideró que se habían cumplido los objetivos propuestos. En concreto, se consiguió mantener la formación en varias posiciones y con errores inferiores al metro [6]. La misión CanX 4-5 fue una misión histórica que sigue siendo un hito y estando a la vanguardia del vuelo en formación de satélites.

2.2. CANYVAL-X

La misión CANYVAL-X es una misión de demostración cuyo objetivo es conseguir el alineamiento de dos satélites a lo largo de una línea de visión inercial con un objetivo celeste distante. Está compuesta por dos pequeños CubeSats de solo una y dos unidades. El alineamiento debe ser estable y lo suficientemente preciso durante el tiempo suficiente para realizar una medición científica [7]. Aunque la misión no observará directamente el sol, demostrará que la tecnología necesaria para construir un telescopio virtual está disponible. Para la misión es imprescindible la determinación precisa de la posición relativa (menos de 10 centímetros), el control orbital preciso (menos de un metro) y las comunicaciones inter-satélite.

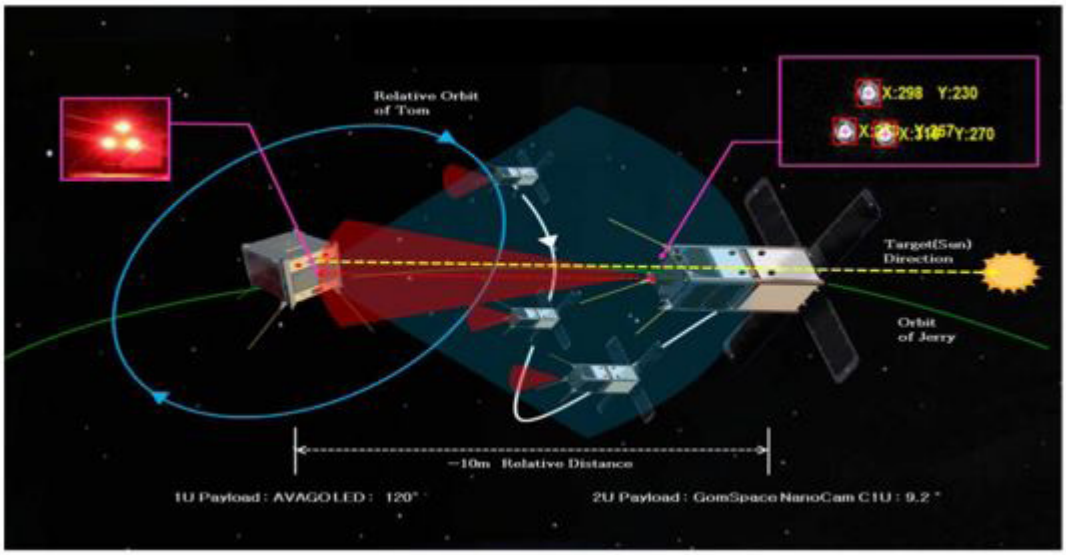


Figura 2. Concepto de misión CANYVAL-X [7].

La misión fue lanzada en enero de 2018, y aunque aún no ha completado sus objetivos debido a diversos fallos en el sistema de comunicaciones [8] demuestra que las tecnologías necesarias para el vuelo en formación de satélites tan pequeños como 1U están disponibles.

2.3. SULFRO

La propuesta de misión SULFRO (*Space Ultra-Low Frequency Radio Observatory*) [9] (figura 3) es un concepto desarrollado por la Academia China de Ciencias en Shanghai (CAS) para posicionar un red de 13 satélites: uno principal más 12 pequeños CubeSats de 3U. Los 12 satélites formarían una red de 4×3 satélites en un área de 30 km de lado convirtiéndose en una gran antena en la banda de los 3-100 MHz. Este complejo estaría situado en el punto de Lagrange L2 en una órbita de Lissajous y se dedicaría a la radio-observación con fines científicos. El estudio, desarrollado como propuesta para una posible colaboración entre la CAS y la ESA, concluyó que las tecnologías clave de vuelo en formación, comunicación inter-satelital, micro-propulsión, etc; ya estaban disponibles.

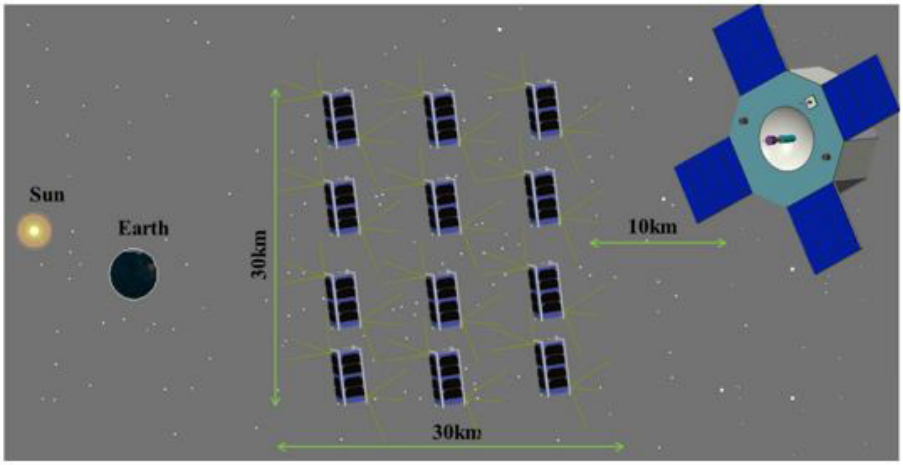


Figura 3. Concepto de misión SULFRO [9].

2.4. Misiones en la UPM

En IDR/UPM, sucesor del Laboratorio de Aerodinámica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, se trabaja desde 1975 en proyectos relativos al control térmico de satélites, diseño estructural de satélites e instrumentos y el desarrollo de sus propios micro-satélites (hasta 100 kg). Dentro de esta última categoría cabe remarcar el lanzamiento del UPM-Sat 1 llevado a cabo en 1995, siendo el primer satélite universitario español. Actualmente se están ultimando los detalles de la misión UPM-Sat 2 [10], un segundo micro-satélite de menos de 50 kg de masa y dimensiones totales inferiores a 0,5 m x 0,5 m x 0,6 m que servirá para la demostración en órbita de un control de actitud novedoso [11] y varios instrumentos.

Desde 2011, el IDR/UPM ha venido desarrollado una sala de diseño concurrente, CDF por sus siglas en inglés con ayuda de la ESA. El diseño concurrente facilita el diseño conceptual de misiones y permite reducir el tiempo y coste de la planificación de las mismas [12]. Aprovechando estas nuevas instalaciones el IDR recientemente ha empezado una colaboración el Instituto de Física de Cantabria (IFCA) para analizar la viabilidad de emplear un CubeSat como instrumento de calibración de LiteBird [13] un gran telescopio que se colocará en L2 para explorar el fondo de microondas.

El satélite de calibración o CalSat (figura 4), sería un pequeño CubeSat de 6 unidades que permitiría recalibrar los sensores del telescopio una vez al mes a través de señales de microondas bien conocidas. El CalSat se lanzaría acoplado al satélite principal, para posteriormente separarse y situarse a 270 m del LiteBird. Las precisiones esperadas son de unos pocos metros para la posición y de varios centímetros para la determinación de distancia. El CalSat está siendo diseñado para ser lo más autónomo posible, de tal manera que apenas influya en la operación del telescopio. Las conclusiones del diseño preliminar de esta misión (fruto de varias sesiones de CDF que aseguran que los diseños de todos los subsistemas del satélite son compatibles) son que la tecnología ya está lo suficientemente madura como para que una misión de estas características no dependa de tecnologías conceptuales o no probadas en órbita.

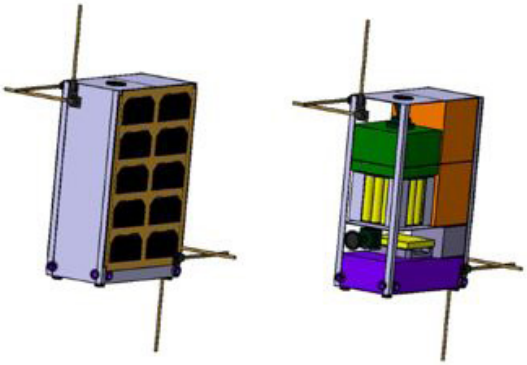


Figura 4. Diseño conceptual del CalSat para LiteBird fruto del prediseño en la CDF del IDR.

3. Posibles aplicaciones en la estrategia de defensa

En el apartado anterior se han presentado diversos ejemplos de misiones de vuelo en formación en los que se utilizan CubeSats. Estas misiones nos proporcionan una idea de las capacidades actuales de este tipo de satélites, y también nos muestran la variedad de aplicaciones que podrían tener. A continuación, se presentan algunas propuestas de aplicación y ventajas del uso de formaciones de CubeSats desde el punto de vista de la defensa.

La misión CANYVAL-X presenta un concepto muy interesante para la aplicación del vuelo en formación: los telescopios virtuales. Los telescopios ópticos suelen estar limitados por distancias focales, aperturas y resolución. Limitaciones que se desvanecerían gracias al vuelo en formación. La versatilidad también aumentaría, ya que sería posible modificar las distancias focales o la apertura de las observaciones en unos rangos mucho mayores. La posibilidad de utilizar *arrays* de telescopios no es nueva, sino que viene siendo considerada desde hace muchos años como estrategia para mejorar la resolución de las observaciones (un ejemplo es la propuesta de telescopio para detectar exoplanetas Darwin [14] que data del año 2000) sin embargo, ahora cuando el desarrollo de la tecnología permite planificar estos telescopios de una manera mucho más barata, realista y con un único lanzamiento.

Aunque el proyecto SULFRO es un concepto desarrollado para el estudio científico, puede ser presentado como ejemplo de las posibilidades de que ofrece el vuelo en formación de pequeños satélites para la recepción y transmisión de comunicaciones. Al distribuir los elementos de una antena entre varios satélites volando en formación, desaparecen las limitaciones estructurales al tamaño de la antena. Ofreciendo posibilidades para *arrays* de antenas o aperturas sintéticas ilimitadas para comunicaciones o radar. Lo cual permitiría aumentar la precisión o explorar anchos de banda no accesibles desde satélites normales. La distribución de antenas también puede reducir las interferencias entre ellas, mejorar su multi-direccionalidad o separar las instrumentaciones por distintos anchos de banda.

En el apartado anterior se ha presentado el prediseño de la misión CalSat, un pequeño CubeSat de calibración para un gran telescopio en L2 que además está diseñado para ser autónomo e impactar lo menos posible sobre la misión principal. Este tipo de misiones sirve para ilustrar las posibilidades del vuelo en formación de CubeSats en cuanto a ampliación y actualización de funciones. Un pequeño CubeSat puede diseñarse para soltarse desde el mismo lanzador y mantenerse cerca del satélite principal para llevar a cabo tareas complementarias o no esenciales, que potencien e incrementen las capacidades del satélite principal. Al tratarse de un satélite independiente, barato y fácil de llevar, los instrumentos a bordo del CubeSat pueden ser experimentales y se pueden correr mayores riesgos sin poner en peligro la misión principal. O simplemente, pueden ser añadidos de última hora, mucho más sencillos de incluir por separado en el caso de una misión en un estado de desarrollo avanzado. Al incluir estos instrumentos en un pequeño CubeSat y no en una nueva misión, se reducen los costes, ya que se aprovechan las capacidades ya existentes de la misión principal (comunicaciones, capacidad de cálculo, sensores adicionales…). Llevando al límite esta filosofía podríamos hablar de «satélites fraccionados» [15] (figura 5), un concepto que consistiría en colocar cada subsistema y cada carga de pago de una misión en un satélite distinto. Esta aproximación nos permitiría actualizar y/o escalar cada uno de los subsistemas por separado y conforme a las nuevas necesidades y últimas tecnologías permitiendo ahorrar costes a través de la reutilización [16].

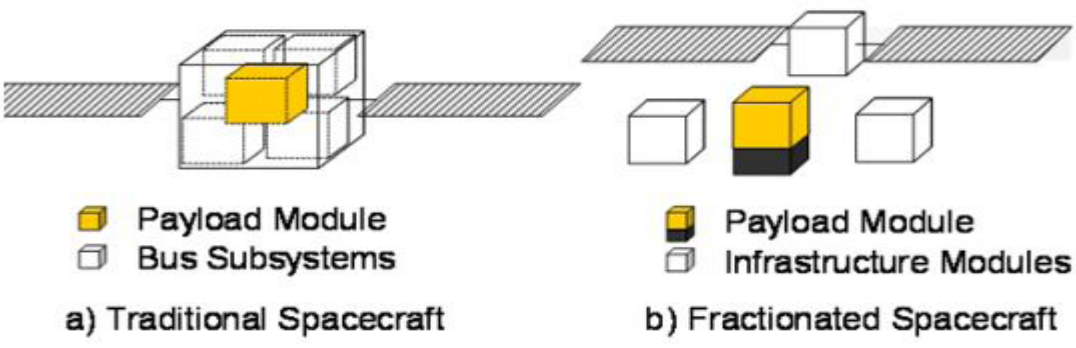


Figura 5. Concepto de satélite fraccionado. [15].

Una de las ventajas de los pequeños satélites es que son más fáciles de lanzar. Recientemente la India fue capaz de poner en órbita un total de 104 CubeSats en un único lanzamiento [17], demostrando que las posibilidades de colocar uno o varios CubeSats en órbita son elevadas. Por otro lado, actualmente existen multitud de proyectos de pequeños lanzadores, más o menos avanzados, que son capaces de poner pequeñas cargas en órbita. Estos lanzadores no serían adecuados para colocar los más avanzados satélites de uso militar cuyo peso supera las varias toneladas, pero sí podrían utilizarse para colocar pequeños satélites que volando en formación emulen las capacidades de un gran satélite. Existen incluso proyectos de lanzadores españoles como el ARION 2 de PDL Space, que, para el 2021, se espera sea capaz de colocar 150 kg en órbitas de 400 km con lanzamientos desde Huelva [18]. Por tanto, apostar por las misiones de CubeSats aportaría tanto versatilidad como autonomía.

Una consecuencia adicional a tener en cuenta sería la discreción. Las misiones de CubeSats son menos llamativas si las comparamos con una misión compuesta de un gran satélite. Esto se cumple en todas las fases del proyecto, desde el desarrollo a la detección en órbita, pasando por supuesto por la puesta en órbita. El pequeño tamaño de los CubeSats puede hacerlos más difíciles de localizar en órbita, y los hace pasar más desapercibidos en los lanzamientos, sobre todo si estos son multitudinarios. Cabe destacar como ejemplo el propio lanzamiento de 104 satélites mencionado anteriormente, en esta misión se produjo el lanzamiento no autorizado de 4 satélites llamados SpaceBee, saltándose todos los controles y a pesar de que había sido prohibido por la Comisión Federal de Comunicaciones estadounidense (FCC) [19].

Existe un concepto interesante sobre el vuelo en formación de pequeños satélites: el «enjambre de satélites» [20]. Esta idea lleva el concepto del vuelo en formación al extremo, proponiendo grupos de cientos de pequeños satélites con similares características y funciones distribuidas e intercambiables. Tanto la distribución como la inter-funcionalidad ofrecen múltiples ventajas de flexibilidad para la misión, haciendo que esta sea fácilmente adaptable, escalable, evolucionable y sostenible a lo largo del tiempo. También es importante la robustez que se le da al sistema, tanto en términos de confiabilidad como de tolerancia al fallo. Desde el punto de vista de la defensa también es muy importante el aumento de capacidad de supervivencia. Es mucho más complicado inutilizar un objetivo distribuido que uno compacto. Los enjambres de satélites serían más difíciles de inutilizar que un único satélite durante su normal operación, pero incluso podría utilizarse la dispersión activa ante amenaza como estrategia de defensa. Este concepto, no entraría dentro del estándar CubeSats (se propone que los satélites deberían ser de unos 100 gramos) nos puede servir de ejemplo para algunas de las ventajas del vuelo en formación de satélites derivadas de la distribución de funciones y el número. Algo, que a menor escala también se podría decir de una formación de una docena de CubeSats. Por otro lado, aunque la tecnología actual no está aún lista para este tipo de misiones, son un concepto a tener en cuenta que puede que comencemos a ver a lo largo de la próxima década.

Finalmente, pero no menos importante, como algunas de las principales ventajas de este tipo de misiones, estarían la reducción de costes y la rapidez de respuesta. Al tratarse de una tecnología estándar y de muy fácil lanzamiento tanto los costes como los plazos de desarrollo se reducirían en una cantidad considerable. Esto permitiría convertir a los CubeSats en una respuesta rápida y barata contra amenazas imprevistas.

4. Conclusiones

Por primera vez la tecnología para en vuelo en formación de pequeños satélites se encuentra lo suficientemente desarrollada como para permitir misiones complejas. Se abre la puerta a diseñar misiones modulares, aprovechando las ventajas que el vuelo en formación puede ofrecer a la estrategia de defensa. Las aplicaciones potenciales son diversas, pero en base a proyectos reales se considera que el uso del vuelo en formación tiene el potencial de incrementar las capacidades de observación y radioescucha de la Tierra. Estas ventajas incluyen la facilidad de lanzamiento incluyendo la posibilidad de lograr autonomía a corto plazo; la mayor discreción de planificación y operación; el aumento de la confiabilidad y supervivencia; y por supuesto, la reducción de costes para similares prestaciones.

Referencias

1. *Bonin, G., Roth, N., Armitage, S., Newman, J., Risi, B., and Zee, R. E., «CanX–4 and CanX–5 Precision Formation Flight: Mission Accomplished!», Proc. of the 29nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah: 2015, pp. 1–15.*
2. *Tethers Unlimited, «SWIFT™ RelNav». Available: www.tethers.com/SpecSheets/Brochure_SWIFT-RelNav.pdf*
3. *GomSpace, «NanoProp NanoProp CGP3». Available: https://gomspace.com/UserFiles/Subsystems/flyer/gomspace_nanoprop_3U_flyer.pdf.*
4. *ENPULSION, «IFM Nano Thruster». Available: www.enpulsion.com/uploads/products/IFM-Nano-Thruster/ENP_-_IFM_Nano_Thruster_-_Product_Overview.pdf*
5. *ADCOLE Maryland Aerospace, «MAI-SS Space Sextant». Available: www.cubesatshop.com/wp-content/uploads/2016/06/MAI-SS-Specification-10-11-17.pdf*
6. *Tion Flying Mission», Proceedings of Small Satellites Systems and Services-The 4S Symposium., 2016, pp. 1–15.*
7. *[Park, J., Park, S., Song, Y. B., Kim, G. N., Lee, K., Oh, H. J., et al, «CUBESAT DEVELOPMENT FOR CANYVAL-X MISSION», 2016, pp. 1–5. doi:10.2514/6.2016-2493.*
8. *Song, Y., Park, S., Lee, Y., and Park, J., «CANYVAL-X : Operational Scenario and Strategy», 2018, pp. 1–5. doi:10.2514/6.2018-2636.*
9. *Wu, S., Chen, W., Zhang, Y., Baan, W., and An, T., «SULFRO: a Swarm of Nano-/Micro-Satellite at SE L2 for Space Ultra-Low Frequency Radio Observatory», Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah: 2014.*
10. *Pindado, S., Roibas-millan, E., Garcia, A., Perez-grande, I., and Perez-alvarez, J., «The UPMSat-2 Satellite : An Academic Project within Aerospace Engineering Education», Athens Institute for Education and Research ATINER ATINER â€™ s Conference Paper Series, 2017, pp. 1–28.*
11. *Cubas, J., Farrahi, A., and Pindado, S., «Magnetic Attitude Control for Satellites in Polar or Sun-Synchronous Orbits», Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 38, 2015, pp. 1947–1958. doi:10.2514/1.G000751.*
12. *[oibás-millán, E., Sorribes-palmer, F., and Chimeno-manguán, M., «Acta Astronautica The MEOW lunar project for education and science based on concurrent engineering approach», Acta Astronautica, Vol. 148, 2018, pp. 111–120. doi:10.1016/j.actaastro.2018.04.047.*
13. *Matsumura, T., Akiba, Y., Borrill, J., Chinone, Y., Dobbs, M., Fuke, H., Ghribi, A., Hasegawa, M., Hattori, K., Hattori, M., and Hazumi, M., «Mission Design of LiteBIRD», Journal of Low Temperature Physics, 2014, pp. 733–740. doi:10.1007/s10909-013-0996-1.*
14. *[Fridlund, C. V. M., «Darwin – The Infrared Space Interferometry Mission», 2000, pp. 20–25.*
15. *Mathieu, C., and Weigel, A. L., «Assessing the Flexibility Provided by Fractionated Spacecraft», 2005, pp. 1–12.*
16. *Thales Alenia Space France, Operational Network of Individual Observation Nodes, 2016.*
17. *Barry, E., «India Launches 104 Satellites From a Single Rocket, Ramping Up a Space Race», New York Times, 2017.*
18. *[Torres, R., and Garcia, F., «PLD Space' Arion 2 micro-launcher; simplifying and improving the responsiveness in launch operations», 2018 SpaceOps Conference, Mairseille, France: 2018, pp. 1–14. doi:10.2514/6.2018-2467.*
19. *[Harris, M., «FCC Accuses Stealthy Startup of Launching Rogue Satellites», IEEE Spectrum, 2018.*
20. *Hadaegh, F. Y., Chung, S., Member, S., and Manohara, H. M., «On Development of 100-Gram-Class Spacecraft for Swarm Applications».*

Sistemas de amortiguación avanzada en trenes de aterrizaje

Ocaña Domínguez, Marta I.[1,*], Novillo Díaz, Eva[2]

1 Responsable del Área de Simulación y Análisis Fluido-Mecánico.

CESA S.A.U. (Compañía Española de Sistemas Aeronáuticos). Paseo John Lennon, 4. 28906 Getafe (Madrid). www.cesa.aero. Correo electrónico: marta.ocana@cesa.aero

2 Responsable del Área de Investigación, Desarrollo e Innovación.

CESA S.A.U. (Compañía Española de Sistemas Aeronáuticos). Paseo John Lennon, 4. 28906 Getafe (Madrid). www.cesa.aero. Correo electrónico: eva.novillo@cesa.aero

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: marta.ocana@cesa.aero

Resumen

El sistema de amortiguación de un tren de aterrizaje está diseñado fundamentalmente para la que podría considerarse como la condición más crítica en vuelo: el impacto en el aterrizaje. Sin embargo, este diseño suele penalizar la operación en pistas no pavimentadas o con alto grado de rugosidad. Mientras que para el impacto del aterrizaje se requiere un sistema capaz de absorber una enorme cantidad de energía de forma suave para minimizar el daño estructural, durante las fases en tierra, una amortiguación regulada en función de las características del terreno puede dotar al sistema de capacidades de operación adicionales, mejorando la estabilidad del avión y reduciendo las cargas transmitidas a la estructura.

CESA lleva trabajando más de diez años en el desarrollo de suspensiones semiactivas con los siguientes objetivos:

1. Disminuir tareas de mantenimiento e incrementar la vida estructural de los componentes.
2. Aumentar el porcentaje del peso de la carga de pago frente al total de la aeronave al despegue.
3. Aumentar la capacidad de la aeronave para operar en pistas no preparadas, así como el confort de la carga de pago, optimizando la capacidad de amortiguación para cada condición de operación de la aeronave en tierra.

Dos prototipos de amortiguador magneto-reológico, uno para tren de morro de UAV y otro para tren de morro de un avión de transporte táctico, han sido fabricados y ensayados con el fin de realizar un estudio comparativo entre las actuaciones obtenidas con esta tecnología y con la oleo-neumática convencional. La integración de esta tecnología en una plataforma ya existente supone un reto pues tiene como objetivo impactar lo menos posible en la interfaz de la aeronave a fin de garantizar su futura integración en una aeronave real y poder realizar ensayos que permitan conseguir un TRL 6-7.

Palabras clave

Suspensión semiactiva, fluido magneto-reológico, optimización de las actuaciones en tierra de aeronaves.

1. Introducción

Las suspensiones basadas en fluidos magneto-reológicos adaptan su comportamiento al terreno específico de operación en tierra modificando las propiedades del fluido mediante la aplicación de un campo magnético. El control de estos sistemas puede ser activo (sincronizado con el perfil de pista mediante un sistema de recepción de señales mediante diferentes sensores) o semiactivo (modificado de forma discrata a voluntad por el operador del sistema sin vínculo directo con el perfil de terreno).

La sustitución de amortiguadores convencionales por amortiguadores basados en tecnología magneto-reológica comenzó hace aproximadamente treinta años, cuando coches de diferentes fabricantes comenzaron a integrarlos (i.e. Delphi MagneRide implementado en el Cadillac Seville STS, Chevrolet Corvette, Renault Megane, etc.). Por el contrario, su incorporación en trenes de aterrizaje de aeronaves es escasa debido a la penalización en peso, coste y fiabilidad que suponen con respecto a las tecnologías tradicionales. Sin embargo, la mejora de las actuaciones de la aeronave en tierra que supondría incluir esta clase de dispositivos en los componentes estructurales de absorción de energía hace que la investigación en este campo resulte rentable y prometedora.

CESA lleva trabajando más de 10 años en el desarrollo e integración de sistemas de suspensión semiactivos y activos en aeronaves con el objetivo de mejorar significativamente las actuaciones en tierra de las mismas.

2. Trabajos anteriores

En las referencias [1] y [2] pueden encontrarse la descripción completa así como las principales conclusiones extraídas de estos trabajos.

2.1. Caracterización del fluido magneto-reológico

Los fluidos magnéticos, descubiertos por Rabinow en 1948, se caracterizan por mostrar un incremento de su viscosidad cuando se ven sometidos a un campo magnético externo. Este fenómeno se debe a que las partículas magnéticas dispersas en el fluido portador se orientan en su seno formando cadenas en la dirección de las líneas de campo. La esencia de los fluidos magneto-reológicos está en la adecuada selección de sus dos componentes principales: las partículas magnéticas y el líquido portador de naturaleza orgánica combinado con aditivos que prevengan los efectos de agregación y coalescencia.

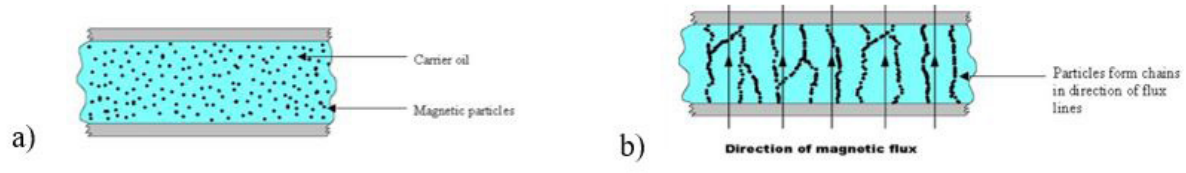


Figura 1. Comportamiento de los fluidos magneto-reológicos. a) No magnetizado. b) Magnetizado.

Aunque existen numerosos factores que influyen en las propiedades de estos fluidos, los más significativos para su aplicación aeronáutica son el grado de decantación, la capacidad de re-dispersión, el comportamiento a bajas temperaturas y la viscosidad en ausencia de campo. Para el estudio de la viabilidad de esta tecnología se vienen empleando modelos teóricos (fluidos *Bingham*, *Power-law*, etc.) que intentan reproducir el comportamiento del fluido con y sin campo magnético aplicado. Sin embargo, la base de datos disponible en la bibliografía es muy limitada por lo que la realización de ensayos de desarrollo en el soporte específico en el que se quiere incorporar esta tecnología resulta imprescindible. De este modo, previamente a la integración de esta tecnología en un amortiguador real, CESA realizó una caracterización exhaustiva del FMR. El fluido magneto-reológico LORD® 132DG fue seleccionado debido a su baja densidad y buena capacidad de magnetización. La geometría utilizada fue la VMR del UAV Atlante (ver Ref. [1]).

Los resultados de los ensayos realizados en dicha válvula reflejaron una amplia capacidad de amortiguación para regímenes de operación característicos de la fase de rodadura de la aeronave utilizando intensidades de alimentación pequeñas (menores a 1,3A), lo cual permitiría tener un excelente control de la aplicación. En particular, se obtuvo un aumento del 450 % en capacidad de amortiguación a temperatura ambiente en relación a la tecnología convencional.

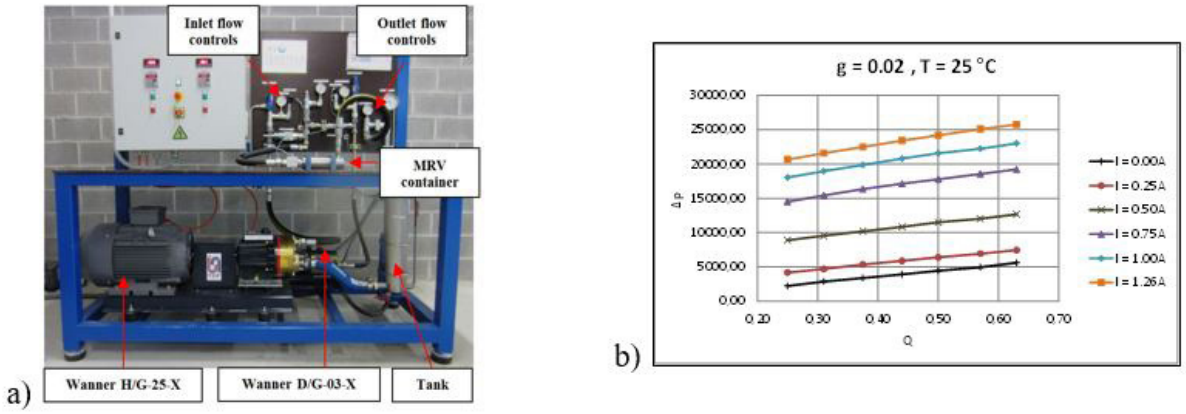


Figura 2. a) Banco de ensayos de caracterización del FMR en la VMR del UAV Atlante. b) Caracterización de válvula magneto-reológica.

A fin de determinar su viabilidad en una plataforma real, la misma caracterización fue realizada en un intervalo de temperatura característico de operación en tierra de aeronave ([15-40] °C. Los resultados obtenidos fueron también prometedores, observándose, no obstante, una ligera pérdida de eficiencia del sistema con el aumento de la temperatura del fluido portador.

2.2. Amortiguador semiactivo para tren de morro del UAV Atlante

Este diseño está basado en el amortiguador real oleo-neumático del tren delantero del UAV Atlante introduciendo las modificaciones necesarias para añadir la tecnología magneto-reológica. El tren original es un equipo bien conocido por CESA (responsable de su diseño, fabricación y mantenimiento/soporte al producto).

Posteriormente a la caracterización del FMR en la válvula descrita en el apartado anterior, el comportamiento real de un amortiguador semiactivo basado en tecnología magneto-reológica fue simulado y ensayado a nivel individual e integrado en el tren completo en un amplio intervalo de temperatura [-20, 55] °C.

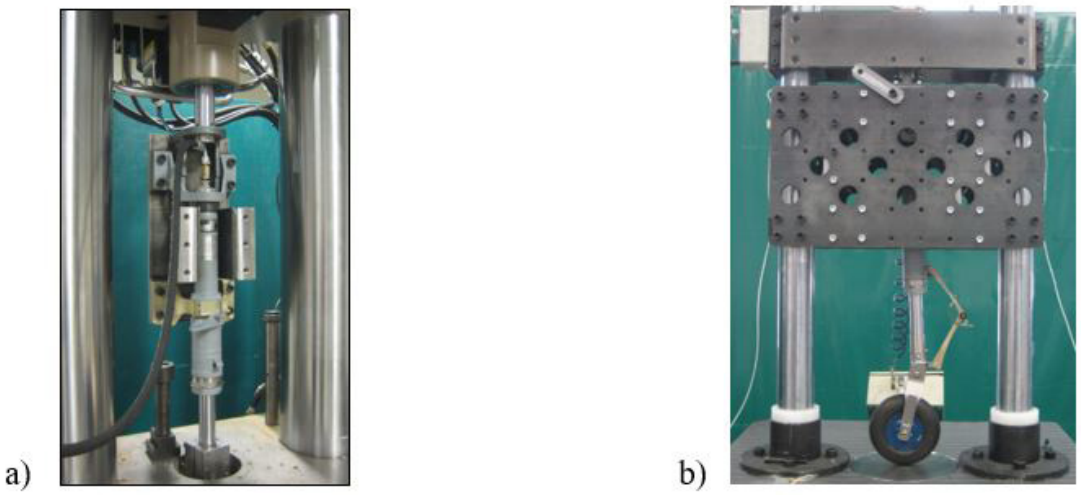


Figura 3. a) Banco de ensayos para amortiguador aislado. b) Banco de ensayos de tren completo.

Los principales resultados obtenidos se recogen en la figura 4. Considerando la curva correspondiente a 0 Amperios como referencia, el porcentaje de aumento de fuerza de amortiguación conseguido en condiciones de trabajo cuasi-estáticas aplicando la máxima intensidad de corriente posible fue del 12,5 %. Los resultados obtenidos en los ensayos de desarrollo de esta aplicación predijeron un gran abanico de amortiguación en operaciones en tierra con una mínima intensidad de corriente aplicada, lo que permitiría aumentar la versatilidad de la aeronave.

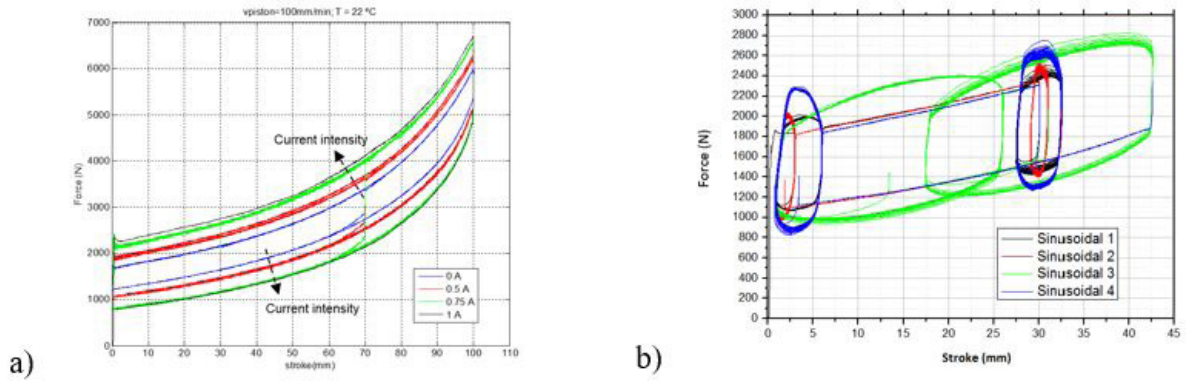


Figura 4. Capacidades obtenidas en ensayo de amortiguador magneto-reológico. a) Amortiguador aislado. b) Amortiguador integrado en tren de aterrizaje.

En caso de incorporar este prototipo en una aeronave semejante en un futuro, una optimización en peso sería factible pues el equipo ensayado supone un aumento en peso del 15 % en relación a la tecnología de absorción de energía convencional.

3. Amortiguador activo para tren de morro del avión transporte táctico medio basado en el CASA C-295

Con la experiencia adquirida en los trabajos previos descritos en el apartado 2, se ha procedido a implementar la tecnología de amortiguación magneto-reológica esta vez dentro de un avión con un peso máximo al despegue mucho mayor (superior a 20 t) en el marco del programa CIEN SELENA del CDTI.

Este tren de aterrizaje está basado en el amortiguador real oleo-neumático del tren delantero del avión de transporte táctico medio basado en el CASA C-295 introduciendo las modificaciones necesarias para añadir la tecnología magneto-reológica. El tren original también es un equipo bien conocido por CESA

(responsable de fabricación, montaje y mantenimiento/soporte al producto). Estos cambios se realizaron sobre la máxima de modificar lo mínimo posible la interfaz exterior del equipo, ya que ello permitirá, en una fase posterior a este proyecto, implementarlo en un avión. Con este prototipo se pretende conseguir que la fuerza transmitida por el amortiguador a la estructura del avión sea constante e independiente de los desplazamientos del pistón móvil ocasionados por las irregularidades del terreno. Los principales retos de la integración de la VMR dentro del amortiguador original han sido:

1. Garantizar la estanqueidad interna en la zona de salida del cable espiral protector de hilos eléctricos.
2. Fijar la VMR al pistón deslizante garantizando una correcta funcionalidad y siendo validado por análisis estructural.
3. Conseguir las características de bobinado estimadas por simulación durante el diseño preliminar.
4. Integrar un colector en el que sea posible acoplar sensores de presión y temperatura y a través del cual pueda realizarse el llenado del amortiguador.

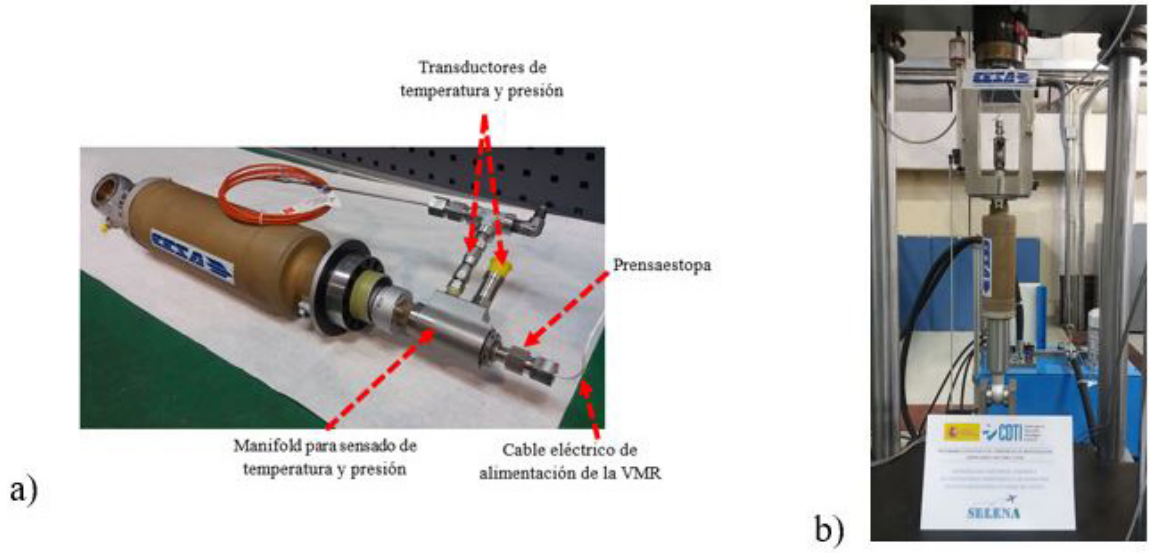


Figura 5. a) Componentes añadidos al amortiguador original para la implementación de la tecnología magneto-reológica. b) Prototipo de amortiguador magneto-reológico en banco de ensayos de alta velocidad.

A fin de poder establecer una comparación entre ambas tecnologías (convencional y magneto-reológica), las condiciones de llenado de gas y líquido del amortiguador se han mantenido idénticas a las correspondientes al amortiguador original. Según el estudio teórico realizado, la máxima corriente de alimentación que puede aplicarse a las bobinas de la VMR es 1,26 A. Durante los ensayos realizados al prototipo se ha determinado como punto crítico de diseño la junta de estanqueidad del prensaestopa. Tras varias pruebas realizadas se ha determinado una presión máxima tolerada por este diseño igual a 400 bar, siendo la presión límite del amortiguador original 675 bar. Cabe destacar que esta solución de aislamiento del amortiguador mediante prensaestopa no es de aplicación aeronáutica y se instrumentó para dar salida a los cables eléctricos de alimentación de la VMR de una forma económica y rápida. La limitación que implica en la caracterización del prototipo no está relacionada con la tecnología magneto-reológica.

3.1. Caracterización básica

La caracterización básica del amortiguador magneto-reológico se ha realizado a temperatura ambiente controlada considerando diferentes velocidades de extensión/retracción del pistón, posiciones iniciales del pistón a lo largo de su carrera, así como corrientes de alimentación de las bobinas. Los principales objetivos de esta caracterización básica han sido:

1. Definir la holgura óptima entre camisa y núcleo de la VMR. Partiendo de un valor de holgura estimado de forma teórica, se ha procedido a realizar diferentes curvas de extensión/retracción

con el objetivo de determinar el aumento de fuerza de amortiguación conseguida con la tecnología magneto-reológica incorporada en el amortiguador.

2. Obtener tiempos de respuesta real del amortiguador magneto-reológico ante niveles distintos de intensidad.

La figura 6 resume las principales conclusiones obtenidas en la caracterización básica del equipo. La posición 0 mm se corresponde con el pistón completamente extendido.

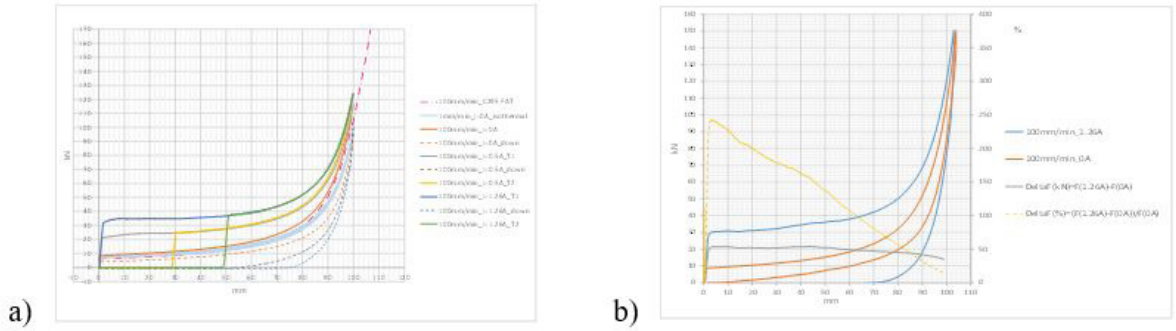


Figura 6. a) Caracterización básica del amortiguador magneto-reológico en comparación con la tecnología convencional. b) Aumento de la fuerza de amortiguación conseguido en condiciones cuasiestáticas en función de la carrera del pistón deslizante.

Considerando como referencia la curva característica del amortiguador convencional (100 mm/min_ C295 PAT en figura 6), se extraen las siguientes conclusiones:

1. En las mismas condiciones de funcionamiento (velocidad de movimiento del pistón igual a 100 mm/min) y sin aplicar campo magnético al FMR (intensidad de corriente aplicada a las bobinas igual a 0 A), la curva característica del amortiguador magneto-reológico es prácticamente idéntica a la del convencional.
2. El aumento porcentual de la fuerza de amortiguamiento registrada aplicando la máxima corriente eléctrica permitida a las bobinas (1,26 A) es superior al 90 % al comienzo de la carrera de compresión. Este aumento porcentual disminuye según avanza la carrera de compresión del pistón a medida que la compresión del nitrógeno del amortiguador va predominando sobre la restricción hidráulica.
3. A medida que aumenta la intensidad de corriente aplicada a las bobinas se produce antes la cavitación en el interior del amortiguador durante la extensión (fuerza igual a 0 kN). Esto es debido a la aglomeración de partículas magnéticas en la cámara de extensión (la geometría de la cabeza de pistón no se ha modificado para esta aplicación; el paso de fluido en la extensión genera una restricción adicional no deseada).

3.2. Caracterización avanzada

Una vez conocido el comportamiento básico del amortiguador, es necesario estudiar sus capacidades cuando es sometido a perfiles reales de pista y velocidades características de impacto de aterrizaje. El motivo de realizar este tipo de ensayos en el amortiguador aislado tiene su principal ventaja en la eliminación de elementos auxiliares del tren de aterrizaje que influyen en la respuesta del sistema tales como neumático, rueda, fijaciones, etc. Estos ensayos están orientados a desarrollar el control del amortiguador y validar el sistema.

Los principales objetivos de esta caracterización son:

1. Obtención de fuerza de amortiguamiento frente a la velocidad de pistón para diferente campo aplicado.

2. Determinación los tiempos característicos de respuesta de la VMR y FMR para esta geometría determinada y la fuerza de amortiguación conseguida.

En la fecha de edición de este documento, esta caracterización solamente ha sido realizada parcialmente debido a una rotura del cable de la alimentación de la VMR que implica una reparación de la misma fuera del amortiguador. La figura 6 recoge la información que se ha podido extraer por el momento en relación al primer objetivo de la caracterización avanzada. En dicha figura puede observarse el considerable incremento en la fuerza de amortiguación (300 %) que la tecnología en estudio podría conseguir para esta aplicación.

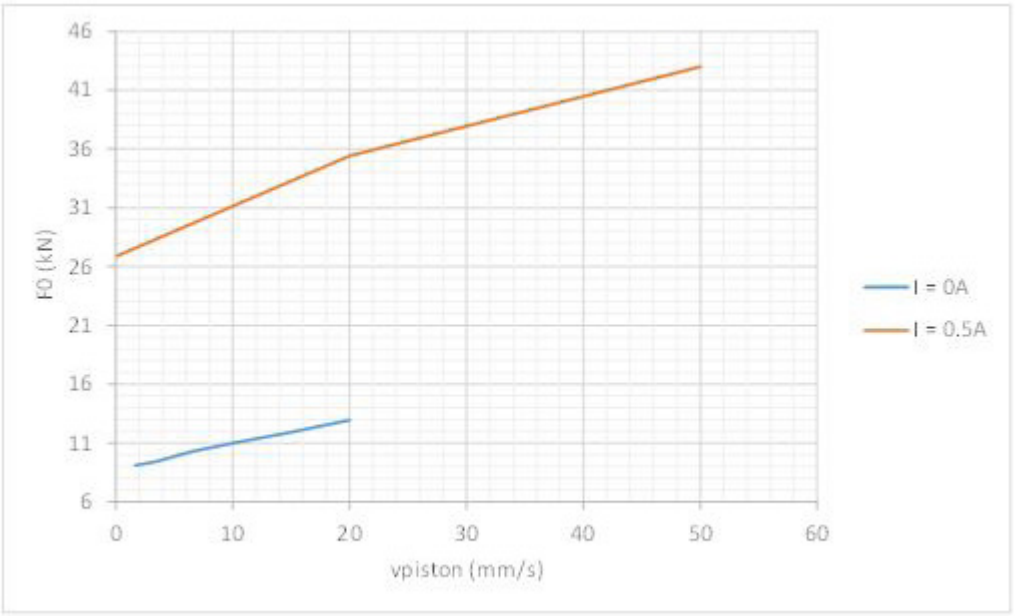


Figura 7. Fuerza de amortiguación obtenida al comienzo de la compresión del amortiguador para diferentes velocidades de pistón e intensidades de corriente aplicadas.

4. Conclusiones

A la vista de las caracterizaciones básica y avanzada del prototipo de amortiguador magneto-reológico realizadas, a falta de completar esta última una vez que la VMR esté reparada, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

1. El aumento de la fuerza de amortiguación obtenido con la tecnología magneto-reológica en relación a la convencional es muy considerable. Para bajas velocidades de pistón (100 mm/min, régimen cuasi-estático) se ha obtenido un aumento del 200 % al comienzo de la carrera de compresión. Este aumento porcentual disminuye según avanza la carrera de compresión del pistón a medida que la compresión del nitrógeno del amortiguador va predominando sobre la restricción hidráulica.
2. En futuros rediseños de esta aplicación, sería posible evitar la cavitación durante la extensión modificando ligeramente la cabeza del pistón deslizante, evitando de este modo la acumulación de grumos de FMR en el interior de cavidades internas del amortiguador.
3. La rotura inesperada del cable de alimentación de la VMR no ha permitido estudiar completamente el comportamiento del prototipo cuando es sometido a regímenes de funcionamiento característicos de rodadura en pista (velocidades de pistón entre 10-50 mm/s). Sin embargo, de los resultados parciales obtenidos, un aumento de la fuerza de amortiguación similar al obtenido en régimen cuasi-estático es esperable.

Glosario de términos

CDTI	Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial
CESA	Compañía Española de Sistemas Aeronáuticos
FMR	Fluido magneto-reológico
PAT	*Product Acceptance Test*
UAV	*Unmanned Aerial Vehicle*
VMR	Válvula magneto-reológica

Agradecimientos

Este proyecto ha sido co-financiado por el CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial) (N.º IDI 20150629 SELENA). CESA agradece sinceramente su contribución al proyecto, así como la ayuda técnica y el apoyo recibido por parte de Airbus Defense and Space (España) e IK-4 TEKNIKER a lo largo de este proyecto de desarrollo.

Referencias

1. *Ocaña, M., Novillo, E., Morante, E., Chamorro, E. Analysis of Performances of a Semi-Active Suspension Implemented on a Landing Gear. Proc. ASME. 46421; Volume 1: Advances in Aerospace Technology, V001T01A050. November 14, 2014.*
2. *Ocaña, M. I., Novillo, E., Zubieta, M. Capabilities of magneto-rheological suspensions in landing gears. ERF/MRF Actuators Poster Session P 13. Actuator 14th International Conference and Exhibition on New Actuators and Drive Systems.*

Ignición de capas de mezcla supersónicas por onda de choque

Huete, César[1,*], Martínez-Ruiz, Daniel[2], Ruiz Serna, David[3] y Carrasco Baltasar, Daniel[4]

[1] Grupo de Mecánica de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).

[2] ETSI Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

[3] Estudiante del Máster Universitario en Ingeniería Industrial de la UC3M.

[4] Estudiante del Grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales de la UC3M.

* Autor principal y responsable del trabajo; chuete@ing.uc3m.es (C.H.).

Resumen

El objeto del presente trabajo es la elaboración de un modelo teórico-numérico de combustión aplicable a la nueva generación de motores supersónicos: *shcramjet*. En particular, se pretende estudiar la viabilidad conceptual de este motor, el cual se presenta como firme candidato para ser utilizado en combustión a alta velocidad de flujo en la emergente era de la aviación hipersónica. La principal aplicación que ofrecería esta tecnología es clara: la posibilidad de operar vuelos transoceánicos con duración de un par de horas. Desde el punto de vista de las aplicaciones de defensa, se proporcionaría además la capacidad de propulsar misiles de ultra-largo alcance, una ventaja competitiva que no ha pasado desapercibida a las principales potencias militares del mundo.

Palabras clave

Combustión supersónica, propulsión, ondas de choque.

1. Introducción

Uno de los hitos más importantes en el desarrollo de la aviación ocurrió en 1947, cuando el avión experimental Bell X-1 atravesó por primera vez la barrera del sonido en un vuelo tripulado. Un hito de similar envergadura ocurrió veinte años después, cuando el avión cohete North American X-15 sobrevoló California a una velocidad 6,7 veces mayor que la velocidad del sonido (Mach=6,7), convirtiéndose así en el vuelo tripulado más rápido de la historia. Este record permanece imbatido hoy en día, poniendo de manifiesto la gran dificultad técnica que existe para propulsar aeronaves en el régimen hipersónico (Mach>5).

Los turborreactores convencionales (*turbojets* en inglés) tienen un rango de aplicación supersónica muy limitado, pues para números de Mach superiores a 2,5 el frenado del flujo supersónico conlleva la generación de ondas de choque que dañan las palas del compresor. Como solución al problema del compresor surge el estatorreactor (*ramjet* en inglés), el cual carece de partes móviles. En este tipo de reactores son las ondas de choque formadas a la entrada las que actúan como compresor aumentando la presión y temperatura del aire a niveles óptimos para la posterior etapa de combustión subsónica. Aunque el motor *ramjet* es operado sin relativas complicaciones a números de Mach comprendidos entre 2,5 y 5, su uso no es viable si queremos aumentar la velocidad de la aeronave hasta regímenes hipersónicos. En estos casos, no es conveniente frenar el fluido hasta regímenes subsónicos, pues con ello se pierde cantidad de movimiento (impulso). Si la combustión transcurre en regímenes supersónicos el estatorreactor se denomina *scramjet*, acrónimo de *supersonic combustion ramjet*.

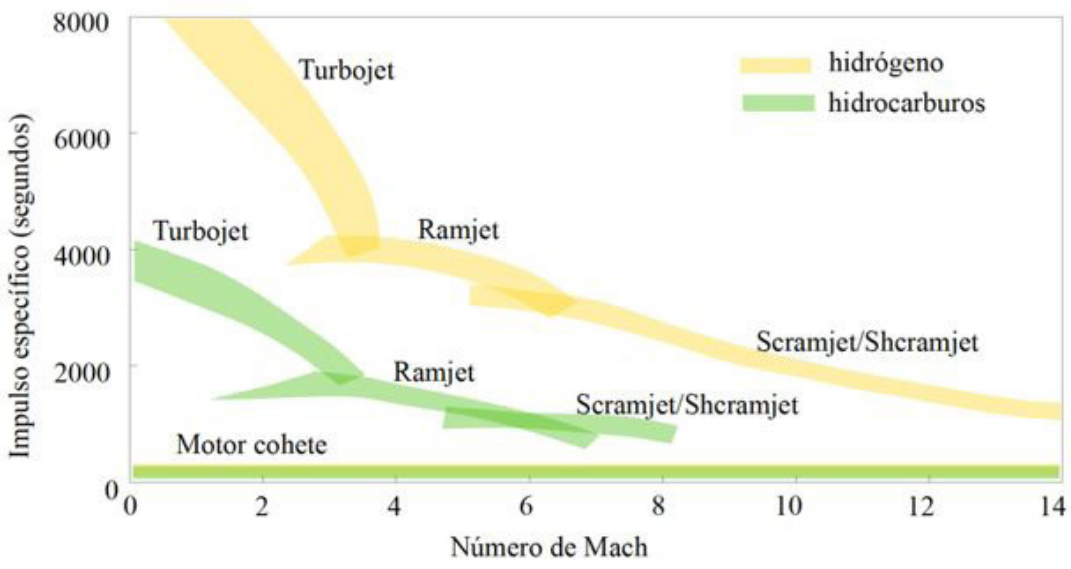


Figura 1. Impulso específico en función del número de Mach [1].

La justificación para desarrollar este tipo de reactores es clara si analizamos la figura 1 donde se representa el impulso específico de cada tipo de motor, definido como el cociente entre el empuje (Kg m/s^2) y el peso de combustible por unidad de tiempo (Kg m/s^3) en función del número de Mach. Como puede observarse, solo los motores cohete pueden operar en cualquier rango de número Mach, pero su uso como medio de transporte comercial queda descartado debido a que el motor cohete incorpora tanto el combustible como el comburente (oxígeno), siendo el segundo el que aportaría el 90 % del peso de la mezcla reactiva. Excluido el motor cohete, observamos cómo solo los motores de tipo *scramjet* y *shcramjet* son los únicos capaces de cubrir el espectro hipersónico.

Aunque el diseño conceptual de este tipo de motores fue propuesto hace ya 50 años [2], la viabilidad de fabricar motores de propulsión capaces de quemar el combustible de forma estable y controlada a velocidades de crucero hipersónicas está aún por demostrar. Esto es debido a la elevada velocidad característica del flujo, pues para un tamaño de cámara de combustión típico (del orden de un metro), el combustible debe ser inyectado, mezclado, encendido y quemado en cuestión de milisegundos, lo que es aún un gran reto tecnológico [3]. En la búsqueda por hacer más eficiente y rápida la combustión del flujo supersónico nace el motor *shcramjet*, acrónimo de *shock-induced combustion ramjet*, donde una onda de choque, además de precalentar el aire entrante, incide sobre la capa de mezcla formada entre las corrientes de aire y combustible, incrementando así la temperatura de ambos hasta alcanzar las condiciones necesarias para la ignición. En este trabajo se muestra cómo, en efecto, el aumento de la temperatura logrado mediante las ondas de crea condiciones favorables para la ignición en distancias menores a las que ocurrirían en flujos no comprimidos. El análisis emplea métodos numéricos y proporciona guías para el diseño de los futuros motores hipersónicos.

2. Análisis teórico-numérico

El presente estudio teórico se configura haciendo interactuar dos corrientes supersónicas paralelas de aire y combustible que circulan en un dominio bidimensional (definiendo x como la coordenada longitudinal e y como la coordenada transversal), cuya interacción provoca la formación de una capa de mezcla laminar de espesor δ_L, definiendo las propiedades de ambas corrientes mediante los subíndices a y f respectivamente. Considerando que la corriente de aire circula a una temperatura y número de Mach superiores a la corriente de combustible ($T_a > T_f$ y $M_a > M_f$), a una determinada distancia longitudinal del origen de coordenadas se hace incidir una onda de choque inclinada un ángulo respecto a la horizontal. Esta onda se curva al atravesar la capa de mezcla debido a la disminución progresiva del número de Mach del flujo, alcanzando finalmente una inclinación fija una vez atraviesa la región ocupada por la corriente de combustible. La aparición de esta onda de choque provoca un incremento súbito de la presión y temperatura de la mezcla, lo cual puede dar lugar a la aparición anticipada del núcleo de ignición, que de esta forma permanecería anclado en el interior de la cámara de combustión. Tras la onda, el flujo se deflecta y se expande. El análisis teórico que predice si la ignición ocurre justo detrás de la onda de choque, dando lugar a una detonación local, se realizó en [4]. Este trabajo se centra en configuraciones donde la ignición ocurre después de la expansión. Primero se presenta la ignición de la capa de mezcla libre y después se compara con el caso que incluye la interacción con el choque. Finalmente se cuantifica el impacto del choque en la longitud de ignición.

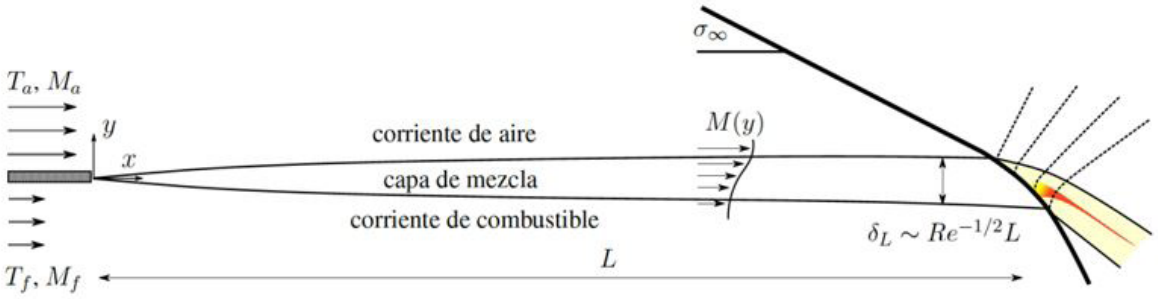


Figura 2. Esquema de la interacción de la onda de choque con la capa de mezcla.

Como el objetivo principal consiste en determinar bajo qué condiciones aparece el fenómeno de ignición, además de la distancia necesaria para que este tenga lugar, las ecuaciones de conservación se formulan para un proceso estacionario, despreciando las fuerzas gravitatorias en comparación con los términos convectivos y considerando la presión constante a lo largo de la coordenada longitudinal del dominio en el exterior de la capa de mezcla $(\partial p/\partial x \sim 0)$. Este estudio se focaliza en combustibles que presentan propiedades similares al aire (peso molecular similar), siendo el etileno (C_2H_4) un caso representativo, y aplicando la ecuación de estado para un gas ideal al caracterizar ambas corrientes. La combustión se describe de manera simplificada mediante una reacción química exotérmica irreversible de un único paso, modelando su constante específica mediante la ley de Arrhenius y considerando la temperatura de activación muy superior a la temperatura máxima, la cual se corresponde con la de la corriente de aire en la mayoría de los casos. Esto permite expresar el ritmo de reacción mediante la expresión, $\omega = A\rho\, Y_a\, Y_f exp(-T_{act}/T)$, con Y_a e Y_f haciendo referencia a la fracción de masa de aire y combustible, respectivamente. Al describir el flujo de calor, se emplea la ley de Fourier $\vec{q} = -k\,\nabla T$, mientras que para caracterizar el fenómeno de difusión de masa se considera relevante únicamente la difusión originada por gradientes de concentración descrita mediante la ley de Fick.

En el límite de elevado número de Reynolds, $Re = \rho_a\, u_a\, L/\mu_a \gg 1$ se aplica la hipótesis de capa límite a la capa de mezcla, considerando su espesor mucho menor que la dimensión longitudinal característica del dominio $\delta_L \sim Re^{-1/2}\, L \ll L$, lo cual simplifica en gran manera las ecuaciones de conservación. Las variables se adimensionalizan empleando las magnitudes físicas de la corriente de aire, obteniendo así las siguientes expresiones para la ecuación de continuidad, conservación de especies, momento en dirección longitudinal y energía,

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u})}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{v})}{\partial\bar{y}} = 0, \tag{1}$$

$$\bar{\rho}\bar{u}\frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{x}} + \bar{\rho}\bar{v}\frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{y}} = \frac{\partial}{\partial\bar{y}}\left(\bar{\mu}\frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{y}}\right), \tag{2}$$

$$\bar{\rho}\bar{u}\frac{\partial\bar{h}}{\partial\bar{x}} + \bar{\rho}\bar{v}\frac{\partial\bar{h}}{\partial\bar{y}} = Pr^{-1}\frac{\partial}{\partial\bar{y}}\left(\bar{\mu}\bar{c_p}\frac{\partial\bar{T}}{\partial\bar{y}}\right) + (\gamma-1)M_1^2\bar{\mu}\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{y}}\right)^2 + Q\widetilde{\omega_i}\,, \tag{3}$$

$$\bar{\rho}\bar{u}\frac{\partial Y_i}{\partial\bar{x}} + \bar{\rho}\bar{v}\frac{\partial Y_i}{\partial\bar{y}} = \pm\widetilde{\omega_i} + Pr^{-1}Le^{-1}\,\frac{\partial}{\partial\bar{y}}\left(\bar{\rho}\bar{D}\frac{\partial Y_i}{\partial\bar{y}}\right), \tag{7}$$

respectivamente. Las coordenadas transversales de posición y velocidad, y y v respectivamente, se adimensionalizan con δ_L, y $u_a\,\delta_L/L$, para que sean de orden unidad. Las longitudinales con L y u_a, respectivamente. La función h es la entalpía escalada con $c_{pa}\,T_a$. Para mezclas con peso molecular parecido entre sus componentes, la ecuación de estado para un gas ideal caloríficamente perfecto puede expresarse como $\bar{\rho}\,\bar{T} = 1$ y las relaciones adimensionalizadas que introducen la dependencia de los fenómenos de transporte y el calor específico con la temperatura $\bar{\mu} = \bar{D} = \bar{T}^{\sigma_1}$ y $\bar{c_p} = T^{\sigma_2}$, empleando los valores representativos [5]. El ritmo de reacción adimensionalizado es $\widetilde{\omega_i} = \bar{\rho}\mathrm{Da}Y_aY_fA\, e^{\beta(1-\bar{T}^{-1})}\beta^{-1}$, siendo β el número de Zel'dovich o la temperatura de activación adimensional y Da el número de Damköhler. Se define el número de Lewis con valor unidad Le=1,, el número de Prandtl Pr=0,7 y el cociente de calores específicos γ=1,3 representativos para la corriente de aire, expresando el número de Mach relativo a la misma $M = \bar{u}\,M_a\,\bar{T}^{1/2}$.

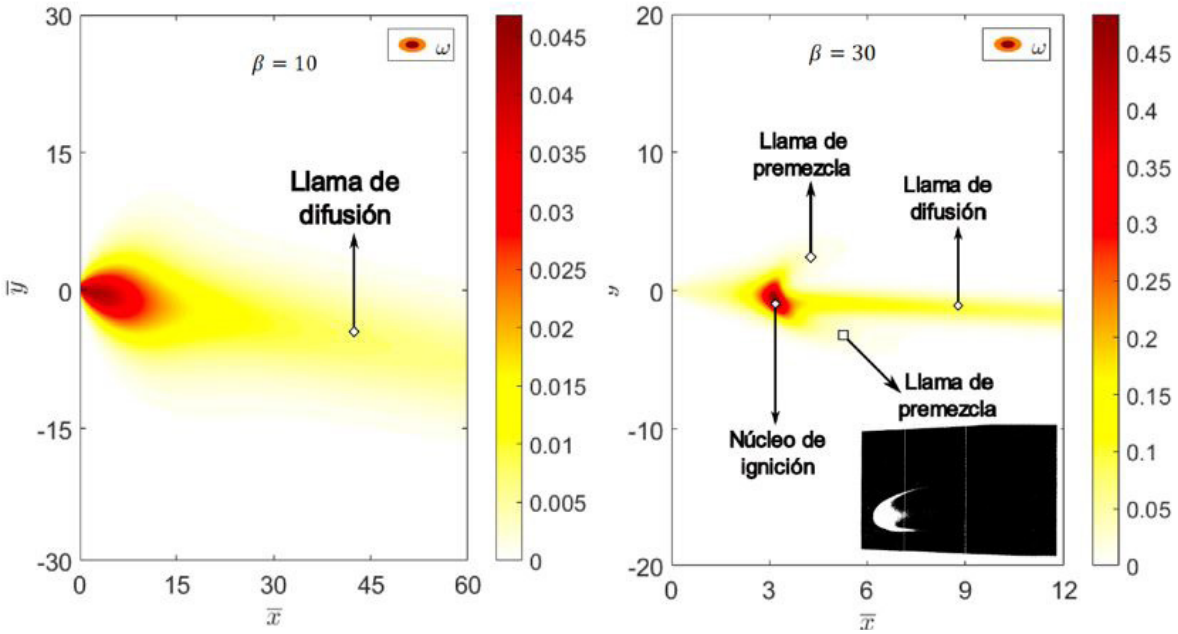


Figura 3. Ritmo de reacción para (izquierda) y (derecha). Caso sin choque. Inset: estructura de una llama en una capa de mezcla [6].

La figura 3 muestra dos ejemplos de ignición de capas de mezcla libres: para β=10 (izquierda) y β=30 (derecha). Las propiedades externas son , $M_f = 2, M_a = 4, \lambda_T = \frac{T_f}{T_a} = 0{,}85$ y el calor de combustión adimensional Q=1 . Se observa como el efecto de la temperatura de activación afecta a la forma de la llama, obteniéndose la esperada forma tribraquial para el caso de β=30≫1 [6].

Una vez descrito el problema, en el cual ambas corrientes se mezclan y se queman de forma autónoma, se incluye en dicho escenario la onda de choque bajo la condición de flujo supersónico en la totalidad del dominio. Para calcular la variación de propiedades a través de la onda de choque se emplean las relaciones de Rankine-Hugoniot, las cuales dependen de las propiedades de la corriente aguas arriba (subíndice *u*) y proporcionan la presión, deflexión y número de Mach detrás del choque (subíndice *s*)

$$F_P(M_u, \sigma, \gamma) = \frac{p_s}{p_u} = \frac{2\gamma M_u^2 \sin^2\sigma - \gamma + 1}{\gamma + 1} \tag{5}$$

$$\mathrm{F_\nu(M_u, \sigma, \gamma) = \nu = \tan^{-1}\left\{\frac{2\left(M_u^2 \sin^2\sigma - 1\right)\cot\sigma}{2 + M_u^2[\gamma + \cos(2\sigma)]}\right\}} \tag{6}$$

$$F_M(M_u, \sigma, \gamma) = M_s = \frac{(\gamma+1)^2 M_u^4 \sin^2\sigma - 4\left(M_u^2 \sin^2\sigma - 1\right)\left(\gamma M_u^2 \sin^2\sigma + 1\right)}{\left(2\gamma M_u^2 \sin^2\sigma + 1 - \gamma\right)\left[(\gamma-1)M_u^2 \sin^2\sigma + 2\right]} \tag{7}$$

Para resolver la interacción con la onda de choque se emplea la aproximación de Moeckel [7], la cual desprecia las ondas características originadas por la reflexión en la región no uniforme del flujo situada en la parte posterior a la onda de choque. La inclusión de estas ondas afectaría principalmente a la zona límite inferior, teniendo estas un impacto menor en el flujo medio [8]. Se define así el perfil de la onda de choque como una función que depende únicamente de su orientación inicial σ_∞ y de la distribución del número de Mach $M_u\ (y)$ anterior a la misma, incluyendo el cociente de calores específicos γ:

$$\frac{d\sigma}{dM_u} = -\frac{\frac{1}{F_p}\frac{\partial F_p}{\partial M_u} + F_3\frac{\partial F_\nu}{\partial M_u}}{\frac{1}{F_p}\frac{\partial F_p}{\partial \sigma} + F_3\frac{\partial F_\nu}{\partial \sigma}}, \quad \text{con } F_3(M_u,\sigma,\gamma) = \frac{\gamma M_s^2}{\sqrt{M_s^2-1}} \qquad (8)$$

La configuración de la región de interacción posterior a la onda de choque depende de las condiciones de contorno, y se analiza para distancias logitudinales mucho mayores que el espesor de la capa de mezcla, simplificando el problema a la interacción entre ambas corrientes separadas por una región infinitesimal. Teniendo en cuenta que la solución queda definida por las magnitudes M_a, M_f y $\sigma(y)$, y la configuración más común consiste en la aparición de una rarefacción reflejada, la cual modifica la orientación de dicha corriente, que se ve expandida hasta alcanzar el equilibrio en presión y dirección con la corriente de combustible. Las ecuaciones que gobiernan la expansión isentrópica son

$$\left(\frac{p_d}{p_s}\right)^{1-\gamma^{-1}} = \frac{2+(\gamma-1)M_s^2}{2+(\gamma-1)M_d^2} \qquad \text{y} \qquad \nu = F_{PM}(M_d) - F_{PM}(M_s) \qquad (9)$$

siendo la función de Prandtl-Meyer

$$F_{PM}(M) = \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\,tan^{-1}\sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}(M^2-1)} - tan^{-1}\sqrt{M^2-1}, \qquad (10)$$

con el subíndice *d* referido a los valores detrás de la expansión. Tras obtener los valores de velocidad, temperatura y densidad detrás de la expansión, el problema de la evolución libre de la capa de mezcla se vuelva a resolver con unas condiciones iniciales modificadas por la previa interacción con la onda (mayor temperatura inicial para la misma fracción de mezcla). Resolviendo el problema para ambos escenarios, cuyos resultados están resumidos en la figura 4 se puede observar que en todos los casos la distancia de ignición disminuye al incrementar tanto la temperatura de la corriente de combustible como el número de Mach de la corriente de aire. Además, al incluir la interacción con la onda de choque se observan reducciones de la distancia de ignición que en ocasiones superan en un orden de magnitud el escenario inicial, lo cual confirma teóricamente el gran impacto que supone la introducción de este fenómeno. Cabe mencionar que la deflexión posterior de ambas corrientes causada por la onda de choque puede suponer una reducción adicional de la distancia de ignición si se considera la misma en dirección longitudinal a la cámara de combustión. Sin embargo, para la combinación de magnitudes presentadas en los resultados la modificación de la orientación de ambas corrientes provoca una reducción despreciable en comparación con la ya experimentada debido al incremento de temperatura causado por la onda de choque.

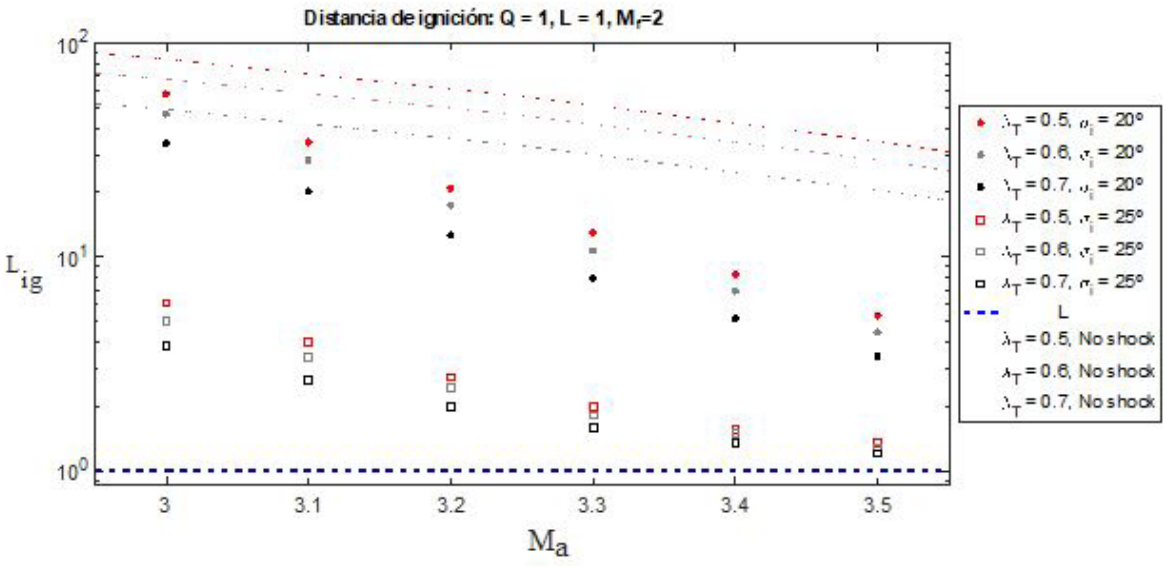


Figura 4. Distancia de ignición para casos con (puntos y cuadrados) y sin choque (líneas).

3. Análisis Numérico de una cámara tipo DLR

En esta sección, los citados procesos de reacción química en cámaras de combustión supersónicas se analizan mediante el uso de simulación CFD con ANSYS Fluent. La cámara de combustión utilizada es similar a la desarrollada por el Centro Aeroespacial Alemán (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt; DLR) de tipo *shcramjet*. La geometría de esta cámara de combustión, consistente en una sección rectangular de ancho constante de 40 mm, ha sido simplificada a un análisis bidimensional para inicialmente reducir el coste computacional. Como muestra la figura 5, la altura se mantiene constante de 50 mm los primeros 100 mm de longitud de la cámara y, posteriormente, la pared superior de la cámara diverge con un ángulo de 3º a lo largo de los últimos 240 mm de esta. En la línea central de la cámara de combustión, a 77 mm de la entrada, se coloca una cuña triangular con una longitud de 32 mm y una altura de 6 mm. En la base de dicha cuña hay originalmente 15 orificios de 1 mm de diámetro por los que se inyecta hidrógeno a Mach y a temperatura K [9]. Para simplificar el análisis, se asume que la inyección del hidrógeno se realiza a través de toda la base de la cuña, sin considerar la presencia de orificios en esta. Las fronteras de la cámara de combustión y de la cuña se establecen como paredes adiabáticas en la presente simulación.

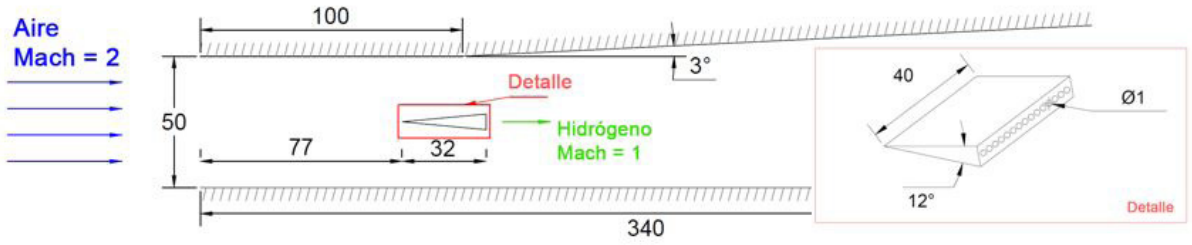


Figura 5. Geometría de la cámara de combustión supersónica tipo DLR y la cuña de inyección.

Tomando en consideración velocidades de vuelo en rango hipersónico, los números de Mach en el interior del combustor son aproximadamente un factor de 2-3 veces más pequeños debido a la desaceleración de flujo causada por las ondas de choque de la parte delantera de la nave y de la entrada del motor. El oxidante entra a la cámara de combustión a un número de Mach y a mayor temperatura que el combustible K. Usamos el hidrógeno como combustible de referencia. Por último, los efectos de turbulencia han sido evaluados con modelos RANS, en particular el modelo SST y el proceso de combustión está recogido en un modelo químico de un paso como se ha detallado con anterioridad, definido ahora por la reacción global del hidrógeno $2\ H_2 + O_2$ à $2H_2O$.

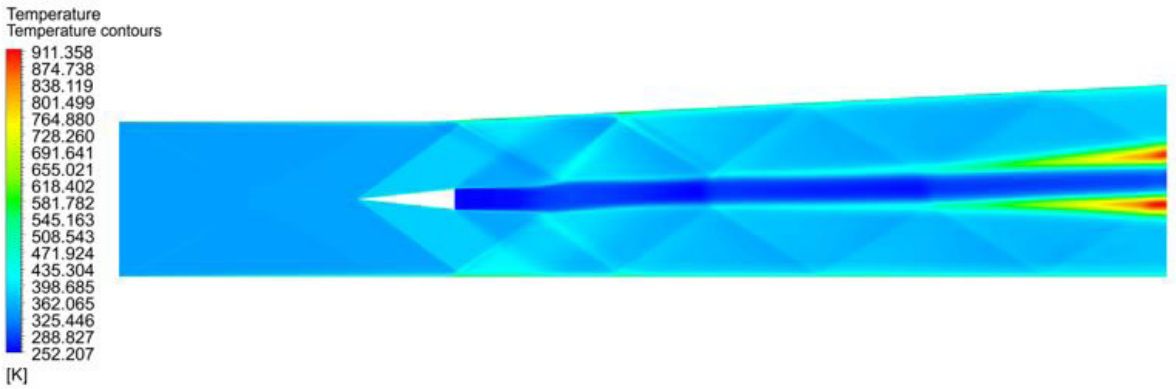


Figura 6. Isocontornos de temperatura en la cámara de combustión supersónica tipo DLR.

La simulación numérica proporciona la distribución espacial de todas las variables fluidodinámicas involucradas en este problema, como muestra la figura 6 para la temperatura. Se observa la aparición de dos ondas de choque oblicuas cuando el flujo de aire supersónico incide sobre la cuña de la cámara de combustión. Estas son reflejadas en las paredes superior e inferior del dominio, una atravesando la expansión de Prandtl-Meyer generada en la esquina de la divergencia de la pared superior, para acabar ambas incidiendo en la capa de mezcla formada entre el hidrógeno y el aire. Se observa que el aumento local de la presión y temperatura da lugar a un incremento del ritmo de reacción.

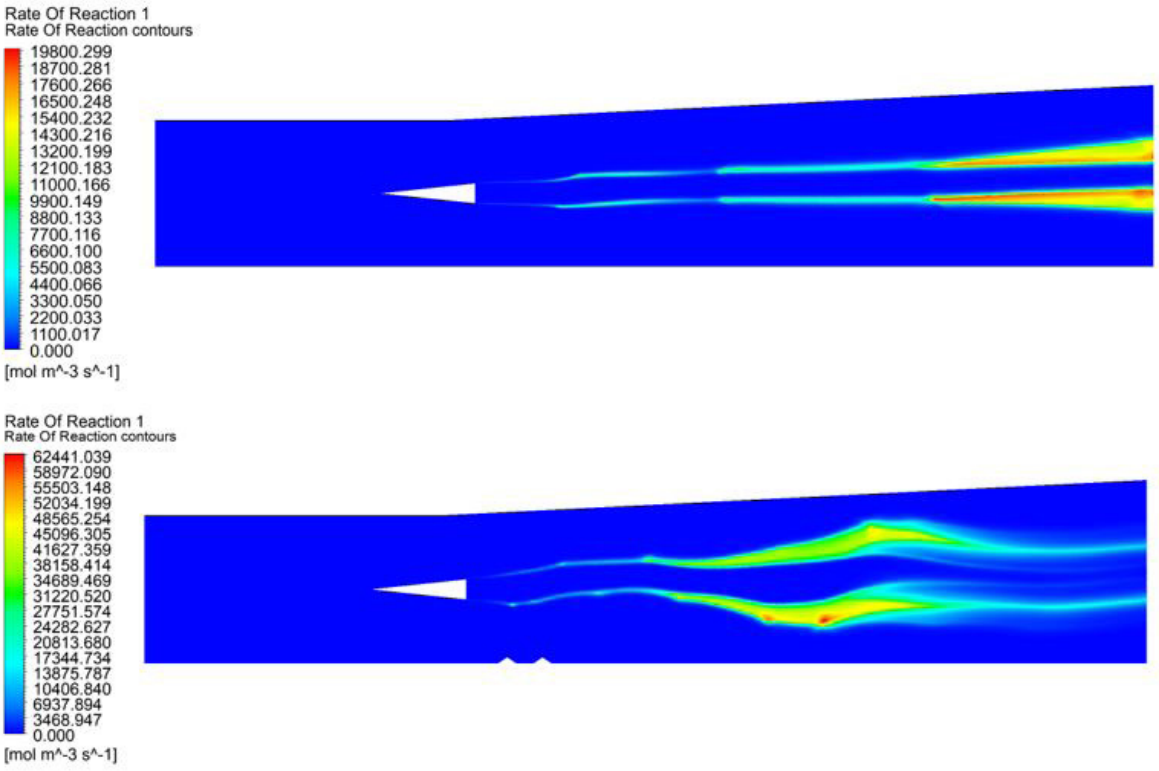


Figura 7. Isocontornos del ritmo de reacción en la simulación numérica original (superior) y con resaltos triangulares (inferior).

De hecho, en el panel superior de la figura 7 se puede apreciar un aumento significativo de la velocidad de reacción en las zonas sucesivas de incidencia del tren de ondas. Las ondas de choque aumentan la temperatura y favorecen la mezcla entre los reactivos, ya que generan vorticidad en la zona de impacto con la capa de mezcla. A cada interacción con el tren de ondas, el ritmo de reacción aumenta hasta proporcionar la combustión sostenida a una distancia dada del inyector principal.

Finalmente se evalúa el incremento del ritmo de reacción a través de compresiones adicionales producidas en forma de ondas de choque por resaltos triangulares en la pared inferior de la cámara, tal y como se muestra en el panel inferior de la figura 7. Mediante dichas ondas se reduce de forma significativa la distancia de ignición de capas de mezcla supersónicas, consiguiéndose la ignición de los reactivos en el interior del combustor, pese a los cortos tiempos de residencia del flujo en su interior.

4. Conclusiones

El proceso de ignición de capas de mezcla combustible-aire en régimen supersónico por acción de ondas de choque ha sido estudiado en dos vertientes. Una aproximación analítica que proporciona la disminución teórica de las distancias de ignición de la mezcla por efecto directo de la incidencia de ondas de choque y un estudio numérico en el que se han simulado configuraciones realistas y posibles aplicacio-

nes de diseño para mayor reducción de dichas distancias dentro de un combustor *schramjet*. El resultado de ambos estudios coincide en el efecto acelerador de la onda choque sobre el proceso de autoignición. Se observa que, junto con el tren de ondas generado en la entrada de aire exterior, la inclusión de ondas forzadas en la propia cámara de combustión, las cuales inciden directamente sobre la capa de mezcla, permite situar el foco de ignición cerca del punto de inyección, favoreciendo así la combustión completa en el dominio de la cámara de combustión.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto ENE2015-65852-C2-1-R del MINECO y la Fundación Iberdrola España (BINV-ua37crdy). El trabajo forma parte de los trabajos fin de máster y fin de grado de los estudiantes David Ruiz Serna y Daniel Carrasco Baltasar.

Referencias

1. *Moses PL, Rausch VL, Nguyen LT, and Hill JR. NASA hypersonic flight demonstrators-overview, status, and future plans. Acta Astronaut. 2004, 55(3–9), 619–630.*
2. *Ferri A. Mixing-controlled supersonic combustion. Annu. Rev. Fluid Mech. 1973, 5, 30-338.*
3. *Urzay J. Supersonic Combustion in Air-Breathing Propulsion Systems for Hypersonic Flight Annu. Rev. Fluid Mech. 2018, 50, 593-627.*
4. *Huete C, Sánchez AL, Williams FA, and Urzay J. Diffusion-flame ignition by shockwave impingement on a supersonic mixing layer, J. Fluid Mech. 2015, 784, 74-108.*
5. *Huete C, Urzay J. Sánchez AL, and Williams FA. Transonic Laminar Mixing Layers of Fuels for High-Speed Propulsion, AIAA J. 2016, 54, 962–975.*
6. *Williams FA, Theory of Combustion in Laminar Flows, Annu. Rev. Fluid Mech. 1971, 3, 171-188.*
7. *Moeckel WE. Interaction of oblique shock waves with regions of variable pressure, entropy, and energy. NACA Tech. 1952 Note 2725.*
8. *Martinez-Ruiz D, Huete C, S´anchez AL, and Williams FA. Interaction of Oblique Shocks and Laminar Shear Layers, AIAA J. 2018, 56, 1026-1030.*
9. *Waidmann, W and Alff, F and Brummund, U and Böhm, M and Clauss, W and Oschwald, M. Experimental investigation of the combustion process in a supersonic combustion ramjet (SCRAMJET) DGLR Jahrbuch, 629–638, (1994).*

Las plataformas estratosféricas: desarrollos y capacidades de interés para la defensa

Domínguez, Diego[1,*], Gonzalo, Jesús[1], López, Deibi[1], García, Adrian[1] y Escapa, Alberto[1]

[1] Área de Ingeniería Aeroespacial, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071 León, España. Correo electrónico: diego.dominguez@unileon.es (DD), jesus.gonzalo@unileon.es (JG), deibi.lopez@unileon.es (DL), agarcg@unileon.es (AG), alberto.escapa@unileon.es (AE).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: diego.dominguez@unileon.es (DD).

Resumen

Los HAPS (*High Altitude Platforms*) o pseudo-satélites son aeronaves no tripuladas (RPAS) capaces de volar de forma autónoma en la estratosfera durante periodos muy largos. Esto los convierte en plataformas idóneas a la hora de proporcionar servicios de comunicaciones tácticas y de observación de la Tierra, permitiendo la vigilancia permanente en una zona de unos 20 km de radio. Para la prestación de estos servicios puede recurrirse a dos tipos de vehículos estratosféricos: aquellos capaces de volar en base a la sustentación aerodinámica que generan (avión) o bien por su flotabilidad (dirigible). Las grandes empresas aeronáuticas europeas han apostado distintamente por cada uno de los mencionados vehículos. Los aviones estratosféricos ya han demostrado su viabilidad, si bien la capacidad de carga pago que ofrecen se limita a unas pocas decenas de kilos. Por su parte, los dirigibles son plataformas de gran tamaño, lo que dificulta su desarrollo y operación; sin embargo, su capacidad de vuelo a punto fijo portando cargas de varios centenares de kilos y con un suministro de potencia eléctrica significativo los hacen grandes candidatos a convertirse en auténticos pseudo-satélites.

Palabras clave

High Altitude Platforms, pseudo-satélites, RPAS, comunicaciones tácticas, observación de la Tierra.

1. Introducción

Los conocidos como HAPS (*High Altitude Platforms*) o pseudo-satélites son una clase de vehículos no tripulados capaces de volar a alturas de hasta 20 km permaneciendo en la zona de interés durante largos periodos [1]. Propulsados por motores eléctricos, durante el día deben captar la energía procedente del Sol para hacer funcionar los motores y el resto de equipos, al mismo tiempo que cargan las baterías con las que alimentar la totalidad de sus sistemas durante las horas de noche.

Si bien la idea de una plataforma capaz de mantenerse en operación de forma autosostenida durante largos periodos se remonta a varias décadas atrás, solo los avances experimentados en años recientes en materiales compuestos, celdas solares y almacenamiento de la energía eléctrica han hecho posible su viabilidad técnica. Esto ha sido puesto de manifiesto, por ejemplo, por los recientes vuelos del Zephyr S (HAPS desarrollado por Airbus), que ha establecido un nuevo record de duración de vuelo –25 días, 23 horas y 57 minutos [2]. Por su parte la también europea Thales está desarrollando una plataforma HAPS basada en un dirigible con el nombre de Stratobus.

Esta capacidad de permanencia sobre la zona de interés, volando a una altitud elevada pero muy inferior a la de los satélites, los convierte en plataformas idóneas a la hora de proporcionar capacidad de comunicaciones y observación de la Tierra en el marco de las misiones desarrolladas por las Fuerzas Armadas.

En este trabajo se definen las características necesarias de las cargas de pago para la provisión de dichos servicios, así como sus capacidades. También se discuten las ventajas e inconvenientes operacionales de cada uno de los dos tipos de vehículos, avión o dirigible, con los que es posible desarrollar este tipo de misiones.

2. Entorno de operación de las plataformas estratosféricas

La capa atmosférica de interés para los HAPS es la estratosfera. Su inicio se establece típicamente a los 20 km de altitud, si bien esto depende de la latitud considerada (en los polos comienza en los 8 km aproximadamente) [3], extendiéndose hasta cerca de los 50 km.

Tanto en el caso de los dirigibles como los aviones, uno de los factores que más afecta a su diseño es la densidad atmosférica a la altitud de vuelo. Así, al inicio de la estratosfera la presión y la densidad son apenas un 8 % de los valores medios a nivel del mar, mientras que la temperatura media ronda los -50 ºC. Como podrá comprobarse en posteriores secciones, la baja densidad influye sustancialmente en el dimensionado de la plataforma para conseguir la sustentación necesaria.

Otro factor que también es crítico en el diseño de estas aeronaves es la velocidad del viento. En tanto que la potencia requerida para vencer la fuerza de resistencia aerodinámica crece con el cubo de la velocidad del viento, resulta fundamental determinar las zonas de la estratosfera en la que la intensidad del viento resulta mínima. En la región de interés para el vuelo de los HAPS, comprendida entre los 17 y los 35 km, la velocidad media del viento fluctúa en ambos hemisferios con carácter estacional. La altitud idónea para la operación del HAPS se encuentra en los 20 km. Allí la velocidad del viento alcanza un mínimo con velocidades medias situadas entre los 10 y 15 m/s [4]. En todo caso es necesario realizar un análisis

estadístico específico para la región en que se pretende desarrollar la misión, ya que existen importantes variabilidades geográficas (figura 1). Básicamente en latitudes medias se puede considerar que el tiempo durante el cual la velocidad supera los 15 m/s es del 10 %, bajando a tan solo un 1 % la cantidad de tiempo que se excede la velocidad de 20 m/s [5].

Finalmente, un último factor ambiental de gran importancia en el diseño y la operación de los HAPS alimentados mediante energía solar es la disponibilidad de radiación solar. Al operar a gran altitud estos vehículos no se ven afectados por la presencia de nubes, por lo que la radiación directa recibida es mayor. Esto se traduce en una radiación media anual próxima a los 1.300 W/m^2 para latitudes entre los 0 y 40º (notablemente superior a los 800 W/m^2 típicos a nivel del mar). En latitudes superiores la radiación incidente disminuye de forma notable, afectando muy sustancialmente al diseño de los HAPS como se verá posteriormente. No menos crítico resulta la proporción entre las horas de luz y oscuridad a lo largo de un día, en tanto que el sistema depende únicamente de sus baterías en la noche y necesita el día para generar el exceso de potencia eléctrica que permita su recarga y la operación de forma simultánea.

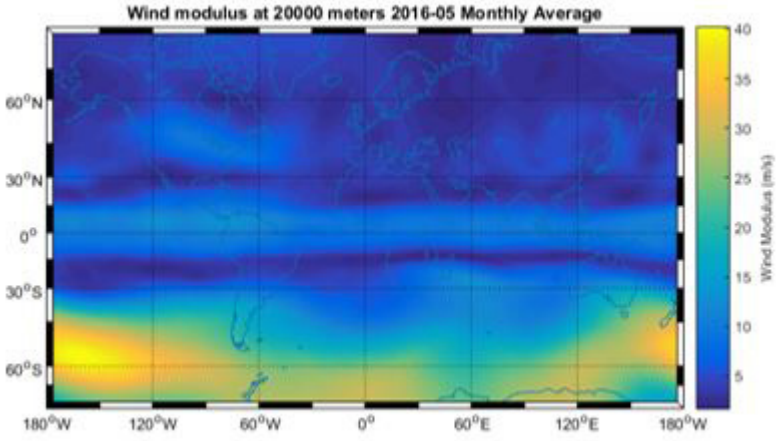


Figura 1. Velocidad media del viento durante un mes de mayo a 20 km de altura obtenida a partir del modelo GFS de la NOAA.

3. Capacidades en misiones de interés para la defensa

Las capacidades operativas de los HAPS les dotan de unas posibilidades únicas para el desarrollo de diversas misiones en el ámbito de las comunicaciones, la observación de la Tierra e incluso la inteligencia de señales (SIGINT).

3.1. Comunicaciones

Los servicios de comunicaciones ofrecidos por los HAPS presentan algunas características propias y diferenciales con respecto a los ofrecidos por los sistemas convencionales basados en redes terrestres o satelitales (ver Tabla 1).

Tabla 1. Características del servicio de comunicaciones mediante HAPS comparado con alternativas terrestres y satelitales

Aspecto	***High Altitude Platform***
Despliegue y actualización	Despliegue más rápido que los sistemas espaciales y terrestres, capacidad de actualización/recambio en la carga de pago
Balance de enlace	La menor distancia al HAPS permite un balance de enlace más eficiente comparado con el satelital. La menor zona de cobertura de la antena permite conseguir una mayor densidad de potencia con múltiples usuarios próximos

Aspecto	***High Altitude Platform***
Terminales	Más sencillas y ligeras que las terminales satelitales. Sistema compatible con terminales pensadas para redes terrestres
Apuntamiento y directividad de la antena	Aunque las conexiones de mayor ancho de banda requieren un enlace directivo (similar al satelital aunque con menores requisitos) múltiples servicios pueden ofrecerse con enlaces omnidireccionales
Latencia	Muy baja, equivalente a redes terrestres. Tiempo de ida y vuelta (*Round-trip time*) ~0,26 ms frente a los ~30 ms del enlace con satélites en órbita baja y los ~250 ms con geoestacionarios
Cobertura geográfica	Algunos cientos de km alrededor de la plataforma (~200 km de radio)

Estas características diferenciales en la capacidad de ofrecer comunicaciones en el teatro de operaciones tienen el potencial para convertir los HAPS en una plataforma de gran valor. Podrían tanto complementar las redes satelitales o terrestres disponibles como operar de forma aislada.

Aunque son múltiples las misiones que cabe proponer, se analiza aquí una de las consideradas más relevantes. Esta consiste en, establecer una red de comunicaciones en un escenario táctico que permita establecer múltiples enlaces entre los usuarios dentro del teatro de operaciones y entre estos y un nodo externo (figura 2).

En este contexto se analiza el despliegue de dos redes de comunicaciones distintas: una basada en el estándar de radio digital TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*) y otra consistente en una red de datos de banda ancha basada en el estándar LTE (*Long Term Evolution*). La red TETRA, ampliamente utilizada por fuerzas y cuerpos de seguridad de todo el mundo, se ve de esta forma complementada por la capacidad de la red LTE de transmitir y recibir tanto voz como datos utilizando protocolos de red IP de forma segura. Ello permitiría la difusión de imágenes y vídeo entre los usuarios de la red; una capacidad hasta ahora imposible sin utilizar sistemas por satélite [6].

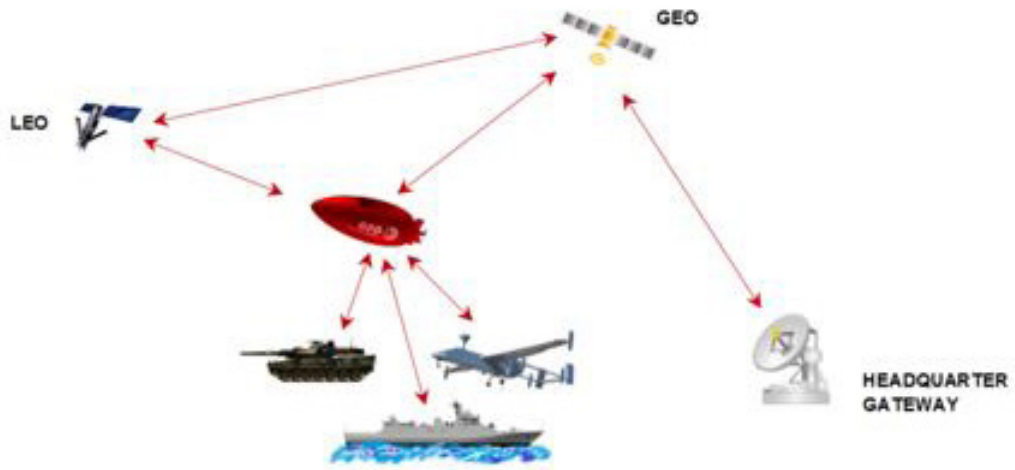


Figura 2. Arquitectura típica de red de comunicaciones basada en HAPS para un escenario táctico.

Las principales características y capacidades de las redes propuestas, así como de la carga de pago necesaria para su despliegue se recogen en la Tabla 2. Cabe remarcar que la alta capacidad ofrecida por este servicio requiere una carga de pago con un peso y consumo eléctrico notable (si bien se trata de diseños preliminares que hacen uso de componentes COTS), únicamente factible si se utilizan plataformas basadas en dirigibles, como se analizará en la sección 4.

Tabla 2. Características y capacidades del servicio TETRA y LTE proporcionado por HAPS

TETRA	LTE
Amplia cobertura (hasta 200 km de radio) compatible con el estándar terrestre	Compatible con servicios 4G y diferentes tipos de terminales
Plan de frecuencias: 380 – 430 MHz (Rx / Tx) 1280 usuarios. Ancho de banda 200 kHz, 25 kHz empleando multiplexación TDMA	1.5 Gbps totales en toda la zona de cobertura con una eficiencia espectral de ~5.5 bps/Hz
Masa estimada: 53 kg Consumo estimado: 187 W	Masa estimada: 260 kg Consumo estimado: 1580 W

3.2. Observación de la Tierra

Las plataformas HAPS son una herramienta complementaria especialmente interesante para la observación y vigilancia. Los sistemas espaciales permiten cubrir grandes superficies con una resolución relativamente baja y sujetos a fuertes restricciones operacionales por las ventanas de acceso disponibles. Por su parte los sistemas basados en aeronaves permiten una planificación más flexible, si bien el esfuerzo, coste y dificultad organizativa son superiores. Gracias a su mayor capacidad de permanencia en zona, el uso de HAPS en lugar de plataformas no tripuladas (tipo MALE) proporciona un ahorro en personal del 60 % [7], lo que supone reducir el coste por hora de vuelo al 15 % tomando como referencia una misión de 21 días de duración.

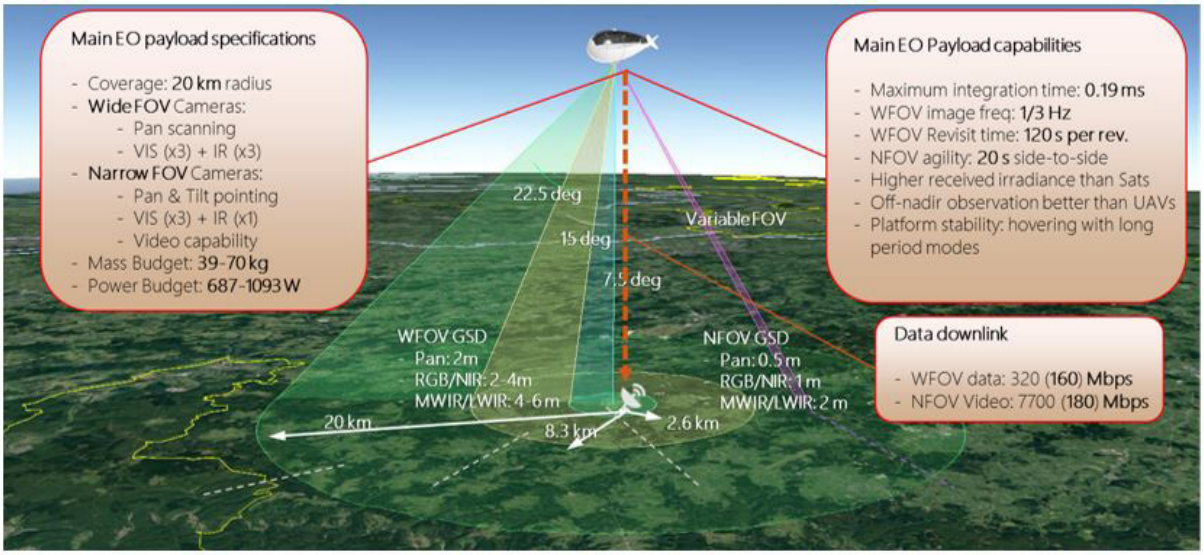


Figura 3. Arquitectura típica de red de observación basada en HAPS para un escenario táctico.

Se prevén al menos dos conjuntos de cámaras para lograr simultáneamente una vigilancia efectiva de una zona amplia y, al mismo tiempo, proporcionar imágenes de alto detalle de áreas específicas de menor tamaño. La vigilancia del área grande (con un radio de 20 km) se consigue mediante cámaras de amplio campo de visión (~90º) y una resolución moderada (< 2 m/píxel). Puesto que el área a cubrir es mucho más grande que el campo de visión instantáneo que se puede lograr razonablemente con una sola cámara, deben instalarse muchas o bien un sistema de escáner como el aquí propuesto (ver figura 3).

En situaciones que requieran la adquisición de imágenes y/o vídeo de muy alta resolución se pueden utilizar instrumentos con capacidad para apuntar al área de interés marcada por el operador. Esta solución, común en RPAS, permite la identificación en detalle y una monitorización continua de los elementos presentes en el teatro de operaciones. La estabilidad de la plataforma y su altitud permiten soluciones de gran resolución con cobertura amplia. La capacidad de zoom continuo permite elegir la combinación

más útil de campo y resolución, que puede ir de 1 a 25 grados. La resolución máxima del sistema puede ser de hasta 0,1 m/píxel cuando se utiliza la capacidad de zoom máxima. En tales condiciones, el campo de visión es limitado (~200 m en el terreno).

En cuanto a las bandas utilizadas, el MWIR es una opción estándar para imágenes a través de una atmósfera con un alto nivel de humedad (áreas marítimas), aunque una opción más simple (sin refrigeración) sería montar sensores LWIR personalizados para el seguimiento de humanos. Los filtros y los rangos dinámicos de las cámaras IR se adaptarán a la aplicación exacta. Por último, se pueden considerar sensores activos para un funcionamiento independiente de las condiciones meteorológicas. La opción más común es el radar de apertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*) ampliamente utilizado para la vigilancia marítima por muchas plataformas aéreas. No obstante, su utilización en HAPS puede requerir adaptaciones sustanciales para adaptarlo a su, generalmente, muy baja velocidad de vuelo.

3.3. Inteligencia de señales y guerra electrónica

Esta capacidad es especialmente reseñable en el caso de emplear plataformas con una elevada potencia eléctrica disponible. Al poder permanecer los HAPS a una altitud de 20 km sobra la zona de interés por periodos elevados, es posible recibir, procesar y analizar las señales radioeléctricas generadas por radares, aviones, buques, etc. en una amplia zona geográfica.

1. Configuración y limitaciones de las plataformas estratosféricas

Con principios de operación totalmente diferentes, son dos las plataformas capaces de operar como HAPS: dirigibles, más ligeros que el aire y capaces de generar la sustentación necesaria para volar gracias a su flotabilidad (aerostatos); aviones, generan la sustentación gracias a la interacción del flujo de aire con las alas (aerodinos). El proceso de diseño de estas plataformas se recoge de forma esquemática en la figura 4. A partir de la definición de la misión (altitud y velocidad de vuelo, radiación solar disponible y características de la carga de pago) se dimensionan los diferentes sistemas de la plataforma que permitan satisfacer los requisitos de misión, como se detalla en [1].

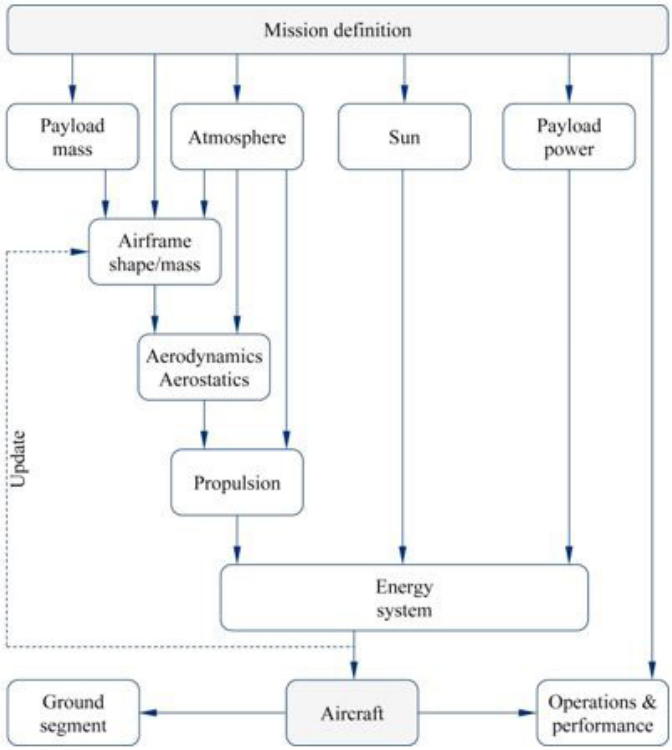


Figura 4. Flujo de información seguido para el diseño preliminar de un HAPS [1].

Mediante la aplicación de este proceso a los dos tipos de plataforma mencionados (avión y dirigible) es posible estudiar las características del diseño necesario para el desempeño de la misión asignada en cada caso. Un aspecto clave en este desarrollo es el tamaño de la plataforma, pues, en buena medida, determinan tanto la complejidad como el coste de operación y adquisición.

En la figura 5 a) y b) puede comprobarse cómo el tamaño necesario para la aeronave crece al hacerlo las cargas de pago, la altitud de vuelo o la latitud de operación. De esta forma resulta que para cargas de pago más pequeñas el avión es más competitivo, si bien aviones con envergaduras superiores a los 75 m aún no se han demostrado factibles por problemas estructurales. Esto limita la carga de pago máxima que pueden portar a unas pocas decenas de kilos en el mejor de los casos. Por su parte, los dirigibles requieren grandes tamaños (~100 m) incluso si no portan ninguna carga, solo para autosostenerse. Por el contrario, pequeños incrementos en su tamaño permiten conseguir ganancias sustanciales en la carga de pago que son capaces de transportar, pudiendo llegar hasta varios cientos de kilos de carga de pago sin modificaciones sustanciales en el diseño.

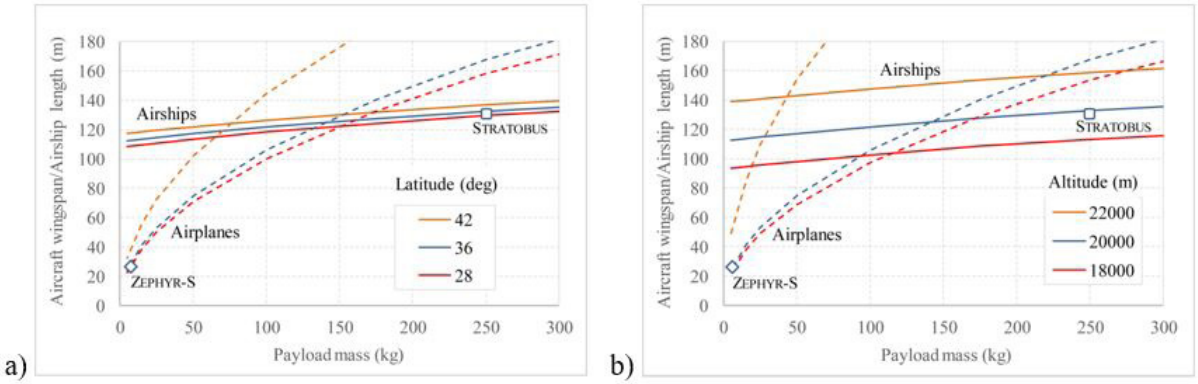


Figura 5. Tamaño de avión y dirigible necesario para volar con una cierta carga de pago a diferentes alturas o diferentes latitudes.

Aunque la constante mejora tecnológica en estructuras, propulsión y aerodinámica ha contribuido a la viabilidad del concepto de plataforma estratosférica, las figuras 6 a) y b) muestran que los componentes críticos están relacionados con la obtención y almacenamiento de la energía eléctrica necesaria. Así, si las capacidades de baterías y paneles fueran inferiores a las consideradas por los autores como realistas para el nivel tecnológico actual, directamente se cuestionaría la viabilidad del avión, obligando a disponer de envergaduras mucho mayores para la misma carga de pago. Esto es especialmente relevante en el caso de la capacidad de las baterías, mientras que el desarrollo de paneles más eficientes que los actuales conduce a mejoras únicamente marginales en los tamaños requeridos. Para los dirigibles la dependencia del tamaño con ambos factores es mucho menor, como muestra la proximidad entre las diferentes curvas.

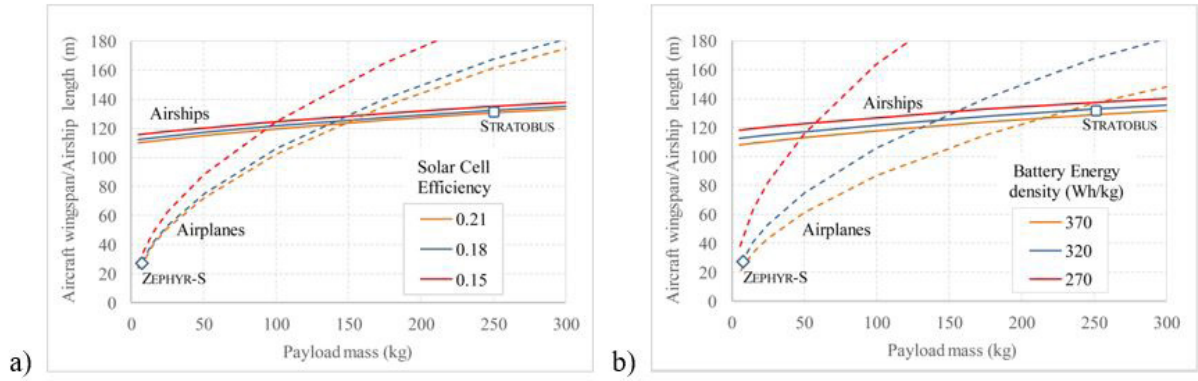


Figura 6. Tamaño de avión y dirigible necesario para volar con una cierta carga de pago empleando diferentes tecnologías de paneles solares y baterías.

Por su dependencia de la luz solar, cualquier plataforma HAPS dimensionada para operar en una cierta latitud disminuye rápidamente su capacidad a medida que dicha latitud de operación crece (figura 7). Esto es consecuencia fundamentalmente de la menor disponibilidad de radiación solar (horas de luz e inclinación) y limita de forma notable la capacidad del HAPS para operar en amplios territorios continentales de América del Norte, Europa y Asia, especialmente durante los meses próximos al solsticio de invierno.

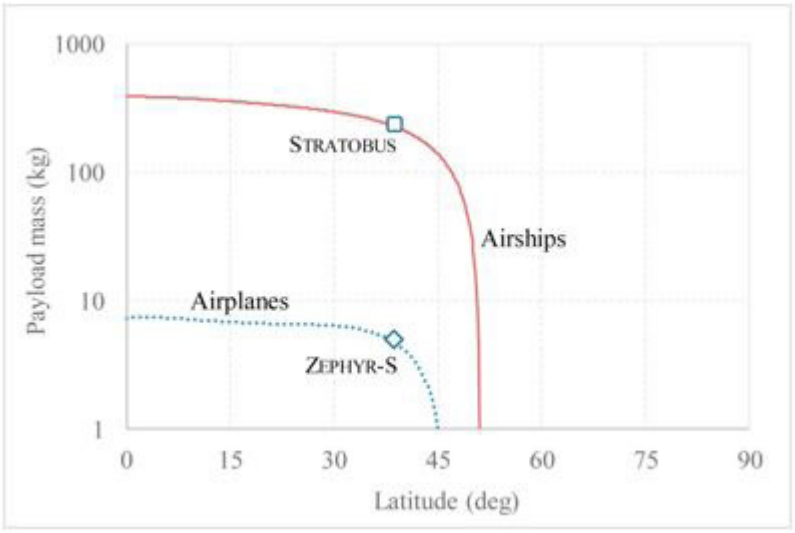


Figura 7. Capacidad de carga de pago para una plataforma HAPS operando a diferentes latitudes.

5. Conclusiones

Los HAPS han alcanzado un nivel de madurez tecnológica que permite asegurar su capacidad y adecuación para el desempeño de misiones de interés para la defensa. En este trabajo se han presentado dos aplicaciones potenciales en el ámbito de las comunicaciones y la observación de la Tierra en las que haciendo uso de tecnologías ya existentes se muestra la viabilidad de las soluciones propuestas.

Del análisis aquí realizado se desprende que, incluso produciéndose avances sustanciales en las tecnologías de captación y almacenamiento de energía eléctrica, no se espera que las capacidades de los HAPS (ya sean aviones o dirigibles, especialmente estos últimos) vayan a presentar modificaciones sustanciales. Esto hace que precisamente los análisis aquí recogidos puedan considerarse especialmente útiles en la toma de decisiones sobre la viabilidad y potencial futuro que presentan las plataformas estratosféricas.

Agradecimientos

Los autores quisieran expresar su agradecimiento al personal de la Agencia Espacial Europea que les confió la realización del proyecto HAPPIEST (AO 1–8464/15/NL/GLC) que ha servido como base de buena parte de los resultados recogidos en el presente trabajo y, de forma particular, al oficial técnico de la Agencia encargado del mismo.

Referencias

1. *Gonzalo J, López D, Domínguez D, García A, Escapa A. On the capabilities and limitations of high altitude pseudo-satellites. Prog. Aerosp. Sci.. 2018;98:37-56.*
2. *Batey A. Record Flight Showcases Zephyr Pseudosatellite Capabilities. Aviation week and space technology (McGraw-Hill Pub. Co.). 2018 Aug 14. Available from: http://m.aviationweek.com/*
3. *International Organization for Standardization, Standard Atmosphere, ISO 2533, 1975.*

4. *Lewis J, Sommer G, Porche IR. High-altitude airships for the future force army, Santa Mónica: RAND, 2005.*
5. *Sinko J. High altitude powered platform - a microwave powered airship, 3rd Lighter-than-air Systems Technology Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1979.*
6. *Fernández JA. 4G LTE, La nueva era de las comunicaciones tácticas. Instituto Español de Estudios Estratégicos, Documento de Opinión 87/2015, 2015.*
7. *Baxter T. Army Airships. U.S. Army War College, 2011.*

Tecnologías de control y coordinación de enjambres de RPA

Tcol. Aguirre Estévez, Fernando[1]

[1] Centro Logístico de Armamento y Experimentación, Ejército del Aire, Base Aérea de Torrejón, Carretera de Zaragoza s/n, 28850, email: faguest@oc.mde.es (FAE).

Resumen

Para que un enjambre de RPA pueda actuar coordinadamente, combinando su número para realizar misiones, los investigadores se encuentran con dos grandes dificultades. En primer lugar, cada aeronave remota debe volar en las inmediaciones de otros RPA sin colisionar con ellos. La segunda es mantener la topología del enjambre durante la misión para potenciar la acción cooperativa entre agentes/RPA.

Respecto al problema de las colisiones, lo más habitual es considerar al enjambre como un grupo descentralizado donde cada agente maniobra autónomamente para evitar colisionar con otros RPA cercanos. Mediante sucesivas simulaciones se puede determinar matemáticamente una zona de seguridad para cada RPA de tal modo que mientras se guarden estas distancias las colisiones prácticamente se eliminan. No obstante, esta zona de seguridad no es suficiente para mantener la cohesión del enjambre, siendo necesario estimar un parámetro de proximidad al centroide del enjambre, impidiendo de esta forma que los agentes se dispersen durante la misión y pierdan su eficacia sinérgica de apoyo mutuo entre RPA.

Asimismo, en el desempeño de ciertas misiones operativas se hace necesario disponer de una función que mida el grado de disgregación del enjambre, para lo cual se ha definido una función de entropía del enjambre, evaluando el número de estados posibles en cuando a número de vehículos remotos con velocidades diferentes tanto en módulo como en velocidad.

Otra técnica complementaria a tener en cuenta en la elusión de colisiones en enjambres es la navegación proporcional. Así, mediante el empleo de la velocidad de rotación del vector velocidad del agente, como proporcional a la velocidad de rotación de la recta de la aeronave remota con respecto al RPA cuya colisión se pretende evitar, se puede definir un algoritmo de evitación de colisiones manteniendo la topología del enjambre.

Palabras clave

Remotely Piloted Aircraft (RPA), enjambre, agente, navegación proporcional.

1. Introducción

Un enjambre puede definirse como un conjunto de RPA autónomos, que generalmente tienen su propia capacidad sensorial y comportamiento reactivo contra los elementos del entorno, y el resto de RPA, de modo que un comportamiento colectivo brota de la adición de la conducta de los RPA individuales.

Qué duda cabe que las líneas de investigación se centran en dotar a los RPA de cierto carácter autónomo, profundizando en el concepto de cooperación y colaboración entre individuos, con alto carácter de reciprocidad y ayuda mutua, donde el enjambre actúa como un ente colectivo. No obstante, primeramente resulta esencial resolver la cuestión de las colisiones, antes de integrar estos RPA autónomos en una estructura sincronizada, organizada e inteligente.

2. Desarrollo

El primer problema que se debe resolver en los enjambres de RPA es el de las colisiones, el cual se acentúa en la medida que aumenta el número de vehículos remotos que componen el enjambre. Esto conlleva una topología física del enjambre cada vez más compleja al igual que la red de comunicaciones que controla y coordina el propio enjambre.

Para que las aeronaves remotas del enjambre mantengan la separación se necesita disponer de alguna tecnología *Sense & Avoid* (S&A). La función Sense extrae la máxima información del elemento intrusor, para que posteriormente la función Avoid procese y analice estos datos, y decida si el objeto detectado supone algún peligro de colisión. Si el riesgo supera un umbral, el Avoid propone al piloto, situado en la GCS (*Ground Control Station*), una maniobra evasiva o bien esta actuación se ejecutará en modo autónomo si el piloto no se encontrara al mando en ese momento, por una pérdida de comunicaciones por ejemplo. Esto implica disponer de sensores apropiados que alerten de la presencia de obstáculos y por otra parte de recursos computacionales suficientes.

Sin embargo, estos dispositivos S&A, aún en desarrollo, necesitan de elementos complejos que demandan gran volumen y peso, además de consumos excesivos y antenas voluminosas, lo que los hace solo aptos para grandes RPA. Para los pequeños se trabaja en otras alternativas consistentes en que cada agente conozca la posición en el espacio del resto de aeronaves remotas del enjambre (técnicas de localización) y maniobre autónomamente para evitar chocar con los más cercanos. Esto se conseguiría si los RPA se comunican a través de una red de comunicaciones segura, siendo esencial aquella información que evita las colisiones, como una señal de control coordinación transmitida por cada agente al resto del enjambre.

A este respecto, se debe considerar la investigación realizada por el KAIST (*Korea Advanced Institute of Science and Technology*), que simuló la conducta de un enjambre en que cada RPA tenía que guardar la distancia con los otros agentes, siendo la conclusión principal de este análisis que una zona de seguridad para cada RPA con una longitud comprendida entre 5 y 15 veces el tamaño promedio del vehículo remoto es suficiente para impedir las colisiones en su mayor parte.

Indudablemente, para el vuelo en formación de un enjambre se necesita especificar una topología de enjambre (figura 1; anillo, estrella, malla, etc.) y mantener las distancias entre los RPA dentro de los valores definidos anteriormente, al objeto de eludir las colisiones.

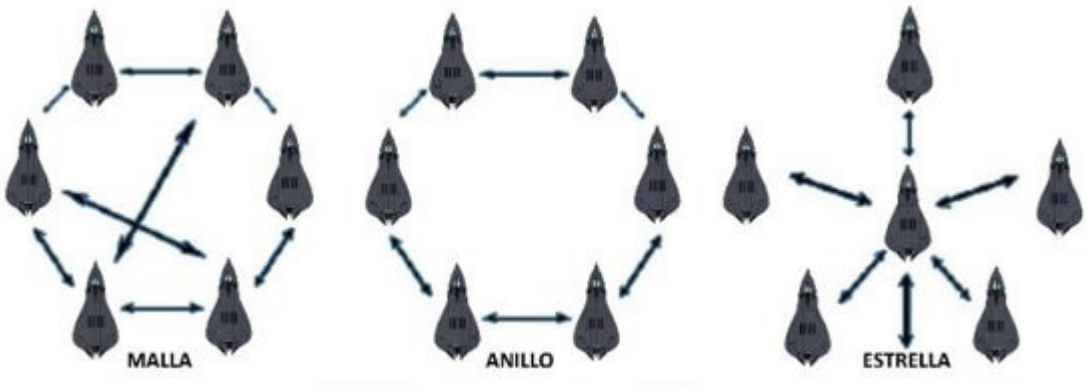


Figura 1. Topología del enjambre (malla, anillo, estrella).

2.1. Algoritmo de elusión de colisiones

A continuación, se expone el algoritmo de elusión de colisiones planteado en este análisis, donde cada RPA del enjambre se modeliza como un cuerpo puntual de masa constante sujeto a una fuerza total compuesta por la fuerza gravitatoria, la fuerza aerodinámica y la fuerza propulsiva. Se considera que el movimiento del enjambre se va a desarrollar principalmente en planos horizontales paralelos al suelo, siendo el movimiento en el eje z un orden de magnitud inferior comparado con los de los ejes x e y, lo cual es una hipótesis plausible en misiones operativas que se desenvuelven a una cierta altura en la zona de conflicto, como por ejemplo la misión de saturación de defensas.

Una vez que cada RPA conoce la posición del resto de agentes del enjambre, cada RPA maniobrará de forma autónoma para evitar colisionar con los más cercanos. Para ello, se monta un bucle que comprende todos los RPA y se calculan las distancias al resto de agentes del enjambre, ligando a cada RPA la distancia mínima al agente más cercano. Cuando esta distancia disminuye de un cierto valor, que se ha denominado factdecv*tam (factor de decisión por tamaño promedio del RPA), este agente gira de acuerdo a la velocidad angular de viraje ($\dot{\xi}$), extraída de la mecánica del vuelo del RPA, evitando la colisión, de este modo.

Se toma una referencia angular y se calculan dos ángulos para cada RPA. El primero formado por el vector velocidad (V) y el vector (A) con respecto a la referencia angular. El vector A es aquel que parte del RPA en cuestión (origen) y apunta al RPA más cercano. Para que este RPA origen se aleje del RPA más cercano, el ángulo entre el vector V y el vector A tiene que aumentar sin sobrepasar π radianes.

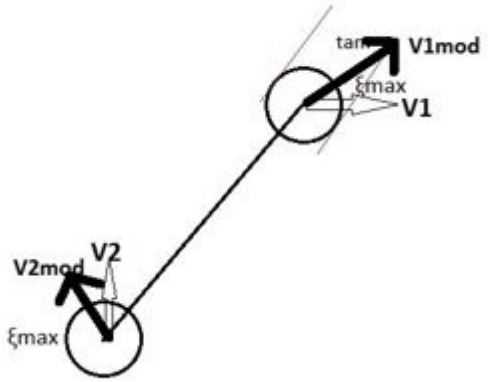


Figura 2. Esquema de ángulos para dos RPA que se acercan.

Adicionalmente a lo anterior, si aun girando con la velocidad angular de viraje, ambos RPA siguen acercándose con riesgo de colisión, opera el segundo algoritmo que decelera el agente con una deceleración constante extraída de la mecánica del vuelo del RPA. Esto ocurre cuando la distancia disminuye de factdeca*tam.

Con los dos algoritmos, indicados previamente, se han efectuado sucesivas simulaciones con éxito evitando las colisiones. Pero ahora otro problema se manifiesta al objeto de que el enjambre no se disgregue y disperse por el espacio aéreo perdiendo sinergia. Para ello, se introduce otro factor que se ha denominado factMmmm*tam, que lo que hace es que el RPA, al alejarse por encima de este factor, gira de acuerdo a la velocidad angular de viraje ($\dot{\xi}$), regresando hacia el enjambre, concretamente hacia un punto que se ha llamado centroide del enjambre.

Análogamente, se monta un bucle para todos los RPA y se calculan las distancias de todos los agentes al centroide del enjambre. Cuando esta distancia aumenta por encima de factMmmm*tam, el RPA gira de acuerdo a la velocidad angular de viraje ($\dot{\xi}$), dirigiéndose al centroide del enjambre. En este sentido, este centroide es un punto representativo del enjambre, alrededor del cual se desplazan todos los RPA. Si bien podría considerarse un punto análogo al centro de masas de un sistema, el centroide no es tan taxativo sino que más bien es un punto que identifica el enjambre y que conocido permite estimar la posición de todos los RPA del enjambre. De hecho, cuando el piloto toma el control del enjambre, el elevado número de vehículos remotos hace imposible pilotar cada uno de estos agentes individualmente y ahí es donde el centroide es especialmente útil ya que el piloto podría pilotar este centroide como si fuera un avión. Evidentemente, por la propia definición de estos factores se tiene que cumplir la siguiente relación factMmmm≥factdecv≥factdeca.

Análogamente, se toma una referencia angular y se calculan dos ángulos para cada RPA. El que forma el vector velocidad (V) y el que forma el vector (B) con respecto a la referencia angular. El vector B es aquel que parte del RPA origen y apunta al centroide. Para que este agente se acerque al centroide, el ángulo entre el vector V y el vector B tiene que disminuir.

Asimismo, se admite que el sistema de control de cada RPA tiende a mantener una velocidad de crucero constante. De esta manera, si no hay riesgo de colisión, el algoritmo evalúa la velocidad en cada paso de tiempo y si es inferior a su velocidad de crucero, se acelera con una aceleración constante extraída de la mecánica del vuelo del RPA, pero sin sobrepasar la velocidad de crucero. De cualquier forma, el vehículo remoto no podrá descender de la velocidad de entrada en pérdida.

En las simulaciones realizadas, se ha considerado un enjambre formado por ocho vehículos remotos, al objeto de no enmarañar excesivamente las simulaciones y obtener conclusiones relevantes del comportamiento global. En cuanto a la configuración inicial del enjambre se ha supuesto que este se desplaza en formación hasta la zona de conflicto, a una cierta altura sobre el suelo, y en el tiempo t=0 se acomete la maniobra operativa. El centroide se localiza en el centro geométrico del enjambre. Se ha tomado un tamaño promedio de RPA de 1 metro, aceleración de 5 m/s^2, deceleración de 1,5 m/s^2, tiempo de trayectoria de 60 segundos, paso de tiempo de 0,2 segundos, velocidad de crucero (velcru m/s) y velocidad angular de viraje (velang, grados/segundo). Para dos dimensiones se adjuntan algunos de los resultados obtenidos:

Figura 3. Enjambre inicial.

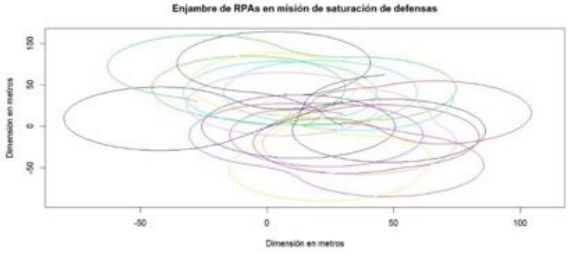


Figura 4. velcru=10, velang=15, factdeca=7, factdecv=10.

Figura 5. velcru=15, velang=15, factMmmm=15.

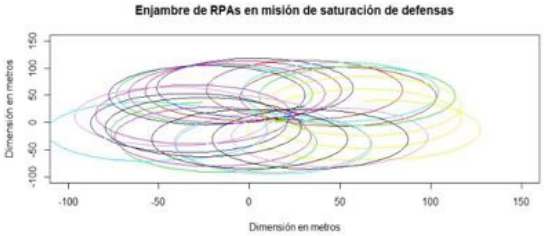


Figura 6. velcru=17, velang=18.

Como conclusión principal se extrae que el área barrida por los RPA del enjambre aumenta al incrementarse la velocidad de crucero, aumentar factMmmm o al disminuir la velocidad angular de viraje, siendo menos sensible a factdeca y factdecv.

2.2. Entropía del enjambre

Esta tecnología tiene una clara aplicación a misiones operativas donde los teatros operacionales futuros demandarán técnicas de engaño y decepción de los sistemas defensivos enemigos, empleando RPA, misiles crucero, o una mezcla de ambos, que simulen aviones, de tal modo que saturen las defensas enemigas, con numerosos blancos económicos a los que derribar, gastando caros misiles, o simplemente provocando a los radares que se conectarán y así podrán ser localizados y anulados. Estos RPA o bien misiles crucero, pueden hacerse pasar por aviones mayores, incrementando su firma radar RCS (*Radar Cross-Section*) mediante paneles que reflejen las ondas del radar de modo que puedan confundirse con algún tipo de avión de mayor tamaño.

Así, un enjambre desempeñando una misión operativa necesitará generar el mayor efecto saturador, degradativo y neutralizante posible en el sistema defensivo enemigo, potenciando el desconcierto, la confusión, la decepción y el colapso. Indudablemente, un elevado número de RPA produciría más confusión que un número bajo. Pero aunque el número de RPA fuera alto, si todos los agentes tuvieran la misma velocidad en dirección y módulo, es claro que el desconcierto generado sería muy similar a un único RPA. Por tanto, este efecto se potenciará cuanto más RPA haya volando a la vez sobre el espacio aéreo enemigo, con velocidades muy diferentes tanto en módulo como en vector.

Esto provoca la necesidad de definir una función de entropía del enjambre, como el número de estados posible en términos del vector velocidad, que refleje para el caso de enjambres, el número de RPA con velocidades diferentes. Brevemente, para cada dimensión espacial se toma el menor y el mayor valor de cada componente de la velocidad de todos los RPA del enjambre. Para dos dimensiones, $V_{RPAxmenor}<V_{RPAix}<V_{RPAxmayor}$ y $d_{RPAx}=(V_{RPAxmayor}-V_{RPAxmenor})$/número RPAS, con los sucesivos intervalos $[V_{RPAxmenor}+n\cdot d_{RPAx}, V_{RPAxmenor}+(n+1)\cdot d_{RPAx}$ [(análogamente para la componente y), se contabiliza el número de RPA cuya velocidad correspondiente pertenece a cada intervalo. La función índice de entropía de cada intervalo (IEI) toma el valor 1 si al menos la velocidad de un RPA pertenece a dicho intervalo y toma el valor 0 si no existe RPA alguno cuya velocidad pertenezca al intervalo correspondiente.

Obviamente el número de intervalos existentes será 2 veces el número de RPA (1 vez por la componente x y otra vez por la componente y). Sumando para todos los intervalos (que son 2 veces el número de RPA) la función IEI, se obtiene la función entropía del enjambre (EE): EE=$\sum$*2·número de RPAS*) *IEI*. Por su propia definición 0≤EE≤2·*número* de *RPAS*, definiendo el factor de entropía del enjambre como fEE=EE/(2·*número* de *RPAS*), con lo que 0≤fEE≤1. A continuación, puede verse una representación de los resultados obtenidos:

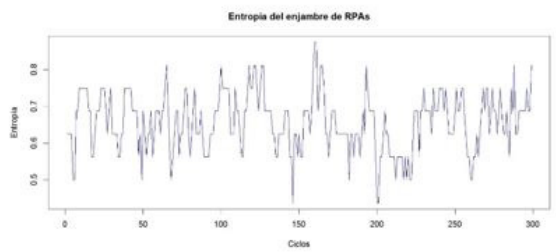


Figura 7. velcru=4.

Figura 8. velcru=17.

2.3. Navegación proporcional en el vuelo en formación de un enjambre de RPA

La aplicación de la navegación proporcional al vuelo en formación de un enjambre de RPA se basa en que un RPA que no sea el líder del enjambre sigue a otro RPA sin colisionar con él. Esta técnica es especialmente útil en vuelo en formación, evitando la colisión del RPA seguidor tanto con el RPA al que sigue del propio enjambre como con otras aeronaves, así como con obstáculos que se encuentren en el espacio aéreo. En un enjambre, los RPA varían su posición en todo momento con lo cual no adoptan posiciones fijas sino temporales. De este modo, en el vuelo en formación la posición de cada RPA varía aunque el enjambre conserve su aspecto habitual.

Mediante los sensores de trayectoria se constituye el bucle de guiado, cuya misión es variar la trayectoria de manera que el RPA seguidor siga al RPA seguido, conforme a la ley de guiado. Utilizando el método del sistema adjunto de Laning y Battin, basado en el uso de la respuesta al impulso de los sistemas lineales, el sistema adjunto se forma invirtiendo el flujo de la señal en el sistema original y midiendo los tiempos con relación a un tiempo de vuelo t_F, de forma que el tiempo es el complemento al tiempo final, $\theta = t_F - t$.

Considerando en un sistema de autoguiado con navegación proporcional (la velocidad de rotación del vector velocidad del RPA seguidor es proporcional a la velocidad de rotación de la recta RPA seguidor – RPA seguido, $\dot{\eta}$) las siguientes causas de perturbación con entrada escalón: una maniobra del RPA seguido, con aceleración Γ_b o un error en la puntería inicial $\Delta\delta_{mc}$.

$$\Gamma_{co} = \left(\mathrm{N}v_r\dot{\eta} - \mathrm{k}_m\Gamma_{ej} + \mathrm{k}_b\Gamma_b\right)$$

$$N = \frac{6\xi^2\left(\xi - 1 + e^{-\xi}\right)}{\frac{6\lambda}{\mu\tau_1^3} + 2\xi^3 - 6\xi^2 + 6\xi + 3 - 12\xi e^{-\xi} - 3e^{-2\xi}}$$

$$k_m = \frac{1}{\xi^2}\left(\xi - 1 + e^{-\xi}\right)$$

$$k_b = \frac{1}{\xi_b^2}\left(\xi_b - 1 + e^{-\xi_b}\right)$$

$$\xi = \frac{\theta}{\tau_1} = \frac{(t_F - t)}{\tau_1}$$

$$\xi_b = \frac{\theta}{\tau_b} = \frac{(t_F - t)}{\tau_b}$$

$$\dot{x}_1 = \mathrm{x}_2$$

$$\dot{x}_2 = \mathrm{x}_3$$

$$\dots$$

$$\dot{x}_{n-1} = \mathrm{x}_n$$

$$\dot{x}_n = [-\mathrm{x}_{n+2} - k_m\mathrm{N}\mathrm{x}_1 - \mathrm{x}_1 - \tau_1\mathrm{x}_2 - \cdots - \tau_{n-1}\mathrm{x}_n]\frac{1}{\tau_n}$$

$$\dot{x}_{n+1} = \frac{N}{\theta^2}\mathrm{x}_1$$

$$\dot{x}_{n+2} = \mathrm{x}_{n+1} + \frac{N}{\theta}\mathrm{x}_1$$

$$\dot{x}_{n+3} = \mathrm{x}_{n+2} + k_b\mathrm{N}\mathrm{x}_1$$

Y aplicando el principio del máximo de Pontriaguin y el método del sistema adjunto se obtiene el autoguiado con ley optimal. Emplear un coeficiente de navegación proporcional constante no es óptimo sino que se tiende a un coeficiente variable, de manera que se optimice algún parámetro como la distancia entre RPA o la energía.

v_r es la velocidad relativa entre ambos RPAs, Γ_{co} la aceleración comandada y Γ_{ej} la aceleración ejecutada del seguidor. La resolución del problema se ha planteado en función del tiempo de vuelo θ y la constante de tiempo τ_1 como aproximación de primer orden. Si las constantes de tiempo fuesen nulas, su respuesta sería inmediata con lo que las constantes de tiempo introducen un retraso en la ejecución de las órdenes. La constante τ_b se corresponde a la aproximación de primer orden de la función de transferencia del RPA seguido. Si $\lambda=0$, únicamente se optimiza la distancia entre RPA. Las condiciones iniciales son $x_i=0$ *si* $i\neq n+1$, $x_{n+1}=1$. Las variables de salida son: x_{n+2} para la distancia entre RPA por error de puntería, y x_{n+3} para la distancia por maniobra del RPA seguido.

El movimiento del RPA seguido se puede aproximar como una combinación de escalones unitarios (1 m/s^2). Se aplica el método del sistema adjunto de Laning y Battin, y se transforman las entradas escalón en entradas impulso mediante una integración. De esta manera, mediante una única curva se obtiene la distancia entre el RPA seguidor y el RPA seguido en función del tiempo. Finalmente, para el vuelo en formación de un enjambre también se deben tener en cuenta las reglas establecidas por Reynolds complementadas con las de Olfati-Saber.

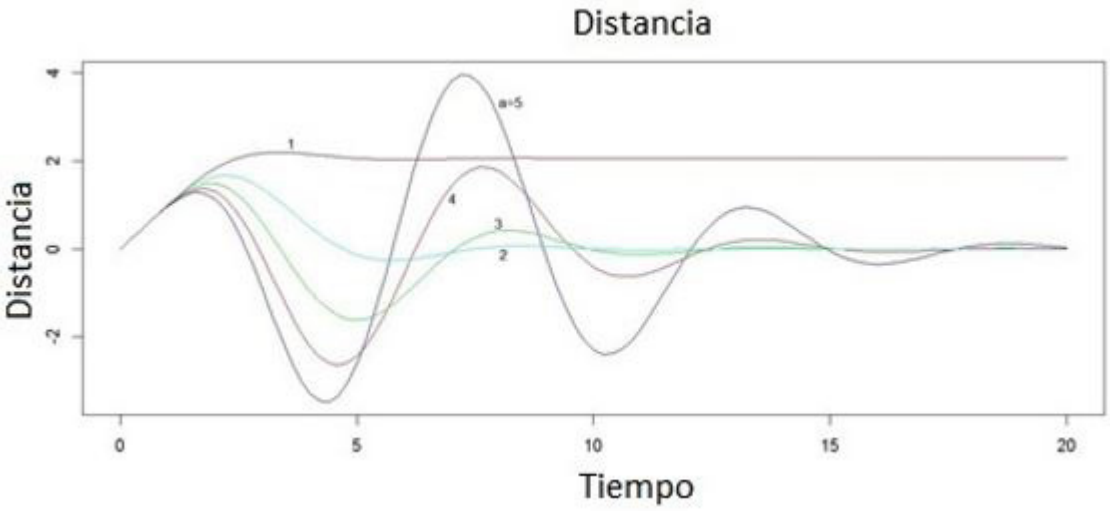


Figura 9. Bucle pilotado (orden 5). Distancia de maniobra del RPA seguido con escalón unidad.

3. Conclusiones

Un enjambre de RPA es mucho más que una agrupación de individuos, al ser capaces estos aparatos de organizarse, integrarse y sincronizarse bajo el paraguas de la inteligencia artificial, pero previamente deben resolverse otras cuestiones previas, como el problema de las colisiones.

Para ello, partiendo de los postulados de Reynolds y el KAIST, en este trabajo se ha implementado un algoritmo de elusión de colisiones mediante la definición de tres variables de decisión (factdeca, factdecv y factMmmm). Las dos primeras hacen maniobrar al RPA cuando algún otro agente se le acerque peligrosamente, mientras que la tercera evita que el enjambre se disperse y disgregue.

Por otra parte, para que el enjambre aumente el efecto degradante, saturador y neutralizante sobre el sistema defensivo enemigo, potenciando así la confusión, decepción, desconcierto y colapso, cada RPA del enjambre debe desenvolverse de manera diferente respecto al resto de vehículos remotos, siendo la velocidad de cada RPA diferente de la del resto. Ello ha motivado la necesidad de definir una función de entropía del enjambre, concebida como el número de estados posible en términos de velocidad de cada uno de los RPA del enjambre.

La navegación proporcional es otra técnica empleada de evitación de colisiones manteniendo la distancia y el orden entre los RPA del enjambre, pero a diferencia de la técnica anterior, la navegación proporcional resulta más apropiada para mantener el vuelo en formación que para acometer misiones operativas complejas.

Agradecimientos

A mi mujer Marisa su labor de revisión de los borradores, su ayuda, compresión y paciencia.

Referencias

1. *Chang-Su Park, Min-Jea Tahk & Hyochoong; Bang Multiple Aerial Vehicle Formation Using Swarm Intelligence; Korea Advanced Institute of Science & Technology (KAIST); 2003.*

2. *Chen Shi-Ming y Fang Hua-Jing, Modelling And Stability Analysis of Emergent Behavior of Scalable Swarm System, Department of Control Science And Engineering, Huazhong University of Science And Technology, Wuhan, School of Electrical And Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, 2006.*
3. *Dustin J. Nowak, Exploitation of self organization in UAV swarms for optimization in combat environments, Thesis, Air force institute of technology, Wright Patterson, 2003.*
4. *F. Aguirre, Investigación de enjambres. Bengalas y nano-RPA, Revista de Aeronáutica y Astronáutica, mayo 2018.*
5. *Gilles Labonté, Self organization of formations and swarms, Royal Military College, Kingston, Ontario, 2010.*
6. *H. Van Dyke Parunak y Sven A. Brueckner, The Cognitive Aptitude of Swarming Agents, Vector Research Center of TTGSI, Ann Arbor, 2017.*
7. *James T. Lotspeich, Distributed control of a swarm of autonomous unmanned aerial vehicles, Thesis, Air force institute of technology, Wright Patterson, 2003.*
8. *Joshua J. Corner, Swarming reconnaissance using unmanned aerial vehicles In A Parallel discrete event simulation, Thesis, Air force institute of technology, Wright Patterson, 2004.*
9. *Kevin M. Milam, Evolution of control programs for a swarm of autonomous unmanned aerial vehicles, Thesis, Air force institute of technology, Wright Patterson, 2004.*
10. *Marco Mamei, Franco Zambonelli y Letizia Leonardi, Co-Fields: an Adaptive Approach for Motion Coordination, Università di Modena e Reggio Emilia, 2005.*
11. *Mini, Micro, and Swarming UAVs: a baseline study; Library of Congress - Federal Research Division; Washington, D.C.; 2006.*
12. *Robert W. Chalmers, David H. Scheidt, Todd M. Neighoff, Stephan J. Witwicki y Robert J. Bamberger, Cooperating Unmanned Vehicles, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago, 2004.*
13. *Shripad Gade y Ashok Joshi, Heterogeneous UAV Swarm System for Target Search in Adversarial Environment, Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Technology Mumbai, 2013.*
14. *Su-Cheol Han y Hyochoong Bang, Proportional Navigation-Based Optimal Collision Avoidance for UAVs, 2d International Conference on Autonomous Robots and Agents, December, Palmerston North, New Zealand, 2004.*
15. *Tecnologías asociadas a sistemas de enjambres de µUAV; Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional; Ministerio de Defensa; 2012.*

Diseño y desarrollo de un RPAS categoría MALE para misiones de inteligencia, vigilancia, detección de blancos y reconocimiento

Cuadrón Ferrandis, Carlos[1], Cantero Obregón, Antonio[2]

[1] Academia de Aviación del E.T. (Acaviet). Teniente Cuerpo de Ingenieros Politécnicos del Ejército de Tierra.

[2] Ejército de Tierra. Calle Joaquín Costa, 6. 28002- Madrid. acanobr@oc.mde.es

Resumen

El contexto político-social que nos encontramos, unido a la globalización y la supresión de fronteras, obliga a lidiar en contiendas que estallan en zonas donde la paz pende de un hilo. Por otro lado, la necesidad de los estados de controlar sus territorios, de proteger las tropas desplegadas, la lucha continua en una nueva guerra asimétrica que nos pone a prueba y de la que aprendemos día a día, hace que se sitúe en la cúspide del desarrollo tecnológico a las aeronaves no tripuladas RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*). Estas nos permiten llevar a cabo los objetivos marcados sin pagar el gran precio del capital humano.

El objeto del artículo es describir el análisis y desarrollo de una aeronave no tripulada de gran autonomía de altitud media RPAS MALE (*Medium Altitude Long Endurance Remotely Piloted Aircraft System*), clase III, para misiones de inteligencia, vigilancia, detección de blancos y reconocimiento. Se estudia la aerodinámica de la aeronave tanto analíticamente como computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*), el diseño exterior en tres dimensiones 3D, así como la selección de diferentes sistemas de propulsión y vigilancia.

La utilización de RPAS no es nueva en el ámbito militar, tanto como blanco móvil como para la obtención de imágenes aéreas. Ha sido la evolución de la ingeniería en el campo de I+D y el sustancial cambio de mentalidad, lo que nos lleva al empleo en el ámbito de defensa de estas aeronaves no tripuladas y la mejora en autonomía y alcance.

Palabras clave

RPAS, RPAS MALE, aeronaves no tripuladas, *Remotely Piloted Aircraft Systems*, *Medium Altitude Long Endurance Remotely Piloted Aircraft System*.

1. Introducción

Debido al clima político-social actual, donde la globalización y la apertura de fronteras tiene que lidiar con las contiendas continuas que estallan en zonas donde la paz pende de un hilo, la necesidad global, por parte de los estados, para controlar sus territorios y proteger a las tropas desplegadas en zonas de conflicto sin poner en riesgo capital humano, pone en el centro del desarrollo tecnológico actual las aeronaves no tripuladas.

Este tipo de aeronaves sobrepasa ampliamente las capacidades técnicas de cualquier otro aparato de capacidades similares, pues no pone en riesgo capital humano alguno dentro del mismo y permite no ver limitadas sus características por no establecer un entorno habitable que permita el pilotaje, *in situ*, de la aeronave.

En el actual contexto de desarrollo militar, es el periodo de la historia donde más se protege la vida de los combatientes involucrados en misiones que conlleven cierto riesgo, el brindar a estos de un apoyo ISR por medio de sistemas UAS, puede significar la diferencia entre el cumplimiento o el fracaso de una misión.

Analizando cada término, las capacidades de transmisión de inteligencia, ya sea funcionando como enlaces de comunicaciones, como sistemas de escolta o como sistemas de reconocimiento avanzado, desde estos sistemas de apoyo hacia centros de mando y control, o directamente a los equipos en tierra, son clave para la mejora significativa en la efectividad militar en comparación con equipos sin dichos sistemas de soporte.

Fuera ya de las aplicaciones de carácter militar, el reciente clima político presente en Europa y EE. UU., donde las corrientes migratorias desde zonas más desfavorecidas han provocado y, están provocando, que los países tomen el control de sus fronteras. Estos han encontrado en los sistemas UAS[1] un aliado perfecto para dicho control ya que, en el caso de las aplicaciones militares, podemos tener todos los beneficios de las aeronaves actuales sin las penalizaciones del requerimiento de ser pilotadas físicamente, tales como la fatiga del piloto, el peso extra de la tripulación o la necesidad de crear una atmósfera que permita el pilotaje.

No obstante, existen otras limitaciones nuevas, tales como la vulnerabilidad de los aparatos a las interferencias de comunicaciones. Es obvio que, aunque el sistema perfecto no exista, actualmente las industrias militar y civil prevén un incremento sustancial en la cuota de mercado de dichos aparatos. Por ello, es de vital importancia avanzar sustancialmente en el estudio y desarrollo de este tipo de tecnología.

Así pues, en el transcurso de este proyecto se va a aportar una visión preliminar al diseño de un sistema UAS MALE con alcance global y capacidades técnicas, que, teniendo siempre en cuenta las limitaciones existentes en el proceso de diseño, pueda satisfacer los requisitos en cuanto al cumplimiento de misiones reales ISR que puedan ser requeridas a aeronaves similares ya existentes en la industria. Además de ser

1 *Unmanned Aircraft Systems*.

capaz de cumplir misiones ISR, también se le requerirá el cumplimiento de misiones de carácter civil, tales como control fronterizo.

2. Desarrollo

En la realización de este artículo, comenzamos con una detallada comparativa de una gran cantidad de aeronaves de esta categoría, las cuales han sido sustancial y extensamente probadas en misiones donde queremos que el presente RPAS[2] trabaje: específicamente la altitud de vuelo, el radio de acción, la autonomía y la velocidad de crucero. Con esto conseguimos una orientación y horizonte donde llegar en nuestro estudio y diseño.

Tras este estudio comprobamos que la aeronave tiene que conseguir alcanzar características principales dentro de los siguientes márgenes:

- Altitud de vuelo entre 7.500 y 12.500 m
- Radio de acción mayor de 1.500 km
- Autonomía entre 10 y 40 horas
- Velocidad de crucero entre 150 y 250 km/h.

Una vez obtenemos estas, tomamos unas pautas estipuladas por *Jay Gundlach,* en el libro *Designing Unmanned Aircraft Systems* [2] para la definición de requisitos. Según el autor se debe seguir las siguientes pautas a la hora de definir una aeronave: estimar el rendimiento aerodinámico [L/D], estimar la carga alar [W/S] y estimar los parámetros de propulsión. Para ello realizamos una estimación de un rendimiento aerodinámico de veinte; la carga alar la hemos calculado mediante comparativa de aparatos de la misma categoría; y el motor elegido es un motor Rotax 914 el cual es utilizado en varios RPAS como el MQ-1 Predator.

El siguiente paso que hemos abordado es el dimensionado y modelado 3D mediante programas extensamente conocidos en el mundo aeronáutico como CATIA® V5 de Dassault Systems® y Fluent® de ANSYS® para el estudio preliminar de las condiciones aerodinámicas. Para ello hemos hecho un breve seguimiento de las infinitas configuraciones que existen, tomando una como buena hemos desarrollo sus partes: alas, fuselaje (costillas, mamparos, larguerillos, etc.), y en cuanto a la cola decidimos realizar un tipo llamado *Twin-Boom Tail* ya que nos permite la aligeración de la estructura a base de reducir fuselaje central a costa del alargamiento de la cola situándola detrás del motor, lo que nos produce una renergización de la corriente, aumentando así el rendimiento de las superficies de control. Es destacable resaltar la elección de dos perfiles para las superficies en relación a unos números de Reynolds de 500.000 a 1.000.000 tanto el NACA 4415 para las alas como el NACA 0012 para las superficies de control así como la obtención de sus coeficientes aerodinámicos a partir de las distintas curvas, como la polar. Con la elección a su vez de los materiales CFRP[3] y aluminio hemos podido realizar una estimación del peso en vacío de nuestra aeronave y una comprobación de las fuerzas aerodinámicas mediante CFD[4].

Fuerzas Aerodinámicas	
Sustentación	10.165 N
Resistencia	521 N
Peso en Vacío	8.672 N

Figura 1. Fuerzas obtenidas por la simulación CFD de la aeronave. Fuente propia.

Por otro lado, tras la elección de los diferentes elementos que nos quedaban como la cámara para misiones ISR DCoMPASS, el combustible AVGAS 100LL y la hélice Warp-Drive 3 Blade con su correspondiente estudio de los regímenes de funcionamiento del motor según la posición de gases, calculando así el empuje disponible según altitud, velocidad como el paso de palas.

---

2 *Remotely Piloted Aircraft System*.
3 *Carbon Fiber Reinforced Polymer.*
4 *Computational Fluids Dynamics*.

Utilizando la fórmula (1) obtenemos el empuje necesario para MTOW[5], OEW[6] y MFW[7], en función de las diferentes velocidades de vuelo y altitud.

$$Epuje\ Necesario = \frac{1}{2}\rho V^2 C_{D_o} + \frac{1}{\pi \cdot A \cdot e} \cdot \frac{W^2}{\frac{1}{2} \cdot \rho V^2 \cdot S} \qquad (1)$$

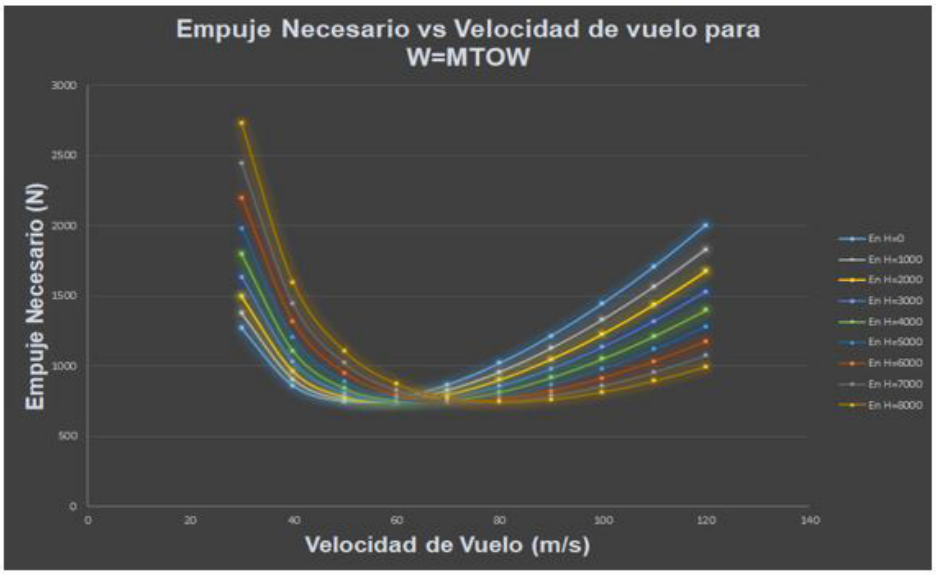


Figura 2. Empuje necesario en función de la altura y la velocidad para MTOW. Fuente propia.

Es conveniente citar el estudio aerodinámico realizado mediante el método Vortex Lattice como mera comprobación de los resultados obtenidos, así como el centro aerodinámico del ala y la polar del avión.

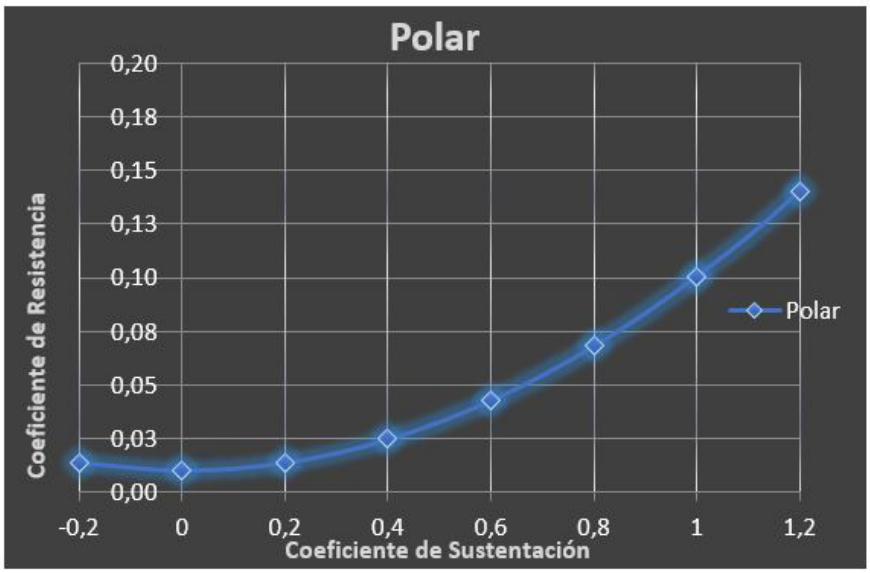


Figura 3. Polar de la aeronave. Fuente propia.

5 *Maximum Takeoff Weight.*
6 *Operating Empty Weight.*
7 *Maximum Fuel Weight.*

Una vez llegados a este punto, lo más importante es definir la envolvente de vuelo. El método utilizado se basa en la realización de la intersección de las gráficas calculadas anteriormente. Al realizar la intersección de la curva de empuje necesario con su respectiva curva de empuje disponible obtendremos una campana que describirá la envolvente de vuelo.

Determinada la envolvente de vuelo, le aplicamos un parámetro corrector según el factor de la velocidad de pérdida de la aeronave. Obteniendo así la envolvente de vuelo verdadera de nuestra aeronave realizado para los tres tipos de pesos: MTOW, OEW y MFW.

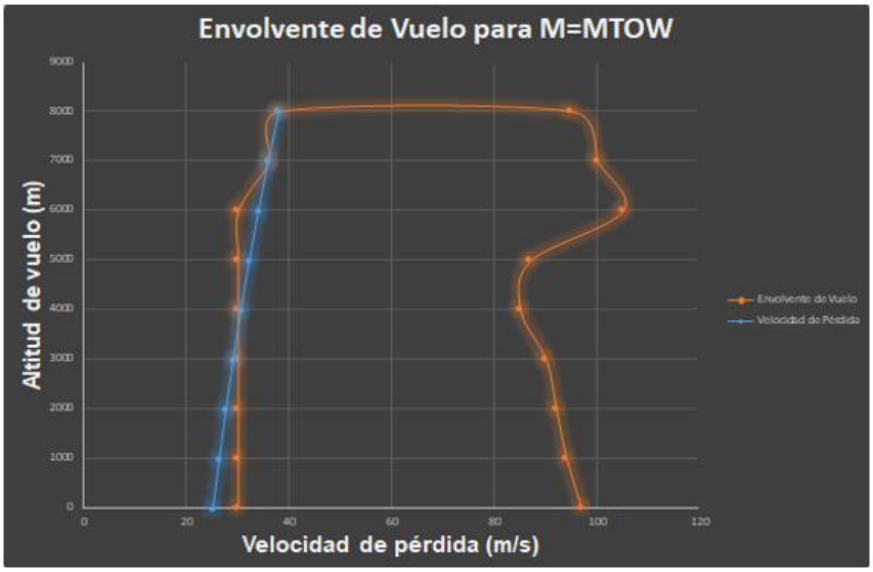


Figura 4. Envolvente de vuelo para MTOW. Fuente propia.

Cabe resaltar el cálculo de diferentes características de nuestro aparato como el techo de vuelo, la velocidad de subida, radio de acción y autonomía. Deteniéndonos en esta última, hemos utilizado la formula (2):

$$E = \frac{\eta}{4 \cdot C_{min}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot S} \cdot \left(\frac{3 \cdot \pi \cdot A \cdot e}{C_{D_o}}\right)^{\frac{3}{4}} \cdot \left[WTO^{\frac{1}{2}} - (WTO - WF)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (2)$$

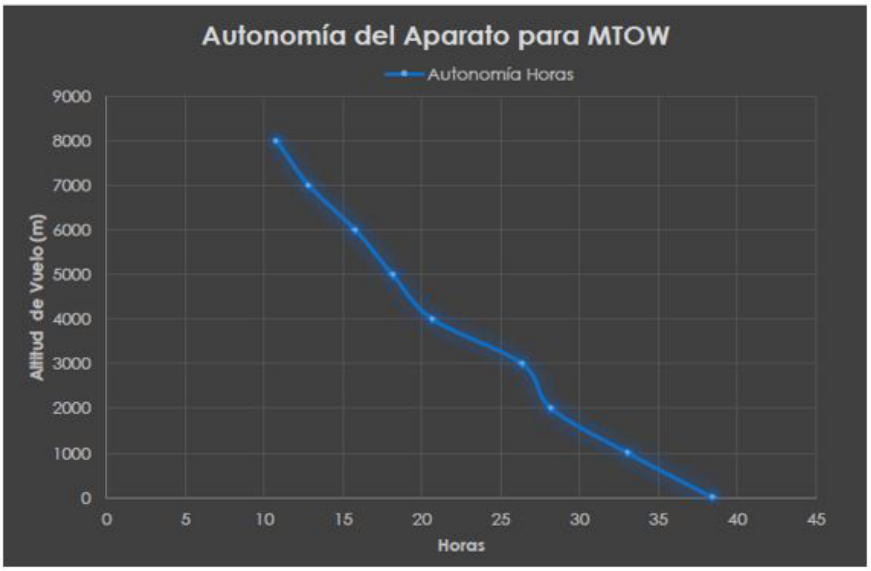


Figura 5. Autonomía de la aeronave para MTOW. Fuente propia.

El siguiente paso ha sido realizar un estudio de la estabilidad de la aeronave. A la vista de los resultados y explicándolo de una forma sencilla, el centro de gravedad del aparato se encuentra retrasado respecto del centro aerodinámico del ala, con la configuración que hemos obtenido, el sistema experimenta inestabilidad debida a perturbaciones externas, para resolver este problema hemos realizado ciertas modificaciones en la distribución del modelaje, como reducir en cierta medida el tamaño de la cola y colocado la ubicación de la cámara en el diseño, además he cambiado el posicionamiento del tanque de combustible, el cual estaba en el diseño anterior por detrás de las alas y ahora lo hemos situado encima de las mismas, con lo que reducimos así la inestabilidad que producía el vaciado del mismo en el transcurso del ciclo de vuelo.

Al comparar la nueva localización del centro de gravedad con el centro aerodinámico de las alas se puede comprobar que estos se encuentran muy cercanos, sin poder determinar cuál se encuentra por delante a simple vista.

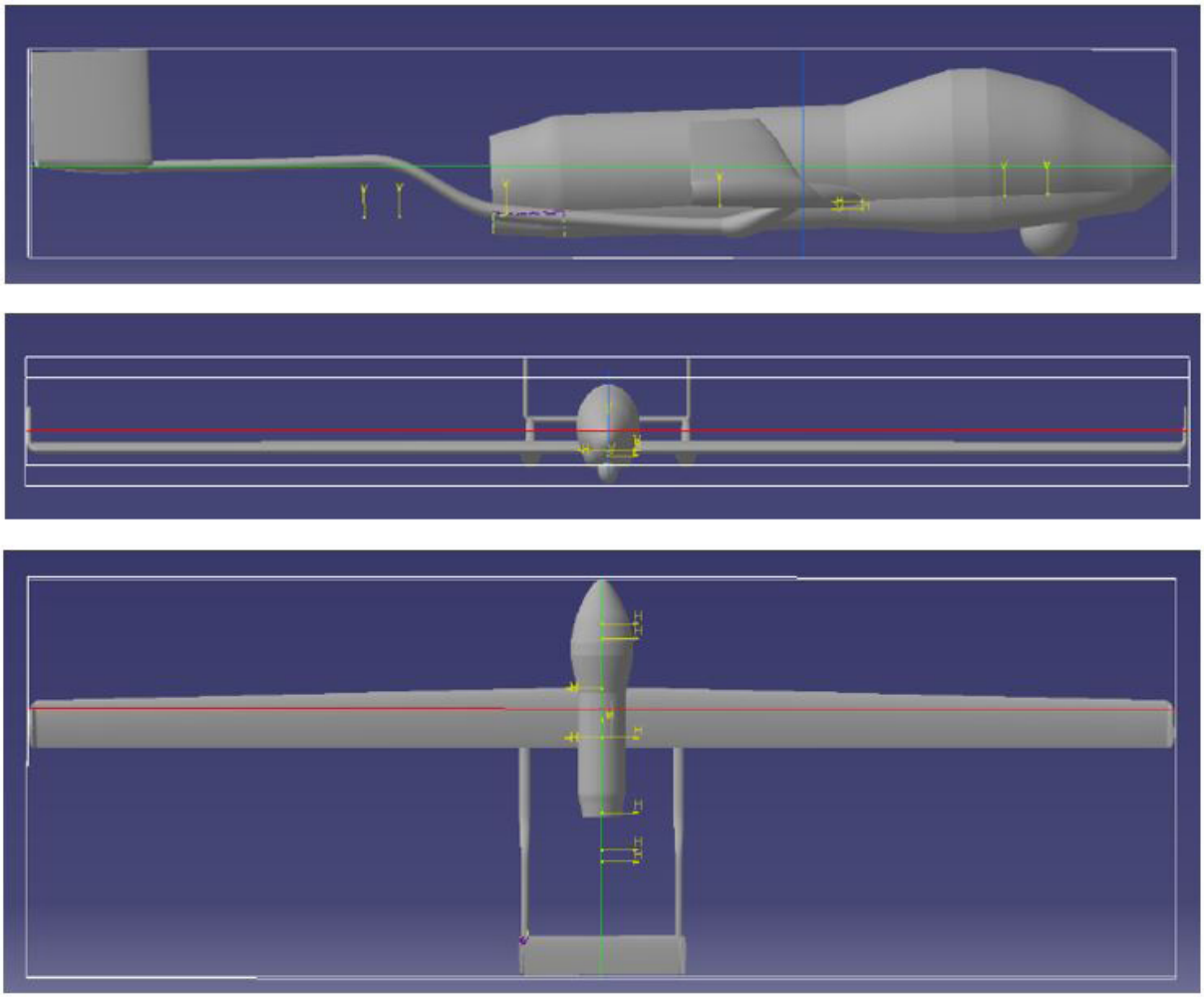


Figura 6. Vistas del centro de gravedad de la aeronave modificada. Fuente propia.

3. Resultados y discusión

Hemos conseguido que la aeronave UAS MALE, sea capaz de operar a altitudes óptimas para misiones ISR, con un radio de acción y una autonomía que permite a la aeronave cubrir ampliamente grandes extensiones de terreno, así como una alta relación velocidad/autonomía la cual permite que nuestra aeronave se mantenga en funcionamiento y lista durante todo el transcurso íntegro de la misión. A continuación en la figura 7 se puede ver una tabla de características generales del aparato:

4. Conclusiones

Durante el desarrollo de este proyecto hemos profundizado en los sistemas aéreos no tripulados, más concretamente en la categoría de media altitud y alta autonomía, debido al gran auge que este campo está experimentando, hemos podido apoyarnos en las soluciones tecnológicas las cuales están totalmente contrastadas y probadas en otras aeronaves disponibles en la industria.

Para valorar el resultado y desarrollo final obtenido deberíamos de valorar diferentes puntos, estos son los que en un principio estipulamos como requisitos de cumplimiento u objetivos. En líneas generales todas las características principales han alcanzado resultados óptimos para este tipo de aeronave.

En un momento donde el Ejército español ha obtenido cierto número de aeronaves de esta categoría como el MQ-9 Reaper que verán la luz en poco tiempo o el proyecto que lleva entre manos el INTA[8] con el MILANO, pensamos sería bueno desarrollar y calcular un aparato de dicho calibre.

Como líneas futuras a desarrollar, sería aconsejable indagar con especialistas en la materia los apartados de propulsión llegando a optimizar en perfectas condiciones el punto óptimo de RPM, el paso de la pala y potencia transmitida para cada régimen de vuelo y misión, así como fortalecer por otro lado el campo de los materiales compuestos pudiendo disminuir su peso y aumento de ciertas características como la autonomía.

Agradecimientos

Agradecer a todos aquellos que debido a su apoyo incondicional y empuje me han ayudado a lograr el objetivo de este periodo.

Es necesario citar al comandante don Antonio Cantero Obregón que además de tutor de este proyecto ha sido un mentor en todo este periodo así como el comandante Mariano Muñoz Jimenez el cual fue mi tutor académico y de este proyecto. Muchas gracias.

Referencias

1. *Cuadrón Ferrandis, C. Trabajo Final de Formación. Diseño y desarrollo de un RPAS categoría MALE para misiones de inteligencia, vigilancia, detección de blancos y reconocimiento. Escuela Politécnica Superior del Ejército; 2018.*
2. *Barcala Herreros, A. Gandía Agüera, F. Aerodinámica y Mecánica de Vuelo, Tomos I, II y III. Universidad Politécnica de Madrid; 2002.*
3. *Gundlach, J. Designing Unmanned Aircraft Systems. American Institute of Aeronautics & Astronautics; 2012.*
4. *Raytheon Special Report.*
5. *Timothy H. Cox, Christopher J. Nagy, Mark A. Skoog, Ivan A. Somers, Civil UAV Capability Assessment .*
6. *Northrop Grumman Global Hawk Brochure.*
7. *EADS Report – Innovative UAV Systems.*
8. *www.uavglobal.com*
9. *www.infodron.es*
10. *www.iai.co.il/malat*
11. *www.adcom-systems.com*
12. *www.aero.us.es*
13. *www.airfoiltools.com*

8 Instituto Nacional Tecnología Aeroespacial.

Impacto de los sistemas electrónicos en los sistemas de distribución de potencia embarcados

Izquierdo, Daniel[1]; Barroso de María, Gabriel; Alcántara, Francisco y Serna, Fernando

1. Airbus Defence and Space S.AU. Correo electrónico: Daniel.Izquierdo@airbus.com (DI).

Resumen

En los nuevos diseños de aviones militares existe una notable tendencia hacia el incremento de la demanda de potencia eléctrica. Esto es debido principalmente a la substitución de los tradicionales sistemas mecánicos, neumáticos e hidráulicos por sistemas parcial o totalmente eléctricos buscando un mejor balance energético y reducción de emisiones de las plataformas, tal como están demostrando importantes programas tecnológicos (Cleansky), enfocados hacia el avión más eléctrico de sus siglas en inglés *More Electrical Aircraft*, e incluso el concepto de avión todo eléctrico, de sus siglas en ingles *All Electric Aircraft,* Este tipo de aviones presentan una serie de ventajas frente a los aviones convencionales, disminución del peso y volumen, menor mantenimiento, mayor eficiencia energética,… Además, existe un continuo incremento en el número de equipos consumidores de potencia eléctrica dentro de los diferentes sistemas que no forman parte de la plataforma: comunicaciones, aviónica, vigilancia, armamento... Para hacer frente a este incremento de la demanda de potencia eléctrica, se empiezan a utilizar nuevas arquitecturas aplicadas dentro de los sistemas de distribución de potencia eléctrica.

El aumento en la demanda de energía eléctrica ha provocado, que los tradicionales niveles de tensión de $28V_{CC}$ y $115V_{CA}$ hayan evolucionado hacia niveles de 270 V_{CC} y 230 V_{CA}. Una de las ventajas que se consiguen con estos nuevos niveles de tensión, es la reducción de los niveles de corriente y, por ende, se puede disminuir la sección, el volumen y el peso del cableado. Por otro lado, es importante indicar, que en estas nuevas arquitecturas eléctricas, la distribución de potencia se plantea mediante el uso de arquitecturas distribuidas, las cuales están basadas en elementos electrónicos de conversión, protección, monitorización y control. Todo esto supone un mayor grado de complejidad, para las nuevas arquitecturas de distribución eléctrica, que cada vez más, dependen de los sistemas electrónicos de potencia.

Recientes avances en áreas como la electrónica de potencia, han proporcionado las herramientas necesarias para el desarrollo de estas nuevas arquitecturas de distribución de potencia eléctrica embarcadas. En este artículo se presenta la tendencia de los sistemas eléctricos, y se describen algunos de los desarrollos realizados por Airbus DS, y enmarcados dentro del proyecto I+D Selena dentro del programa CIEN financiado por el Gobierno de España.

Palabras clave

Avión más eléctrico, sistemas electrónicos, distribución potencia.

1. Introducción

En los nuevos diseños de aviones militares existe una notable tendencia hacia el incremento de la demanda de potencia eléctrica. Esto es debido principalmente a la substitución de los tradicionales sistemas mecánicos, neumáticos e hidráulicos por sistemas parcial o totalmente eléctricos, por lo que en los nuevos diseños de avión se utilizan: actuadores electromecánicos, electrohidráulicos. Además, existe un continuo incremento en el número de equipos demandantes de potencia eléctrica en el marco de los nuevos sistemas de comunicaciones, vigilancia, armamento... Para hacer frente a este incremento de la demanda de potencia eléctrica, ver figura 1, se empiezan a utilizar nuevos niveles de tensión y nuevas arquitecturas aplicadas dentro de los sistemas de distribución de potencia eléctrica (SDPE). Como resultado de todos estos avances se crea el concepto de avión más eléctrico, el cual presenta una serie de ventajas y retos tecnológicos frente a los aviones convencionales [1][2][3].

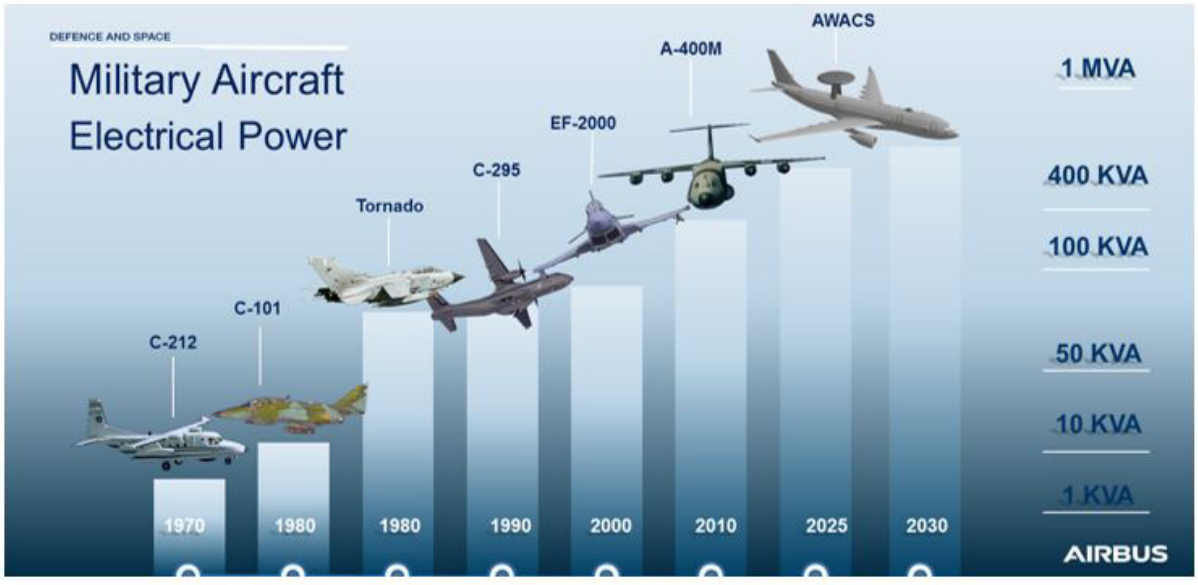


Figura 1. Evolución de la demanda de potencia eléctrica en los aviones militares de Airbus.

En el concepto de avión más eléctrico, los SDPE son un elemento clave. Estos sistemas típicamente basan la distribución primaria en dos tipos de tensiones, dependiendo de si son en corriente alterna (CA) o corriente continua (CC):

- En el caso de sistemas de distribución primaria basados en corriente alterna, como en los aviones comerciales B787 y A350, las tensiones en las que se distribuye la potencia generada son 230 V_{CA}.
- En el caso de sistemas de distribución primaria basados en 270 V de corriente continua, normalmente usados en aviones militares en plataformas como el F22 o el F35. [2][3].

Por otro lado, recientemente se han lanzado el desarrollo de nuevos prototipos que utilizan la propulsión híbrida [4], y en los cuales ya se consideran tensiones de distribución que pueden llegar a los 3.000 voltios en corriente continua como es el caso del EFAN-X [5].

Para la gestión de estos nuevos niveles de tensión se hace necesario el uso de equipos electrónicos que permiten la generación, conversión, protección y distribución entre las distintas etapas que forman parte del SDPE.

2. Arquitectura de los sistemas eléctricos embarcados

El sistema eléctrico de una aeronave es el conjunto de equipos y componentes encargados de generar, gestionar y distribuir potencia eléctrica a las distintas cargas eléctricas del avión. Esta tarea ha de llevarse a cabo de forma segura y de acuerdo a los estándares aeronáuticos, en todas las condiciones de operación del avión normal, condiciones de fallo y de emergencia.

En condiciones normales, la energía se obtiene a partir de los motores del avión, mediante el uso de alternadores. En los casos en los que los motores no funcionan, la energía se obtiene principalmente de baterías o fuentes auxiliares de potencia.

Típicamente, la arquitectura de los sistemas eléctricos embarcados se divide en las siguientes etapas:

- Generación.
- Distribución primaria.
- Conversión y almacenamiento.
- Distribución secundaria.
- Sistema de emergencia.

Las nuevas tendencias en los sistemas eléctricos embarcados implican cambios en todas y cada una de estas etapas. Con el objetivo de satisfacer los nuevos requerimientos es necesario el desarrollo de equipos capaces de trabajar con las nuevas arquitecturas de distribución eléctrica estas plataformas, a la vez que cumplen con el resto de requisitos propios del entorno aeronáutico (fiabilidad, vibración, resistencia a factores ambientales, etc.) [2] [3]. En los siguientes párrafos se describen algunos de los últimos equipos desarrollados en el marco del avión más eléctrico por Airbus DS, en colaboración con otras empresas, con el fin de dar solución a las nuevas necesidades de los sistemas.

3. Equipos electrónicos en los sistemas de distribución de potencia eléctrica

Actualmente las líneas estratégicas de desarrollo de equipos se enfocan a diferentes plataformas, aviones de transporte militar ligeros, aviones remotamente pilotados y futuros aviones de combate. En los siguientes apartados se presentan cada uno de estos equipos.

3.1. Aviones de transporte militar medios y ligeros

Airbus DS es líder mundial en el segmento de los aviones de transporte militar de rango medio y ligero, uno de los puntos que se han convertido en una pieza clave para este tipo de aviones es el sistema de distribución eléctrico embarcado, y cómo realizar la conversión desde corriente alterna a corriente continua, para su utilización en los distintos sistemas de vigilancia y aplicaciones varias.

En plataformas como el C295 los sistemas de generación instalados son de corriente alterna y corriente continua. No obstante, la mayor parte de consumidores son de corriente continua 28 V_{CC}. Es por ello que es necesario disponer de equipos de conversión, que transformen la corriente alterna en corriente continua, con una buena regulación, una alta eficiencia y que disminuyan los efectos de la distorsión armónica en la red de AC. Estas unidades se conocen a partir de su designación en inglés *Transformer Rectifier Unit* (TRU), y normalmente no están reguladas, por lo que con el incremento de carga eléctrica los niveles de tensión son muy inferiores a 28 V_{CC}.

Dentro de la estrategia de modernización del C295, Airbus en colaboración con el centro tecnológico Ikerlan se está desarrollado una TRU regulada, ver figura 2, este equipo presenta destacadas ventajas frente a los convencionales TRU. El equipo tiene una eficiencia por encima del 85 %, para unos niveles

de potencia de 11,2 kW y presenta una salida regulada de 28 V_{CC} ±1 Vcc para todo el rango de potencia, muy por encima de lo requerido por los estándares militares [6]. Por otro lado, el equipo incorpora las últimas tecnologías en refrigeración mediante el uso de *Heatpipes* y el tamaño se ha minimizado mediante el uso de elementos magnéticos de última generación. Todas estas características permiten manejar mayores niveles de potencia reduciendo el peso de la aeronave. Su diseño vanguardista basado en tecnología de estado sólido, está preparado para considerar distintas funciones específicas adicionales, como son mantenimiento predictivo, control de carga de batería, etc.

Otro de los equipos que forman parte del programa de modernización del C295 es la caja de distribución para condiciones de emergencia, de sus siglas en inglés *Emergency Distribution Box* (EDB), ver Figura 3. Este equipo ha sido desarrollado conjuntamente por Airbus DS y TEMAI Ingenieros. El equipo ha

Figura 2. Unidad rectificadora Transformadora (TRU) para el C295 desarrollada dentro del proyecto SELENA.

sido integrado en uno de los prototipos del C295 y permite la distribución de potencia eléctrica cuando el sistema de distribucion normal presenta algún problema. El equipo es capaz de controlar la conexión de grandes consumidores de hasta 150 Amperios y proteger el cableado con protecciones electrónicas. Por otra parte este tipo de equipos presenta un interface ARINC que permite en envio de información a un *display* situado en cabina, por lo cual es posible reducir la distancia del cableado, ya que no es necesario tener el equipo instalado en cabina.

Figura 3. Caja de distribución de emergencia (EDB).

Asimismo, dentro de los programas retos tecnológicos, se ha desarrollado en colaboración con Fagor Electrónica, el proyecto SAGITARIO. En el cual se ha llegado a obtener un prototipo de laboratorio para actualizar la distribución primaria del C295 mediante una solución tecnológica basada en tecnología de estado sólido, mediante una solución de control configurable y un concepto modular de modo que pueda abastecer a las distintas versiones de la plataforma. El equipo incluye conceptos de gestión de energía en función de las condiciones de operación (de ahí su nombre en inglés EMDS – *Energy Management and Distribution System*).

Figura 4. Caja de distribución primaria (EMDS).

3.2. Aviones remotamente tripulados (RPAS)

En el campo de los sistemas eléctricos para sistemas aéreos remotamente pilotados (RPAS) también se han desarrollado equipos electrónicos que permiten mejorar la funcionalidad y optimizar el peso de las aeronaves [7] [8].

Uno de los puntos importantes en las redes eléctricas es la monitorización del estado de las cargas, si se encuentran conectadas y el nivel de consumo del equipo que se conecta a la red. Para poder tener esta información en un RPAS es necesario cambiar la tecnología convencional basada en protecciones magneto-térmicas por protecciones electrónicas [9].

Figura 5. Electrical Power Load Management Unit (EPLMU).

En línea con esta tecnología Airbus DS e Indra han desarrollado un equipo modular basado en tecnología MOSFET que permite sustituir los convencionales dispositivos de proteccion y conmutación, *Circuit Breakers* (CB) y relés. El equipo ha sido integrado en el ATLANTE ,un avión tactico remotamente tripulado de Airbus DS, y permite la distribución de potencia a nivel secundario reduciendo el peso y

volumen del sistema electrico en un rango del 40 %, con un incremento del nivel de fiabilidad, control, monitorizacion y eficiencia [8]. Este equipo es modular y puede ser aplicado en otro tipo de plataformas, ya que está calificado para trabajar en todo tipo de condiciones ambientales.

Otro de los equipos eléctricos que forman parte de los programas de aviones no tripulados es la caja de distribución primaria inteligente de sus siglas en ingles *Smart Primary Distribution Box* (SPDB), ver figura 5. Este equipo ha sido desarrollado conjuntamente por Airbus DS y TEMAI Ingenieros dentro del proyecto CIEN-SELENA. El equipo ha sido integrado en el RIG electrico del ATLANTE. Esta caja inteligente de distribucion primaria permite introducir capacidades como el control autónomo en caso de pérdida del control externo, señales de monitorizacion externas y la capacidad del uso del estado solido en caso de substituir los contactores internos por MOSFET de potencia.

Figura 6. Caja de distribución inteligente (SPDB) dentro del proyecto CIEN-SELENA.

3.3. Futuras plataformas de combate (FCAS)

Dentro de las plataformas de combate o aviones de nueva generación, de sus siglas en inglés *Future Combat Aircraft Systems* (FCAS), Airbus DS está trabajando en las redes de 270 V_{CC} [3], y en los equipos encargados de la conversión. De este modo, Airbus en colaboración con Ingeniería Viesca, que es una empresa especializada en el desarrollo de equipos electrónicos para el sector ferroviario, ha desarrollado una unidad rectificadora de alta tensión $115V_{CA}/270V_{CC}$, ver figura 6, para su aplicación en sistemas aeronáuticos. Estos equipos conectados a generadores de corriente alterna proporcionan una red de alimentación para equipos que funcionen a 270 V_{CC}.

Figura 7. Unidad rectificadora transformadora de alta tensión (HV-TRU).

Una de las ventajas de este tipo de redes, es que los equipos que se conectan a estas redes de distribución de corriente continua no necesitan de una etapa interna de rectificación CA/CC, para adaptar la tensión de CA a CC, con el consecuente ahorro de peso y volumen que esto supone de equipo individualmente y la reducción global del peso del avión.

4. Conclusiones

Actualmente existe una fuerte tendencia hacia la electrificación de los sistemas embarcados lo que implica un aumento en la demanda de potencia eléctrica, un incremento en los niveles de tensión con la definición de nuevos estándares, y una tendencia a la introducción de equipos muy dependientes de la electrónica de potencia.

Los equipos electrónicos o basados en electrónica de potencia tienen una influencia en la configuración de las redes y condicionan las arquitecturas de distribución, permitiendo disminuir el peso y volumen de las aeronaves. Además, estos equipos permiten tener una buena calidad de la red de distribución eléctrica, una alta eficiencia y una mejor fiabilidad frente a los sistemas convencionales de distribución de potencia.

Airbus DS está trabajando con diferentes empresas del sector aeroespacial y otros sectores, como el ferroviario, en el campo de los equipos electrónicos, en el marco de proyectos de I+D, para el desarrollo de arquitecturas más modulares, las cuales permitan aumentar las capacidades de los sistemas eléctricos actuales en las distintas plataformas militares.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en parte dentro del proyecto SELENA, subvencionado por el CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), dentro de los programas de I+D estratégicos CIEN y el proyecto SAGITARIO subvencionado por el MINECO (Ministerio de Economía y Competitividad) dentro de los programas RETOS-COLABORACION.

Referencias

1. *Rosero, J. A.; Ortega, J. A.; Aldabas, E. and Romeral, L., «Moving Towards a More Electric Aircraft». Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Volume 22, Issue 3. 2007.*
2. *Moir, Ian; Seabridge, Allan. —Aircraft Systems: Mechanical, Electrical and Avionics Subsystems Integration. 3rd ed. Chichester (West Sussex): Wiley, 2008.*
3. *Izquierdo, D.; Azcona, R.; del Cerro, F.; Fernandez, C.; Delicado, B. «Electrical Power Distribution System (HV270DC), For Application In More Electric Aircraft». Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE pages: 1300-1305. Date of Conference: 21-25 Feb. 2010.*
4. *Richard Newman [Rolls–Royce plc Derby, UK], «The More Electric Engine Concept». 2004.*
5. *Tim Robinson. How E-Fan X will jump-start a new era in hybrid-electric flight, Royal Aeronautical Society. 1 December 2017.*
6. *«MIL-STD-704, Aircraft Electric Power Characteristics», Military Standard.*
7. *Fokke Mentjes. Electrically Driven General Systems for UAS's. EADS Deutschland GmbH. Defence & Security. Military Air Systems. 81663 Munich, Germany.*
8. *D. Izquierdo, G. Barroso de María, R. Azcona, C. Fernández. Electrical power distribution system based on SSPC for Atlante UAS; SAAEI 2015.*
9. *Izquierdo, D.; Barrado, A.; Raga, C.; Sanz, M.; Lázaro, A. «Protection Device for Aircraft Electrical Power Distribution Systems: State of the Art». IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Volume: 47, pages: 1538-1550. 2011.*

Milano: una visión futura para un UAS táctico

Vidal, Ivan[1,*], Sánchez-Aguero, Victor[1,2], Valera, Francisco[1], Nogales, Borja[1], Cabezas, Jaime[3], Vidal, Carlos[3], López, Alicia[4], González, Daniel[4], Díez, José[5], Berrazueta, Laura[5] y Merino, Manuel[5]

[1] Universidad Carlos III de Madrid. Av. Universidad, 30, 28911 Leganés (España): ividal@it.uc3m.es (IV), fvalera@it.uc3m.es (FV), bdorado@pa.uc3m.es (BN).

[2] IMDEA Networks Institute. Avda. del Mar Mediterráneo, 22. 28918 Leganés (España): victor.sanchez@imdea.org (VS).

[3] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Carretera de Ajalvir, Km 4, 28850 Torrejón de Ardoz (España): cabezasj@inta.es (JC), vidalbc@inta.es (CV).

[4] Isdefe. C/ Beatriz de Bobadilla, 3. 28040 Madrid (España): lopezca.pers_externo@inta.es (AL), gonzalezrd.pers_externo@inta.es (DG).

[5] BERTEN. C/ Lealtad 19, 3ºC, 39002 Santander (España): jose.diez@bertendsp.com (JD), laura.berrazueta@bertendsp.com (LB), manuel.merino@bertendsp.com (MM).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: ividal@it.uc3m.es (IV).

Resumen

En este artículo se presenta el nuevo sistema de aeronaves no tripuladas Milano, del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Con una autonomía de vuelo de 20 horas, una carga útil de hasta 150 Kg, y un sistema de comunicaciones radio TCP/IP, el sistema desarrollado posibilita misiones de observación y vigilancia que van más allá de las ofrecidas por un sistema táctico tradicional. En el artículo se identifican las principales características del sistema Milano, en particular las relativas a su sistema de comunicaciones en línea de vista radioeléctrica basado en el protocolo IP. Asimismo, se describen las líneas actuales de trabajo consideradas para la evolución de este sistema: 1) mecanismos de vuelo cooperativo; 2) nuevas evoluciones del sistema de comunicaciones radio en línea de vista; 3) desarrollo de mecanismos para la distribución segura de la información de tele-medida de las aeronaves; y 4) estudio de nuevos enfoques disruptivos para favorecer el despliegue flexible de servicios de telecomunicaciones sobre la plataforma de comunicaciones del Milano.

Palabras clave

UAS, vuelo cooperativo, TCP/IP, virtualización, redes de UAV.

1. Introducción

En el contexto actual, Europa, y España en particular, afrontan grandes retos económicos y sociales. Estos retos requieren necesariamente el desarrollo y puesta en práctica de la nueva generación de tecnologías de la información y de las comunicaciones, dada su relevancia en los diferentes sectores y actividades que sustentan el desarrollo económico y el bienestar de la sociedad. En este contexto también es significativo el potencial de las tecnologías, servicios y productos de los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS, *Unmanned Aircraft Systems*), no solo por la relevancia social de las aplicaciones de protección, seguridad y defensa que estos habilitan (p.ej. operaciones de búsqueda y rescate, gestión de situaciones de emergencia, operaciones de vigilancia, protección fronteriza, etc.); sino además, como habilitadores de nuevos formatos de infraestructuras digitales (p.ej. uso de sistemas aéreos como relés de comunicaciones, provisión de servicios de telefonía IP en zonas remotas, generación colaborativa de imágenes, actividades de soporte a la industria agraria, etc.).

En este contexto, este artículo describe los resultados obtenidos durante el desarrollo del sistema de aeronaves no tripuladas Milano, del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), cuyas primeras pruebas de campo han tenido lugar en 2018 en el Centro de Investigación Aeroportada de Rozas. Adicionalmente a los posibles usos como plataforma aérea de investigación, el sistema Milano puede efectuar misiones de vigilancia y de observación proporcionando imágenes en tiempo real en el espectro visible e infrarrojo de las áreas de interés sobrevoladas. El sistema es además suficientemente flexible para incorporar nuevos elementos de carga de pago en los vehículos aéreos (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*). Así, mediante la integración de un radar de apertura sintética, el sistema podría realizar las misiones de vigilancia y observación todo tiempo y por encima del techo de nubes.

Habiendo concluido ya una primera fase de desarrollo del sistema, entre los objetivos del Milano se considera ahora la exploración de nuevas líneas de I+D+i, para convertir este UAS en un sistema estratégico de referencia en el panorama internacional. Por un lado, se pretende dotar al sistema de capacidades de decisión autónoma, con algoritmos robustos de detección y generación de trayectorias óptimas en vuelos cooperativos. Se consideran también nuevas evoluciones del sistema de comunicaciones radio basado en el protocolo IP, para mejorar las prestaciones ofrecidas en términos de eficiencia y seguridad. Por otro lado, la plataforma *hardware* de comunicaciones del Milano ofrece soporte de virtualización. Esto abre un nuevo abanico de posibilidades para habilitar el despliegue automatizado de funciones en el UAS (p.ej. servicios de telefonía IP, *push-to-talk*, instalación bajo demanda de algoritmos de vuelo cooperativo, generación y distribución de alarmas, etc.). De esta manera, sería posible disponer de una infraestructura digital aérea fácil y rápidamente adaptable a misiones con diversos objetivos.

El resto de este artículo se estructura del siguiente modo. En la sección 2 se describen las características técnicas el sistema Milano, incluyendo aquellas relativas a su sistema de comunicaciones radio en línea de vista radioeléctrica y al sistema de comunicaciones TCP/IP. En la sección 3 se presentan las líneas de trabajo que se han considerado, y que actualmente están en desarrollo para la evolución del Milano. Finalmente, la sección 4 concluye este artículo.

2. El sistema Milano

2.1. Características técnicas del sistema

El Milano es un sistema aéreo táctico no tripulado de gran autonomía, que opera a altitudes medias, y que ha sido diseñado para realizar misiones de reconocimiento, vigilancia y adquisición de blancos. Los UAV tienen un techo operativo de 28.000 pies sobre el nivel del mar, una autonomía de hasta a 20 horas de vuelo, y un rango de velocidades de operación desde 65 nudos hasta 120 nudos. Los vehículos aéreos y la carga útil integrada (inicialmente sensores electroópticos en el espectro visible e infrarrojo), son controlados y monitorizados en tiempo real desde una estación de control en tierra (GCS, *Ground Control Station*).

Las comunicaciones ascendentes (típicamente denominadas tele-comando) y descendentes (comúnmente, tele-medida de datos e imágenes) entre la estación de control y los vehículos aéreos, pueden efectuarse tanto por enlace en línea de vista radioeléctrica, empleando un sistema con protocolo IP, como por un enlace vía satélite, para misiones fuera de la línea de vista radioeléctrica. La geometría del Milano produce una firma radar muy reducida, lo que disminuye la posibilidad de ser detectado durante las misiones. La capacidad de la aeronave con respecto al peso y volumen transportables, la potencia eléctrica disponible, así como el avanzado sistema de comunicaciones utilizado, permiten la integración de una amplia gama de cargas de pago electroópticas y radares de apertura sintética.

Los objetivos perseguidos con el desarrollo del sistema Milano han sido: 1) obtener un sistema de reconocimiento, vigilancia y adquisición de blancos en tiempo real para realizar misiones de Estado, empleando vehículos aéreos MALE (*médium altitude long endurance*) a un coste reducido; 2) desarrollar nuevas funcionalidades y tecnologías aplicables a los sistemas aéreos no tripulados (inteligencia artificial, integración en el espacio aéreo no segregado, o sistemas de comunicaciones en red empleando protocolos de Internet); y 3) poner a disposición de la industria un sistema aéreo no tripulado como plataforma aérea de investigación, o demostrador de otros usos operativos.

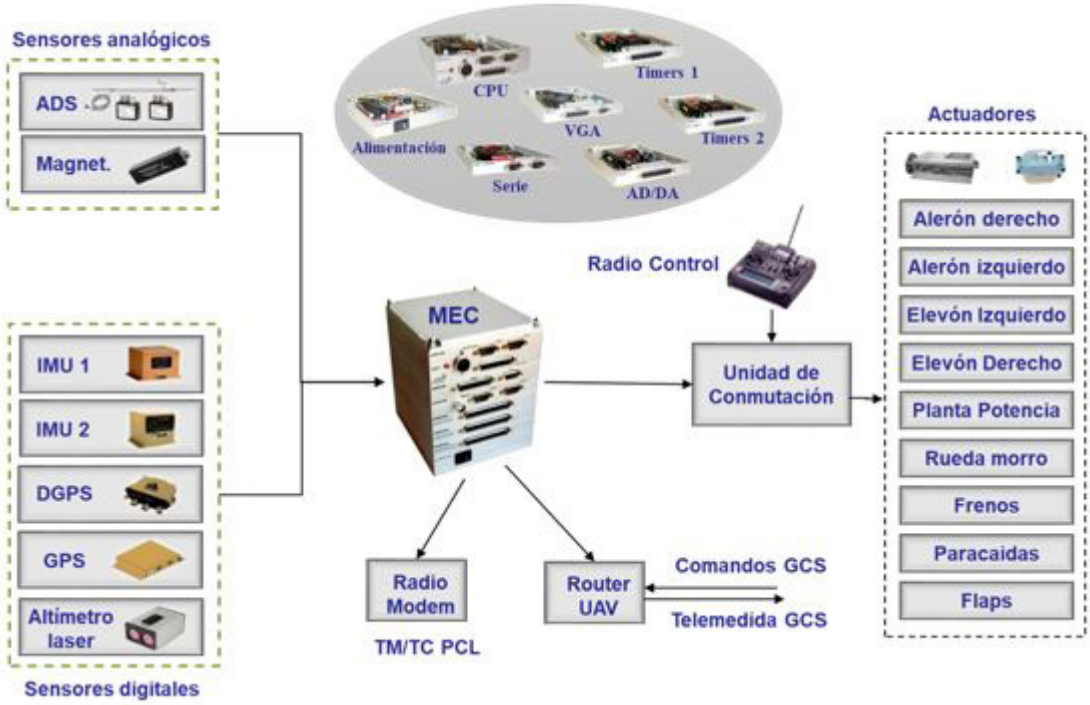


Figura 1. Arquitectura del sistema de comunicaciones Milano.

El sistema de navegación, guiado y control del Milano consta de componentes *hardware* y módulos de *software* que permite que la aeronave pueda realizar el vuelo con las funcionalidades requeridas. El diagrama de bloques de este sistema está representado en la figura 1. Este incluye un ordenador de control de vuelo denominado MEC (módulo de estimación y control), de los sensores de determinación de estado del avión y de los actuadores de control. Existe adicionalmente un enlace bidireccional redundante entre el sistema de control de vuelo y un puesto dedicado en la GCS. Mediante este enlace de alcance limitado, basado en un *radio modem*, pueden enviarse al avión todos los comandos de control. Asimismo, el operador recibe una tele-medida reducida con los parámetros de monitorización del vuelo.

En los siguientes apartados se describen, en mayor detalle, los dos sistemas principales que permiten proveer las comunicaciones radio basadas en el protocolo IP del Milano: el sistema de comunicaciones radio en línea de vista radioeléctrica y el sistema de comunicaciones TCP/IP. Este último posibilita además la conmutación automática de las comunicaciones a enlace satélite, en caso de ausencia de cobertura del enlace por línea de vista (por ejemplo, en misiones a larga distancia).

2.2. Sistema de comunicaciones radio

El sistema de comunicaciones radio está basado en los transceptores S-6000 de la empresa española BERTEN que, en colaboración con el INTA, ha desarrollado equipos IP de altas prestaciones con algoritmos innovadores que aseguran enlaces estables en situaciones de alta dinámica (>2000 Km/h, >10g). Los transceptores permiten configurar cualquier frecuencia entre 70 MHz y 6 GHz con anchos de banda de hasta 80 Mbps por canal. Diseñado para operar en condiciones ambientales de grado militar, el sistema implementa características avanzadas tales como relé regenerativo, funciones de red, interfaces configurables, encriptación AES, y monitorización y control por comandos IP.

Como se observa en la figura 2**.**, el sistema de radio S-6000 incluye tanto unidades embarcadas, IP-67 de reducido tamaño, como una unidad de tierra enracable con pantalla táctil LCD, alimentación AC, e interfaces adicionales. La figura 3 muestra la integración del sistema en los UAS y estación de control (GCS) del INTA.

Figura 2. Sistema de comunicaciones radio S-6000000.

Figura 3. Integración en los UAS y GCS del INTA.

2.3. Comunicaciones TCP/IP seguras

El sistema de comunicaciones TCP/IP de Milano es una evolución del sistema diseñado inicialmente para el SIVA como parte del proyecto DRONE[1] financiado parcialmente por el programa COINCIDENTE durante los años 2011 a 2013. Dicho sistema original se ha detallado en [1] y [2], y sus principales características, así como las diferentes evoluciones y adaptaciones para Milano, se describen en las siguientes líneas.

El núcleo del sistema está compuesto por un sistema compacto embarcado que hace las veces de router hacia el sistema terrestre (está conectado directamente con los dispositivos que transmiten la señal hacia el exterior de la aeronave, ya sea el sistema de comunicación en línea de vista descrito en el apartado 2.2 o con el sistema de transmisión vía satélite) y de *switch* para el resto de sistemas finales embarcados con interfaz de red (módulo de adquisición de datos o cámara de vídeo, por ejemplo). Además, el sistema cuenta con un router ubicado en la estación de tierra que recibe los flujos de información de los dispositivos de línea de vista y satélite correspondientes y al que se interconectan los diferentes puestos de control.

Por último, es importante destacar que además de los posibles esquemas de seguridad que se puedan proporcionar por el sistema de transmisión descrito en el apartado 2.2, las comunicaciones de red están protegidas utilizando IPSec [3] (ya lo estaban en el sistema original). Sin embargo, para Milano se incorporará un nuevo mecanismo que proporcionará seguridad centrada en el contenido, SCoT (véase apartado 3.3), que cubrirá las comunicaciones de vídeo y tele-medida actuales y permitirá incorporar la aeronave en un entorno multidispositivo de forma que pueda autenticarse siempre el origen real (generador) de los datos.

Para el sistema Milano se ha sustituido recientemente el router embarcado por un sistema de mayor potencia con soporte para tecnologías de virtualización. Pese a que las medidas efectuadas en cada misión del SIVA en el router embarcado en dicha aeronave revelan que el sistema fue convenientemente diseñado y todos los parámetros monitorizados están ampliamente dentro del rango de valores esperado (carga de CPU, utilización de memoria del dispositivo, utilización de interfaces de red, etc.), para el sistema Milano se ha considerado necesaria la introducción de un sistema con mejores prestaciones para dar cabida a las siguientes posibles evoluciones del sistema: 1) soporte para el nuevo sistema de autenticación de fuente basado en SCoT; 2) soporte para una posible conexión directa de la cámara de vídeo de la aeronave, que actualmente envía el vídeo sin comprimir a un dispositivo de adquisición de datos que se encarga de la codificación y distribución; 3) desarrollo de un sistema de gestión de red integral que permitirá la monitorización completa de los parámetros de red de cada dispositivo UAV; y 4) soporte para tecnologías de virtualización que permitan flexibilizar la instalación y actualización de los servicios ofrecidos por el UAS (véase apartado 3.4).

3. Evolución del sistema

3.1. Vuelo cooperativo

El sistema Milano puede operar en forma de red de comunicaciones, constituida por un conjunto de aeronaves no tripuladas y de estaciones de control en tierra. Esta característica tiene efectos multiplicadores tanto en la extensión del área cubierta, como en la duración de la operación efectuada. Sin embargo, la complejidad en la planificación, supervisión y ejecución de las misiones por parte de los operadores, crece exponencialmente al aumentar el número de aeronaves, estaciones de control y objetivos establecidos en la misión. Para operar eficientemente un sistema de UAS en red resulta imprescindible incorporar funciones de inteligencia artificial. Existen varias definiciones del concepto de inteligencia artificial tomando como referencia bien el comportamiento humano, o bien la racionalidad basada en la medida

1 Diseño de red de comunicaciones para UAV de nueva generación. Programa COINCIDENTE (DN8644-COINCIDENTE-10032110042).

de unas actuaciones o comportamientos ideales. Este último enfoque es el que define con más exactitud las funciones previstas.

En nuestro contexto bajo estudio, el operador definirá las características de la misión (esto es, tipo de misión, objetivos perseguidos, delimitación de zona de la misión y número y clase de los aviones no tripulados a desarrollar). Atendiendo a los criterios definidos, cada aeronave planificará su trayectoria de forma cooperativa para que de manera óptima se alcancen los objetivos de la misión definida. Esta optimización estará basada en algoritmos concretos para cada tipo de misión en los que se emplean mapas de conocimiento compartidos entre las aeronaves y estaciones de control y que son específicos para cada tipo de misión. Las trayectorias óptimas generadas, consideran las restricciones que garantizan la conectividad de la red y la separación mínima entre aeronaves para evitar colisiones. Los aviones actualizan esas trayectorias según evolucionen los mapas de conocimiento compartido o la posición del resto de las aeronaves durante la misión.

Durante el desarrollo de la misión el operador recibirá una información reducida de cada uno de los UAV que componen la red y una detallada de un UAV seleccionado. Esta selección podrá cambiarse según progrese la misión. Cuando sea requerido, el operador podrá comandar a la aeronave seleccionada en cualquiera de los modos automáticos y semiautomáticos, interrumpiendo el modo autónomo. El novedoso sistema de comunicaciones desarrollado para Milano, facilita la capacidad de monitorización, el comando selectivo, generación de mapas de conocimiento compartido según cada tipo de misión y posición de cada aeronave.

3.2. Sistema de comunicaciones radio

El sistema de comunicaciones radio S-6000 está en continuo desarrollo para incorporar mejoras que permitirán implementar funcionalidades avanzadas, más allá del estado del arte, para el UAS táctico Milano. Estas evoluciones incluyen: 1) comunicaciones a larga distancia entre los elementos de una red de vehículos aéreos, mediante técnicas innovadoras de acceso al medio; 2) integración de la interfaz IP con datos serie (RS232/422, UART, SBUS) para conexión directa de sensores y otros elementos embarcados al sistema de comunicaciones; 3) algoritmos de diversidad espacial y temporal para mejorar la cobertura y la robustez contra desvanecimientos frecuenciales; 4) técnicas avanzadas de LPI/LPD (*low probability of intercept/detection*) para aumentar la seguridad en operaciones tácticas; 5) desarrollo de una interfaz gráfica para comando y control del sistema de comunicaciones; y 6) terminal de vídeo remoto (RVT, *Remote Video Terminal*) para recibir datos y tele-medida en unidades portátiles.

3.3. Seguridad mejorada centrada en contenido

En un escenario de despliegue, es posible que la información de los UAV que se recibe en la GCS, o en un conjunto de RVT, deba ser retransmitida a otras entidades autorizadas para su procesamiento. En el contexto del Milano, que incluye recursos de alto coste y criticidad, una solución viable que permitiría entregar la información a las entidades autorizadas que participen en una misión consistiría en proveer una aplicación en la estación de tierra, o en las unidades RVT que, previa verificación de los permisos pertinentes por parte de los usuarios solicitantes, retransmitiese la información de tele-medida recibida del UAV.

Sin embargo, esta solución presenta el inconveniente de que, por el hecho de retransmitir la información desde la GCS, la entidad receptora de dicha información no dispone de una garantía real sobre su procedencia. Teniendo esto en cuenta, el objetivo de esta línea de trabajo consiste en desarrollar una solución que permita proteger la entrega de la información de tele-medida ofrecida por un UAV, con independencia de las entidades intermediarias que se utilicen para su distribución. A este respecto, se partirá de un desarrollo previo del equipo de trabajo del programa Milano [5]. En este desarrollo se ha definido un protocolo de nivel transporte, SCoT (de sus siglas en inglés *Secure Content Oriented Transport*). Este protocolo se basa en un modelo de la seguridad centrada en el contenido [4], y permite soportar la diseminación segura de información en Internet, con particular aplicación en entornos de

redes de distribución de contenidos (CDN, *Content Delivery Networks*). En esta actividad, se partirá del desarrollo realizado en el trabajo anterior, al objeto de definir una solución de funcionalidad similar, aunque adaptada al caso particular de los despliegues de UAS.

3.4. Virtualización de funciones y servicios

Finalmente, y atendiendo a un enfoque innovador, sería deseable que los UAS del futuro pudiesen estar conformados por múltiples UAV de diferentes tamaños y capacidades, fácilmente adaptables a diferentes misiones y situaciones, no solo en términos de carga de pago y de equipamiento *hardware*, sino también en términos de *software* y de servicios, que deberían poder ser integrados de manera ágil y flexible en el UAS según sea conveniente. A modo de ejemplo, se podría actualizar el *software* de un UAV táctico para soportar diferentes algoritmos para el control de vuelo autónomo. O podría usarse una red de UAV de menor tamaño para desplegar de manera ágil una infraestructura de telefonía IP para soportar comunicaciones de emergencia en una zona geográfica delimitada, en la que no existe una infraestructura de red de comunicaciones (por ejemplo, en un área remota), o bien esta no se encuentra disponible (como puede ser a causa de un desastre natural).

En esta línea de trabajo se pretende evolucionar el sistema Milano para ofrecer una plataforma flexible, adaptable a misiones y situaciones con diferentes objetivos. En esta plataforma, se considera la interoperación entre múltiples UAV, que podrían interconectarse en vuelo para ofrecer diferentes servicios (ej. servicios de telefonía IP, *push-to-talk*, acceso a Internet, generación de alarmas, operaciones de búsqueda y rescate cooperativas, etc.). En esta visión futura para el sistema Milano, los UAV proveerían una infraestructura configurable que posibilitaría la integración ágil de servicios y de funciones, pudiendo ser estos determinados por el operador del UAS durante su despliegue.

La realización de esta visión presenta, no obstante, un reto de gran envergadura, requiriendo cambios sustanciales en la arquitectura *hardware* y *software* de este tipo de sistemas UAS, al efecto de convertir los UAV en plataformas realmente programables sobre las que ejecutar funciones y servicios. Por este motivo, como parte de esta actividad, estudiaremos la aplicabilidad de tecnologías y estándares reconocidos, que posibiliten realizar la visión expuesta reduciendo la complejidad del reto que dicha visión presenta. En particular, se explorará el potencial de la virtualización de funciones de red (NFV, *Network Functions Virtualization*) como tecnología incipiente sujeta a estandarización [7] que permite soportar el paradigma de la «softwarización» de funciones.

En este contexto, en esta línea de trabajo exploraremos la aplicación de tecnologías de virtualización y de estándares de NFV para posibilitar el despliegue flexible, y efectivo en coste, de aplicaciones y servicios adaptables basados en UAS. Para ello, se utilizará el equipamiento *hardware* y *software* de propósito general actualmente disponible en el sistema Milano, basado en la arquitectura PC/104, que ya ofrece soporte de virtualización, y estudiaremos la integración en dicho sistema de aeronaves programables no tripuladas de tamaño reducido. Actualmente, hemos dado ya los primeros pasos en el desarrollo de esta actividad. En particular, en [8] hemos propuesto una versión preliminar del diseño de un sistema que, mediante el empleo de tecnologías NFV, posibilita el despliegue ágil y flexible de servicios y de funciones sobre plataformas de UAV de tamaño reducido. Nuestro trabajo futuro en esta actividad incluye la evolución de este diseño y su integración en el sistema Milano, al efecto de soportar el despliegue de servicios sobre redes conformadas por este tipo de UAV.

4. Conclusiones

En este artículo se ha descrito el sistema de aeronaves no tripuladas Milano, del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Mediante un sistema de comunicaciones radio innovador, en cuyo desarrollo han participado la empresa española BERTEN y la Universidad Carlos III de Madrid, el sistema Milano ofrece no solo una plataforma aérea de investigación, sino además un sistema robusto para efectuar misiones de observación y de vigilancia a larga distancia y en tiempo real. Las nuevas líneas de trabajo que se plantean bajo el programa Milano permitirán posicionar a este UAS en primera línea en

el ámbito de la I+D+i del panorama internacional, con el soporte de múltiples unidades UAV en vuelo cooperativo, el desarrollo de nuevos mecanismos seguros para la comunicación en línea de vista a larga distancia, y el despliegue ágil y flexible de nuevos servicios de telecomunicaciones.

Agradecimientos

El trabajo realizado por Víctor Sánchez y Borja Nogales ha sido parcialmente financiado por la Unión Europea, mediante el proyecto del H2020 5GinFIRE (*grant agreement* 732497), y por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto 5GCITY (TEC2016-76795- C6-3-R).

Referencias

1. *Valera F et al. Diseño de red de comunicaciones para UAVs de nueva generación Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2013. Noviembre 2013.*
2. *Vidal I, Valera F, Díaz Bautista M.A., Bagnulo M. Design and practical deployment of a network centric remotely piloted aircraft system. IEEE Communications Magazine. (ISSN: 01636804), vol. 52, no. 10. October 2014.*
3. *Kent S, Seo K. Security Architecture for the Internet Protocol, Internet Engineering Task Force (IETF), Proposed standard, RFC 4301, Diciembre 2005.*
4. *Jacobson V. Networking named content. In Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, 1– 12, New York, NY, USA, 2009.*
5. *Vidal I, et al. SCoT: A Secure Content-oriented Transport Journal of Network and Computer Applications. Journal of Network and Computer Applications. Elsevier. Marzo 2018.*
6. *Vidal I et al. Plataforma de Comunicaciones Multi-UAV Multi-Servicio para Aplicaciones de Protección, Seguridad y Defensa. Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2015. Noviembre 2015.*
7. *NFV White Paper. Network functions virtualisation: An introduction, benefits, enablers, challenges & call for action. issue 1. Octubre 2012.*
8. *Nogales B et al. 2018. A NFV system to support configurable and automated multi-UAV service deployments. In Proceedings of the 4th ACM Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications (DroNet'18). ACM, New York, NY, USA, 39-44.*

ARION 2: el cohete lanzador español para pequeños satélites

Torres Berenguer, Raúl[1*], García Lacarte, Francisco[2] y Crespo Bisquert, Juny[3]

[1, 2, 3] PLD Space - Nicolás Copérnico 7, 03202 Elche, España.

Email: [1] RTB: raul.torres@pldspace.com

[2] FGL: francisco.garcia@pldspace.com

[3] JCB: juny.crespo@pldspace.com

[*]Autor principal y responsable del trabajo; RTB. Correo electrónico: raul.torres@pldspace.com

Resumen

A mediados de 2021 tendrá lugar el vuelo inaugural del cohete lanzador español ARION 2.

ARION 2, el primer lanzador europeo reutilizable dedicado al mercado de los pequeños satélites permitirá inyectar 300 kg de carga de pago a 500 km en órbita heliosíncrona durante una misión nominal.

PLD Space, una empresa española creada en 2011, ha centrado sus esfuerzos durante los últimos años en el desarrollo de motores cohete de propulsión líquida para sus lanzadores. Actualmente, PLD Space está abordando el desarrollo completo de su primer cohete ARION 1, un cohete suborbital que será predecesor de ARION 2 y servirá como su demostrador tecnológico.

ARION 1, el primer cohete de sondeo reutilizable en Europa permitirá a PLD Space ensayar y madurar todas las tecnologías críticas que irán a bordo de ARION 2.

Tras haber recibido un total de 17 M€ en inversión, PLD Space lanzará ARION 1 en el tercer trimestre de 2019, siendo este el primer cohete en la historia de España que ha sido desarrollado íntegramente en nuestro país. Para ello, se coordinará el lanzamiento con el Instituto Nacional de Técnicas Aeroespaciales (INTA) y la base de «El Arenosillo», en Huelva.

Con esta presentación, PLD Space quiere presentar el cohete lanzador ARION 2, sus capacidades, así como la evolución desde su demostrador ARION 1, hasta el lanzamiento del propio ARION 2.

ARION 2 tiene el objetivo de convertirse en el microlanzador de referencia en Europa, proveyendo acceso al espacio de manera simple, flexible y asequible tanto a la industria, agencias espaciales, centros de investigación y academia.

De este modo, ARION 2 permitirá a España tener la capacidad estratégica de inyectar satélites en órbita, un valor añadido para preservar los intereses de seguridad y defensa de la nación, especialmente en el ámbito de las comunicaciones punto a punto y en el de la observación de la Tierra.

Palabras clave

PLD Space, ARION 2, microlanzador, España, órbita LEO, cohete lanzador reutilizable.

1. Introducción

Desde el inicio de la carrera espacial, las grandes potencias mundiales han visto en el espacio un sector estratégico ya no solo por un mero interés comercial, sino por el valor añadido que provee en materias de seguridad y defensa a un país.

El uso de satélites en el ámbito de las telecomunicaciones, así como en el ámbito de la cartografía y observación terrestres supuso una gran ventaja a aquellos países que contaban con tecnología espacial durante los últimos años del siglo XX, y ahora se presenta como algo básico a la hora de definir una estrategia de seguridad y defensa nacional. Y es por eso que actualmente, la gran mayoría de países del mundo occidental cuenta con sus propios satélites.

Sin embargo, dentro del sector espacial, existe otro campo que, sin estar directamente relacionado con las aplicaciones satelitales en los ámbitos previamente mencionados, se manifiesta como un componente crítico a la hora de poder contar con estos satélites en órbita.

Estamos hablando de los lanzadores[1], cohetes capaces de poner en órbita estos satélites, en su mayoría propulsados por combustible líquido o sólido, y cuyo desarrollo es tan complejo que solo unas pocas naciones en el mundo pueden contar con ellos. Actualmente solo Estados Unidos, Rusia, Ucrania (como parte de la antigua URSS), China, India, Japón, Israel, Corea del Norte, Corea del Sur, y obviamente Europa (entendiendo a Europa como los países miembro de la Agencia Espacial Europea) cuentan con cohetes lanzadores.

Como se puede observar, son muy pocos los países en el mundo que cuentan con tecnología de lanzadores, pues se requieren muchos años de desarrollo y grandes presupuestos para lograr el funcionamiento exitoso de un lanzador cohete. Es por ello por lo que en Europa se tuvieron que aunar esfuerzos entre las principales potencias en los años 70 para poder contar con su propio lanzador sin tener que depender para entonces de americanos o rusos.

Este fue uno de los objetivos por los que se creó la Agencia Espacial Europea, con el propósito de poder garantizar el acceso al espacio a los países europeos. Y prueba de ello fue el desarrollo de la familia de lanzadores europeos Ariane.

A día de hoy, Europa cuenta con la capacidad de operar hasta 3 lanzadores diferentes, para poder poner en órbita todo tipo de satélites.

Sin embargo, las capacidades tecnológicas de estos lanzadores, especialmente en cuanto a tecnología de propulsión (la más crítica de todas) se refiere, siempre han estado polarizadas en tres países; Francia, Alemania e Italia.

Con el desarrollo de ARION 2, PLD Space hará contar a España con un cohete lanzador que habrá sido desarrollado plenamente en España, y logrará que España se encuentre en el minoritario grupo de países que no solo cuentan con un lanzador, sino con el conocimiento y la tecnología para el desarrollo de estos.

---

1 Al hablar de lanzador se refiere al vehículo propulsado utilizado para poner satélites y cargas de pago en órbita, y no a vehículos que utilizando la misma tecnología pueden tener otros fines.

Por otro lado, hoy en día la gran mayoría de los lanzadores son de un solo uso. ARION 2 se convertirá en el primer cohete reutilizable en Europa, y uno de los primeros en el mundo, algo que hasta la fecha no se ha conseguido en Europa y solo ha sido logrado por dos empresas norteamericanas.

Con esta comunicación, PLD Space quiere presentar el cohete lanzador ARION 2, sus capacidades, así como las dos tecnologías principales que harán que España se encuentre a la vanguardia en el campo de los cohetes lanzadores; la propulsión de motores cohete de combustión líquida, y la reutilización de los cohetes.

2. Antecedentes

PLD Space es una empresa 100 % española, fundada en el 2011 por Raúl Torres y Raúl Verdú con la intención de proveer de acceso al espacio a pequeñas cargas de pago de una manera sencilla, flexible y asequible.

Teniendo en cuenta en aquel momento el posible emergente mercado de pequeños satélites[2], PLD Space decide desarrollar el concepto de ARION 2, un cohete lanzador de dos etapas que podrá poner hasta 300 kg de carga de pago en órbita baja heliosíncrona; 500 km.

Para reducir el riesgo del desarrollo, PLD Space concibe un vehículo más pequeño, simple y menos costoso; ARION 1, un cohete de sondeo de una sola etapa, que servirá como plataforma de investigación en condiciones de microgravedad (uno de los propósitos de los cohetes de sondeo) y a la vez validará todas las tecnologías necesarias para ARION 2.

El punto de inicio del proyecto de ARION 1, se centra en el desarrollo de la tecnología más crítica; la propulsión. Para ello, y gracias al apoyo del CDTI e inversores privados, PLD Space construye su propio banco de ensayos para probar motores cohete, y su propio motor cohete de combustible líquido; oxígeno líquido y queroseno, una mezcla nunca antes utilizada en Europa.

Después de haber demostrado la viabilidad del diseño con decenas de ensayos (más de 40) de hasta 10 segundos en el banco ubicado en el aeropuerto de Teruel, PLD Space vuelve a recibir el apoyo financiero del CDTI para continuar el desarrollo hasta llegar a calificar en vuelo el motor cohete.

Paralelamente, PLD Space recibe un contrato de la Agencia Espacial Europea, para estudiar diferentes estrategias de recuperación, aplicables a los pequeños lanzadores. Un contrato que terminará en abril del 2019 con la demonstración real de dicho sistema de recuperación seleccionado y estudiado.

En enero del 2017, PLD Space recibe una importante financiación por parte de un grupo de inversores y la empresa española GMV que pone los cimientos para el desarrollo completo del primer cohete lanzador, ARION 1.

Finalmente, en 2018 PLD Space recibe el apoyo económico de la Comisión Europea para el proyecto ARION, consigue el segundo contrato con la Agencia Espacial Europea para validar técnicamente la propuesta del lanzador ARION 2 y cierra la tercera ronda de financiación, ascendiendo la inversión obtenida a un total de 17 M€.

Ubicada en Alicante, PLD Space cuenta actualmente (septiembre 2018) con una plantilla de más más de 50 empleados.

3. ARION 2; características y tecnologías clave

ARION 2 es un cohete lanzador formado por dos etapas; todas ellas de combustible líquido, que pesa alrededor de 27.000 kg al despegue. ARION 2 es capaz de poner en órbita baja a 500 km hasta 300 kg de carga de pago, y contará con una primera etapa reutilizable.

Comparándolo con su predecesor ARION 1, el cohete orbital ARION 2 cuenta con una altura total de 23 metros, y un diámetro de 1,6 metros, magnitudes varias veces las dimensiones de ARION 1; cuenta con una longitud de 13 metros, y un diámetro de 0,7 metros.

---

2 Entendiendo pequeños satélites como aquellos que pesan menos de 50 kg. Un mercado que a día de hoy se considera por madurar, pero del que ya hay claros ejemplos de éxito en sus aplicaciones.

Este lanzador, estará fabricado con materiales ligeros y resistentes como la fibra de carbono y diferentes aleaciones de aluminio.

ARION 1 y ARION 2 se han concebido desde el principio con la siguiente filosofía; desarrollar lanzadores fiables, a la vez que sencillos y económicos a la hora de operar. Por ello, tanto ARION 1 como ARION 2 se han diseñado minimizando sus costes y tiempos de fabricación, ensamblaje y operación. De esta manera, se ha estimado que el precio total de lanzamiento, incluyendo las operaciones de integración, lanzamiento y recuperación estará en torno a los 8 M€ (euros en 2018).

Con el desarrollo del lanzador ARION 2, PLD Space será pionero en España en dos de las áreas más relevantes en Europa en el sector de los lanzadores:

3.1. Propulsión

PLD Space lleva desde el 2014 desarrollando desde cero un motor cohete de combustible líquido (oxígeno líquido y queroseno) que será el que propulse a ARION 1.

Hasta la fecha PLD Space ha llevado a cabo más de 40 ensayos de la primera versión del motor; un modelo calorimétrico que ha servido a PLD para entender el comportamiento y las capacidades de su motor de combustible líquido.

Después de validar este modelo, PLD Space validó durante el verano del 2018, PLD probo y validó su nueva versión de motor regenerativo: un motor de refrigerado que hace pasar el queroseno por las paredes de la tobera y la cámara de combustión mediante un circuito de pequeñas tuberías, para luego inyectarlo en la propia cámara. De esta manera se consigue mantener a temperaturas aceptables el motor, pudiendo aumentar su tiempo de funcionamiento.

Durante el último cuarto de este año y principios del siguiente, PLD calificará el motor durante un test que durará dos veces la misión nominal de ARION 1; un total de 4 minutos a máximo empuje.

El motor de ARION 1 de tipo *pressure-fed* (presurizado por helio a alta presión), que debe de ser calificado para una misión de 120 segundos de duración, proporcionará 30kN de empuje.

Este motor pretende ser el punto de partida del desarrollo del sistema de propulsión de ARION 2.

Sin cambiar significativamente la geometría de la cámara de combustión y la configuración de alimentación de combustible, PLD Space quiere escalar el motor de ARION 1, para obtener los motores de la primera etapa de ARION 2, cinco en total presurizados por cinco turbo-bombas que proporcionen 420 kN de empuje a nivel del mar. Debido al ligero aumento de potencia de cada motor

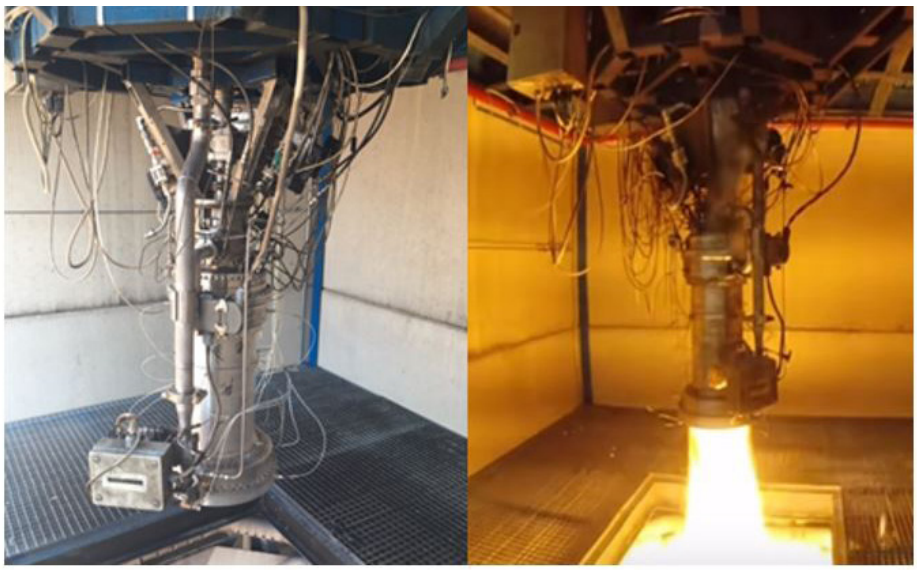


Figura 1. Ensayo del motor regenerativo de ARION 1 en el banco de ensayos de PLD Space en Teruel. Duración del ensayo 20 segundos. Julio 2017.

Con respecto a los que utilizará ARION 1, PLD Space pretende utilizar la misma infrastructura e instalaciones del banco de ensayo que se utilizan actualmente, ahorrando en costes y en tiempos de desarrollo futuros.

En cuanto a la segunda etapa, esta utilizará el tipo de motor de ARION 2 de la primera etapa, pero adaptando simplemente la tobera a condiciones de vacío.

PLD Space ha concebido todos los desarrollos de sus motores utilizando como combustible oxígeno líquido y queroseno; propelentes que no requieren complicadas operaciones de manejo y de fácil y no costosa obtención. De esta manera se podrán simplificar no solo los desarrollos de las diferentes versiones de los motores, sino que se optimizarán a la vez las instalaciones de testeo de los motores.

Es importante mencionar que en Europa nunca se han utilizado motores propulsados por oxígeno líquido y queroseno, por lo que PLD Space se convertirá en la primera compañía europea en desarrollar y volar motores cohete de este tipo.

Además, el hecho de utilizar propelentes líquidos frente a sólidos permite que estos motores puedan ser ensayados repetidas veces, así como poder ser reencendidos (como ahora veremos en el capítulo de reutilización durante la fase de frenado propulsado) y finalmente reutilizados.

3.2. Reutilización

Actualmente, la mayoría de los cohetes lanzadores son de un solo uso. Esto quiere decir que se ha de fabricar un cohete nuevo cada vez que se quiere poner en órbita un satélite.

Con el objetivo de reducir costes y hacer más accesible el acceso al espacio, dos compañías americanas han apostado por la reutilización, desarrollando sendos cohetes que pueden ser recuperados para luego volver a volar.

PLD Space quiere convertirse en la primera empresa europea en desarrollar un cohete reutilizable. Fruto de esa apuesta ha sido la obtención de un contrato por parte de la Agencia Espacial Europea (ESA – European Space Agency), para desarrollar una estrategia de recuperación para la primera etapa de ARION 2.

PLD Space se encuentra actualmente trabajando con expertos de la ESA para estudiar cuál es el estado del arte en los métodos de recuperación aplicables, así como seleccionar, desarrollar y en última instancia ensayar, el método de recuperación sobre una maqueta de la primera etapa de ARION 2.

Para poder recuperar ARION 2, PLD Space ha concebido un descenso de la primera etapa que consta de cuatro fases; una de caída libre, otra durante la cual una serie de sistemas desplegables de frenado estarán actuando, y una última en la cual se despliegan una serie de paracaídas que permiten aterrizar de manera suave a la primera etapa de ARION 2 sobre las aguas del oceáno.

PLD Space llevará a cabo durante abril del 2019 el ensayo de caída libre de la maqueta de esta primera etapa de ARION 2 para poder validar el sistema de recuperación de ARION 2. Esta maqueta representativa de la primera etapa de ARION 2, medirá 15 metros de longitud por 1,4 metros de diámetro, y un peso total de 1.700 kilogramos.

Para poder transportar esta maqueta, PLD Space contará con uno de los helicópteros del Ejercito de Tierra, concretamente un CH-47 Chinook, el cuál elevará la maqueta hasta una altura de 5.000 m para después dejarla caer y poder reproducir las condiciones finales de caída de una misión nominal; la fase de actuación del sistema de paracaídas. Una vez la maqueta haya sido liberada por el helicóptero, la maqueta descenderá y se decelerará mediante un sistema de paracaídas hasta que americe en el oceáno Atlántico, a unos 20 kilómetros del «El Arenosillo», lugar desde donde saldrá el helicoptero. Una vez amerizado, un barco se encargará de recogerlo y llevarlo al puerto más cercano; el puerto de Mazagón.

En relación al sistema de recuperación del primer cohete, ARION 1, PLD Space se encuentra actualmente definiendo en detalle todo su sistema de recuperación, así como todas las operaciones de localización, rescate y transporte del cohete al puerto más cercano de «El Arenosillo» donde lanzará ARION 1; otra vez el puerto de Mazagón. Una vez allí, sería transportado a «El Arenosillo» de nuevo para poder ser inspeccionado y restaurado para poder hacerlo volar de nuevo.

PLD Space obtendrá una valiosa experiencia en el uso de paracaídas en ARION 1, así como un extenso conocimiento de las diferentes operaciones realizadas (y las respectivas dificultades a solventar) durante la recuperación y puesta a punto de ARION 1. Todo ello, junto con las conclusiones obtenidas del proyecto de recuperación de la Agencia Espacial Europea, servirá a PLD Space para desarrollar un sistema robusto y fiable que le permita recuperar la primera etapa de ARION 2.

De esta manera PLD Space se convertirá en un referente en sistemas de recuperación para cohetes de sondeo y para primeras etapas de pequeños lanzadores, a la vez que sentará las bases de dicha tecnología de recuperación en Europa.

4. Mercado y competidores

El mercado en el cual PLD Space quiere entrar es el de los lanzadores pequeños, comúnmente denominados «microlanzadores». Dichos microlanzadores, suelen poner en órbitas bajas (menos de 1.000 km) en torno a 50-250 kg de carga de pago.

En los últimos años, se ha producido un importante crecimiento del desarrollo de satélites pequeños (menos de 50 kg) y con ella, un aumento en la demanda de lanzamiento de estos satélites. Como se puede ver en los últimos estudios de mercado (figura 4), la demanda de lanzamiento va a crecer en los próximos años.

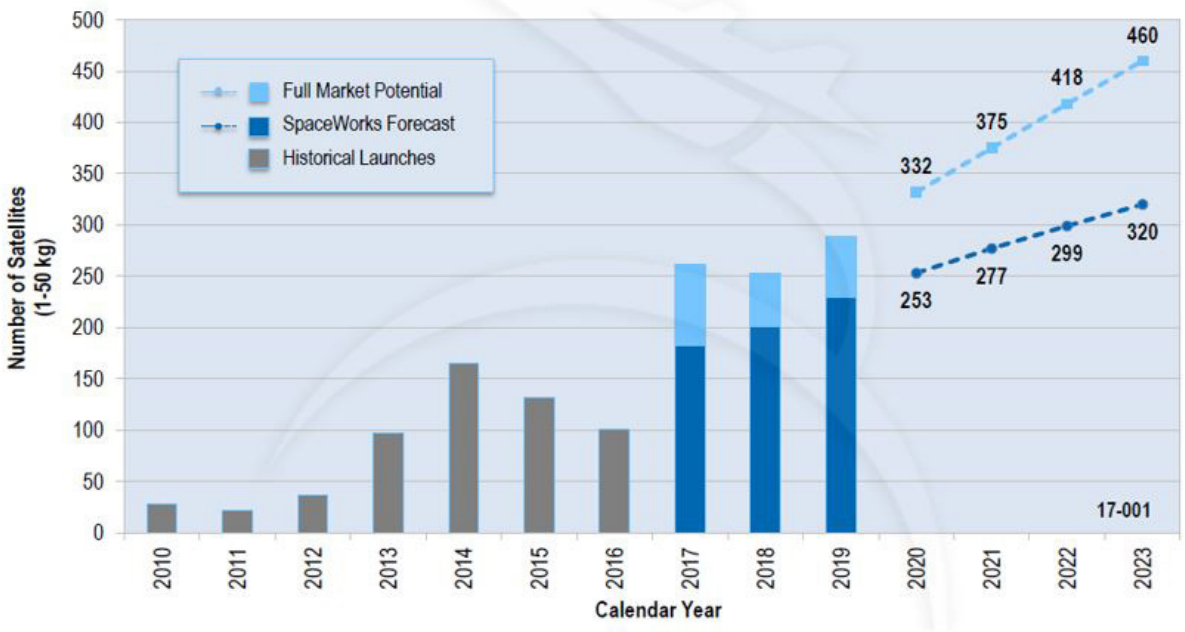


Figura 2. Estudio de mercado realizado por SpaceWorks [1] que muestra la predicción de lanzamientos de pequeños satélites.

Actualmente estos satélites han de ser lanzados como «carga secundaria» en lanzadores mucho más grandes. Esto quiere decir que no existe flexibilidad pues estos satélites (clientes) están a merced de los tiempos y las órbitas que les sean disponible en función de la órbita de la misión principal, es decir de un satélite mucho más grande.

Es por ello por lo que actualmente existen muchas iniciativas de microlanzadores, de tal manera que se pueda cubrir directamente las necesidades de lanzamiento de estos satélites. Es importante remarcar la importancia que estos lanzadores pueden tener también para el remplazo de satélites dispuestos en grandes constelaciones, otra tendencia que actualmente existe.

Actualmente existen varias compañías en Estados Unidos como Virgin Orbit, Firefly, RocketLab y Vector Space Systems, las cuales se encuentran activamente desarrollando sendos microlanzadores, mien-

tras que, en Europa, a día de hoy, solo existen conceptos de microlanzadores, siendo ARION 2 (y su predecesor ARION 1) uno de los pocos que a día de hoy se están materializando.

5. Conclusiones

Con esta comunicación, se ha intentado introducir el porqué de la necesidad de desarrollar un lanzador, y cuáles son las ventajas que supone dicho desarrollo para España.

Además, se ha expuesto cuál es la tendencia de crecimiento en el sector de los pequeños satélites, un tipo de satélites que como se ha visto, está teniendo un importante auge. Siendo estos satélites la principal apuesta en el segmento de la observación de la Tierra y de las telecomunicaciones «M2M – *Machine to Machine*», se pone de manifiesto la importancia que tiene su desarrollo para los intereses en defensa y seguridad de una nación, así como la importancia en contar con un lanzador dedicado que pueda en corto plazo y de manera económica este tipo de satélites en órbita.

ARION 2 supondrá el desarrollo por primera vez en España de un lanzador orbital, después de la paralización del lanzador Capricornio, contribuyendo también al desarrollo de tecnologías claves en el sector espacial como la propulsión y la reutilización.

Además, dotará a España de la capacidad de poner hasta 300 kg de carga de pago en órbitas bajas, precisamente aquellas orbitas por los satélites de observación de la Tierra y de telecomunicaciones basados en constelaciones más o menos grandes.

Finalmente, ARION 2 podrá convertirse en el microlanzador de referencia en Europa, proveyendo acceso al espacio de manera simple, flexible y asequible tanto a la industria, agencias espaciales, centros de investigación y academia.

Referencias

SpaceWorks: 2018 Nano/Microsatellite Market Forecast, 8th Edition [Internet]. Disponible en: http://www.spaceworkscommercial.com/wp-content/uploads/2018/04/Nano-Microsatellite-Market-Forecast-8th-Edition-2018.pdf

Empleo de naves no tripuladas (DRON/RPAS/UAV) en el entorno de la isla Decepción en el marco de la XXXI Campaña Antártica del Ejército de Tierra

Donis Quintairos, Antonio[1] y Prada Salmerón, Jose María[2]

1 Centro de Comunicaciones (CECOM) de la Comandancia General de Baleares perteneciente al Regimiento de Transmisiones 22 (Palacio Almudaina, c/ Reial S/N, 07001 Palma de Mallorca). Email: adonqui@et.mde.es (ADQ).

2 Sección de Sistema de Información y Comunicación (CIS) del Cuartel General de la Brigada de Sanidad (Pozuelo de Alarcón- Madrid). Email: jprasal@et.mde.es (JMP).

Resumen

El Ejército de Tierra (ET) participa en la Campaña Antártica Española desde el año 1988, que es la participación militar en el extranjero más antigua actualmente en vigor. Esta misión militar [1] es, sin embargo, única tanto por la lejanía y las dificultades climatológicas/físicas que entraña como por la importancia de la colaboración del Ejército con la investigación científica. Todo ello convierte a la Antártida en uno de los laboratorios científicos más importantes del planeta y, por tanto, en un lugar único para desarrollar proyectos y trabajos, bajo la supervisión del Tratado Antártico que implica la total protección del medio ambiente.

Este laboratorio científico ha despertado el interés de la XXXI Campaña Antártica (17-18) en volar DRONES/RPAS por primera vez en dicho continente antártico por el Ejército de Tierra, con distintos fines y misiones. La estricta legislación, dentro del marco del Tratado Antártico y en España, dirigida por el CPE, está regulada por el «Protocolo del Comité Polar Español (CPE) para la operación de aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS) y automatizadas (UAV) en la Antártida». Fundamentalmente basada en las regulaciones de Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), es temporal e indica el procedimiento para poder realizar actividades aéreas en la Antártida y aplicada a aeronaves inferiores a 25 kg de peso.

Palabras clave

Ejercito de Tierra (ET), Campaña Antártica (CA), drones (RPA), sistemas de aeronave pilotada remotamente (RPAS), Comité Polar Español (CPE), Tratado Antártico, Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA).

1. Introducción

El equipo de 13 militares del Ejército de Tierra de la XXXI Campaña Antártica del ET, estaba completamente definido a principios de marzo del 2017 al mando del comandante de Infantería D. Valentín Carlos Beneitez Martínez. Desde ese momento, los componentes trabajaron exhaustivamente en la preparación para desarrollo de la misión en el continente blanco durante el verano austral. Durante esta fase previa de preparación, que abarca desde los meses de marzo 2017 hasta diciembre 2017 (fecha de inicio de misión), los componentes de las distintas áreas realizan una preparación conjunta y propia de su especialidad o campo. Además, también se proponen, planifican y preparan los distintos proyectos a desarrollar y ejecutar, en cada una de las áreas, durante el desarrollo de dicha misión. Concretamente en el área de Comunicaciones y Sistemas de Información (CIS) se propuso volar drones en la isla Decepción para su aplicación según los fines marcados por el Comité Polar Español [2].

Figura 1. Foto lateral desde vértice baliza de la BGdC en uno los escasos días donde la climatología era muy favorable.

2. Desarrollo

El área CIS de la XXXI CA, compuesta por el brigada José María Prada Salmerón y capitán Antonio Donis Quintairos, tiene el cometido establecer y mantener la comunicación (satélite y radio) entre la

Base Gabriel de Castilla (BGdC) y España, desarrollar/mantener/soportar las distintas redes CIS en la BGdC, funciones de *Community Manager* y ejecutar el proyecto de vuelo de DRONES en la Antártida.

Evaluando cometidos y tiempos, era un proyecto sin muchas facilidades para desarrollar con un mínimo de garantías, más aún cuando los pilotos solamente tenían experiencia de volar drones a modo de afición. El primero en creer en el proyecto y, por lo tanto, animar e impulsar a José María y Antonio Donis para desarrollar este proyecto tan novedoso en isla Decepción fue el comandante Valentín Benéitez.

La guía inicial de trabajo, que nos marcaría el rumbo para poder llevar a cabo este proyecto, es el Protocolo del Comité Polar Español (CPE) para la operación de aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS) y automatizadas (UAV) en la Antártida[2]. Esta norma se aplicará a todas las operaciones con aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS o UAV) de peso inferior a 25 kg al despegue, para la realización de trabajos técnicos y científicos en la Antártida. De ella pueden extraer los requisitos y misiones necesarias, para que militares y científicos puedan volar estas aeronaves en dicho continente. Aquí es importante resaltar que, debido al referido Protocolo, en dicho continente solo se permita volar DRONES a la comunidad científica o con tales fines, estando totalmente prohibido al resto de personal como, por ejemplo, a los turistas [3].

El siguiente paso fue evaluar y estudiar las distintas misiones y cometidos que los drones pueden realizar en la Antártida. Con carácter exclusivo se pueden hacer vuelos con fines:

1. Actividades de investigación y desarrollo.
2. Levantamientos aéreos.
3. Observación y vigilancia en operaciones de emergencia, búsqueda y salvamento.

Figura 2. Foto donde las máquinas MERLO están realizando trabajos para reparar el muro de contención principal.

Lo siguiente fue ver qué requisitos y documentación son necesarios para que el CPE autorice a volar estas aeronaves en el continente Antártico:

1. Licencias de los pilotos.
2. Reconocimiento medico.
3. Seguros en vigor de los drones.
4. Plan de vuelo.
5. Declaración responsable para cada piloto.
6. Habilitación como operador de RPAS < 25 Kg para trabajos técnicos o científicos por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA).

Y por fin, la elección de las aeronaves a llevar a la Antártida. No fue una decisión fácil, dependió básicamente de dos aspectos: por un lado, las misiones que íbamos a realizar y por otro, la climatología. En cuanto a las misiones se necesitaba un dron que proporcionase material audiovisual de gran calidad, una cámara de 20Mp y que grabase vídeo en 4K. En cuanto a la climatología, a pesar de consultar a muchos

expertos en la materia, nadie nos podía dar una respuesta 100 % fiable, ya que las condiciones de vuelo en la Antártida no tienen nada que ver con las condiciones de vuelo en España y muy poca gente tiene la experiencia y conocimiento de cómo se comportaría un dron en la Antártida.

Así que con toda la información recopilada, junto con el estudio de la climatología del lugar: temperaturas de -10ºC a 0ºC en superficie, disminuyendo muy rápidamente con la altitud, vientos diarios en torno a 10-15 nudos que pueden cambiar en cualquier momento y rachas de 20-40 nudos, se convertía en un auténtico campo de pruebas para las aeronaves elegidas Todo esto nos hizo decidirnos por drones DJI de la familia PHANTOM, ya que tienen muy buenos equipos de grabación, fiabilidad de vuelo y no son muy costosos en comparación con otras aeronaves de uso profesional.

Figura 3. Probando y configurando distintos modelos de drones de fabricación personalizada en la Universidad de la Palmas IDeTIC.

3. Obtención de la autorización

Con todas estas misiones, requisitos, datos e incertidumbres, nos pusimos mano a la obra y el siguiente paso fue obtener las licencias de piloto de vuelo de dron avanzado en una empresa civil [4]. Esto nos permitió, además de ir adquiriendo horas de vuelo y experiencia en el manejo del dron, estar en contacto con muchos profesionales y profesores de vuelo, que nos asesoraban y nos daban consejos. Sin embargo, había un aspecto en el que ni ellos, con cientos de horas de vuelo a sus espaldas, podrían ayudarnos, y era cómo se comportaría un dron en la Antártida ante la adversa climatología. Los grandes enemigos de estas aeronaves son: el viento (no se recomienda volar con vientos por encima de 15 nudos) y las bajas temperaturas (por debajo de 0ºC). Un vuelo en España, por ejemplo, con estas condiciones se suspendería sin dudarlo, mientras que en la Antártida son las condiciones normales en las que diariamente tendríamos que volar.

Figura 4. Preparación y adquiriendo horas de vuelo con profesores y pilotos de drones. Cap. Antonio Donis, profesor de vuelo César y Brig. José María Prada.

El siguiente paso fue diseñar los planes de vuelo que realizaríamos en isla Decepción y que hay que remitir al CPE para su VºBº. Las operaciones de vuelos de DRON/RPAS, en el marco de la investigación de la XXXI Campaña Antártica, tienen como objetivo la captura de imágenes en el rango visible para generar modelos digitales del terreno (MDT) que posteriormente serán utilizados para:

1. Actividades de investigación y desarrollo de la propia Base Gabriel de Castilla.
2. Estudios aéreos para mejorar la viabilidad de la Base Gabriel de Castilla.
3. Observación y vigilancia en el registro de los efectos de la erosión generada por la degradación de la capa activa del permafrost por las estructuras que forman parte de la Base Gabriel de Castilla.
4. Observación y localización de posible salidas de emergencia de la isla de Decepción en caso de EMERGENCIA.

Continuamos con los reconocimientos médicos en el Centro de Instrucción de Medicina Aeroespacial (CIMA) [5] para la obtención del certificado médico de CLASE II que nos habilita a pilotar drones de más de 25 kg.

Finalmente se envía toda la documentación al CPE y el 6 de febrero del 2018 nos remiten el certificado donde nos autorizan para volar en isla Decepción «se AUTORIZA la ejecución de las actividades con UAV/RPAS, en los términos propuestos, en lo que respecta a los aspectos de impacto ambiental». Es este punto hay que resaltar lo importantísimo que era volar lejos de concentraciones de aves o mamíferos, ya que es de vital importancia que estas aeronaves no interfieran ni molesten a la fauna. De igual manera no está permitido volar en las zonas antárticas especialmente protegidas (ZAEP).

MINISTERIO
DE ECONOMÍA, INDUSTRIA
Y COMPETITIVIDAD

Comité Polar Español

Ref.: CPE-2017-23

ANTONIO QUESADA DEL CORRAL, Doctor en Ciencias Biológicas, como Secretario Técnico del Comité Polar Español,

INFORMA:

Antonio Donis Quintarios y José María Prada Salmerón, componentes de la dotación de la BAE Gabriel de Castilla durante la campaña antártica española 2017-2018, cumplen la normativa española y requerimientos del Comité Polar Español para la operación de aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS) y automatizadas (UAV) en la Antártida.

En las operaciones con UAV/RPAS se tendrá en cuenta:

1. Los UAV/RPAS se van a utilizar para fotografías, filmaciones y levantamientos aéreos
2. Las operaciones con UAV/RPAS seguirán los procedimientos indicados en el "Protocolo del Comité Polar Español para la operación de aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS) y automatizadas (UAV) en la Antártida.
3. Se evitará el sobrevuelo en las cercanías o sobre concentraciones de aves o mamíferos y, en todo caso, se procederá, en todo momento, según lo indicado en la Resolución 2 (2004) "Directrices para la operación de aeronaves cerca de concentraciones de aves en la Antártida".
4. NO se permite el sobrevuelo en Zonas Antárticas Especialmente Protegidas (ZAEP).

Se **AUTORIZA** La ejecución de las actividades con UAV/RPAS, en los términos propuestos, en lo que respecta a los aspectos de impacto ambiental.

Y para que conste expido el presente en Madrid, 6 de febrero de dos mil dieciocho

Antonio Quesada del Corral
Secretario Técnico del Comité Polar Español

CORREO ELECTRÓNICO
cpe@mineco.es

Figura 5. Autorización del CPE para vuelos de drones en isla Decepción.

4. Vuelos y misiones

Esa fecha, 6 de febrero de 2018 marca el comienzo de un proyecto que estaríamos ejecutando hasta el cierre de la Base Gabriel de Castilla en 23 marzo del 2018. Como ya llevábamos en la Base desde el 1 de enero, pudimos observar *in situ* lo difícil que sería volar un dron en esas condiciones climáticas de viento y temperatura. Lo que más nos preocupaba era el comportamiento de las baterías de polímero de iones de litio (LiPo). Una de sus características principales es que tienen un altísimo rendimiento pero, por el contrario, tienen que trabajar en un margen de temperaturas entre 20-50ºC. Como es lógico este margen no se acerca en absoluto a las temperaturas de isla Decepción, que están en torno -10-0ºC. Por ello la carga de las baterías se realizaba en condiciones ideales, dentro de los módulos de vida (25-30ºC). Cuando salíamos al exterior, para realizar los vuelos, llevamos las baterías envueltas con bolsas de calor, para que las baterías tuviesen una temperatura de transporte superior a 20ºC, insertarla rápidamente en el dron y despegar. Una vez en el aire el dron, se realiza un vuelo de calentamiento en un área de seguridad, de 1 o 2 minutos para que el equipo se compruebe y adquiera la temperatura propia. El rendimiento de las baterías al trabajar en estas temperaturas disminuye, siendo en torno al 75-80 % de rendimiento total de las baterías que se traduce en vuelos de 20 a 25 minutos de duración.

Figura 6. Importante la puesta en marcha y calentamiento de la aeronave.

El otro aspecto a tener en cuenta a la hora de iniciar el vuelo es la velocidad del viento. Con varios vuelos de prueba, observamos que no es recomendable volar con vientos de 18-20 nudos. Los vuelos que hemos realizado en su mayoría con vientos de 10-12 nudos, siendo muy escasos los días en que la velocidad del viento fuera menor de 5 nudos.

Con estos vuelos iniciales de los primeros días, marcamos las condiciones de vuelo en el ámbito de seguridad, y esto permitirá el respeto total del entorno, de la fauna, de la flora que es la primera premisa que hay que tener en cuenta a la hora de ejecutar cualquier trabajo en la Antártida.

Uno de los primeros trabajos realizados fue hacer vuelos por el espacio aéreo que rodea la Base Gabriel de Castilla. Como base científica, es una construcción que sufre cambios estructurares continuamente, para adaptarse al entorno y a las necesidades científicas. Con este material audiovisual, el personal técnico encargado de este cometido, puede tener una visión mucho más precisa para en un futuro hacer modificaciones, ampliaciones o cambios en los distintos edificios y módulos de la BGdC.

Figura 7. Vista general de la BGdC donde se puede apreciar su situación actual sobre el terreno.

Uno de los trabajos más importantes fue hacer una modelación en 3D del terreno donde se asienta la BGdC mediante imágenes orto imágenes. Dicho estudio ha sido liderado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) que ha utilizado este material para hacer un estudio de la cuantificación de la recisión y erosión en la costa acantilada del entorno próximo a la BGdC. La aplicación que se ha utilizado para hacer la planificación de vuelos sobre el terreno es la *Ground Station Pro*, para ello se situaban sobre el terreno balizas geo localizadas y se procedería a realizar un vuelo georeferenciado y así sacar un modelo 3D de terreno, una tarea que fue realizada por el INTA.

También se colaboró con el grupo de científicos del proyecto sobre procesos volcánicos post-caldera de la isla Decepción (Antártida). Se realizaron vuelos por distintas zonas de la isla y en concreto un vuelo vertical sobre una pared de uno 30 metros de alturas donde se puede ver claramente una chimenea de lava. Este vuelo se realizó a 60/70 cm de la pared, grabando un vídeo de gran calidad y donde se puede apreciar perfectamente el conducto por donde la lava progresa hasta el exterior de la corteza. Este material audiovisual también ha servido para impartir clases en la Universidad de Salamanca.

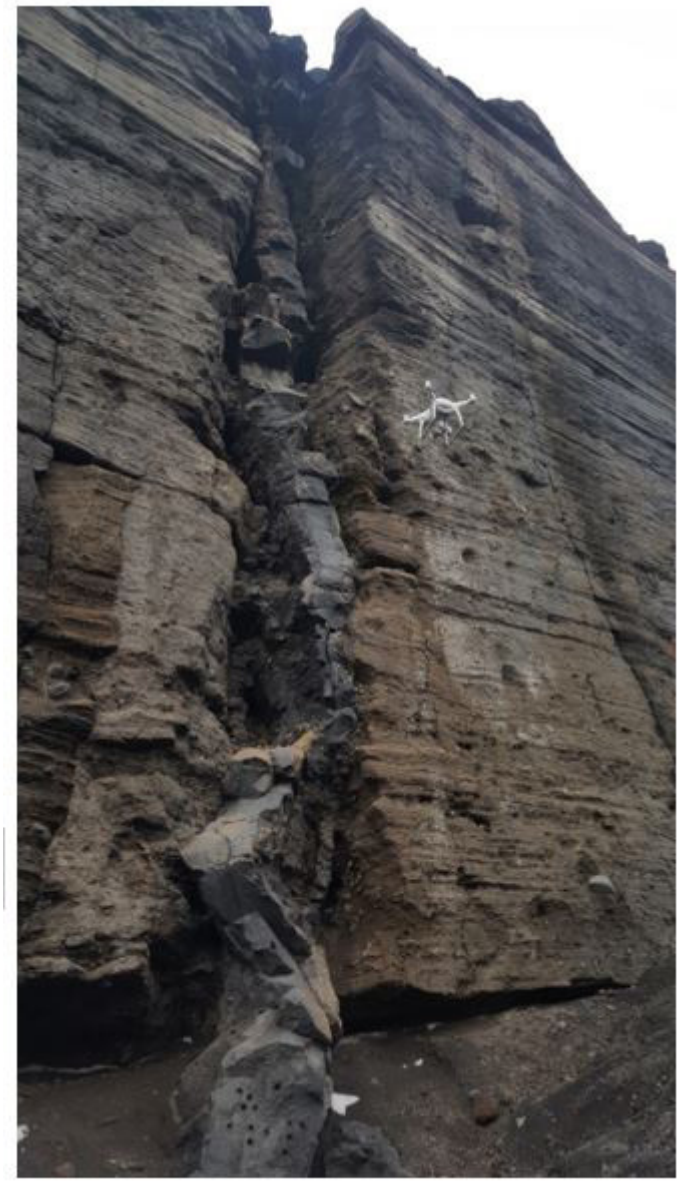


Figura 8. Vuelo en una chimenea de lava de 20 m.

Otro de los trabajos realizados fue el reconocimiento de una de las rutas de evacuación en la isla Decepción en caso de emergencia. Se planificaron y realizaron vuelos por la zona de Balleneros.

Y finalmente, fotos y vídeos han servido para dar a conocer, desde una perspectiva aérea y mediante los distintos canales de comunicación y RRSS, los cometidos y funciones que desarrolla la comunidad científica y el ET en la Antártida en apoyo a la ciencia. Algunos vídeos que se han subido a la cuenta twitter han sido reproducidos más de 100.000 veces.

5. Conclusiones

El uso de drones ha proliferado significativamente en sus distintas aplicaciones. Hoy pueden ser útiles para revisar líneas de tendido eléctrico, monitoreo científico de plantaciones, estudios ambientales y climáticos, estudios arqueológicos, construir puentes o restaurar edificios, repartir el correo o incluso para futuras atenciones médicas, y como no, para apoyo a la ciencia. Lo cierto es que existe todo un abanico de usos y aplicaciones de estos equipos que, sin duda, nos cambian nuestra forma de ver al mundo. Esta idea fue la que nos llevó a plantear volar drones en la Antártida cuyo fin último de dar APOYO Y DESARROLLO A LA CIENCIA siempre desde el respeto al medio ambiente.

Aunque no fueron fáciles los inicios del proyecto, ya que partió de cero completamente, poco a poco con ilusión, esfuerzo y horas, se fueron salvando todas las barreras documentales y administrativas necesarias para volar un dron en la Antártida. Cabe resaltar que cada país tiene una legislación distinta para el uso de drones en su espacio aéreo y es aplicada en el espacio aéreo de la Antártida para preservar la protección total del continente antártico.

Para terminar, destacar que llevar este proyecto a la Antártida nos ha hecho ver cómo los drones pueden facilitar los distintos cometidos y operaciones en apoyo y beneficio de la ciencia y la conveniencia de que la BGdC implementase un servicio permanente de vuelos de drones para que la comunidad científica pueda disponer de ellos de una manera fácil y sencilla.

Figura 9. Vista aérea de BIO Hespérides y BGdC.

Agradecimientos

En primer lugar a los compañeros de la XXXI Campaña Antártica del ET, sin su apoyo y ayuda, José María y Antonio Donis, no hubieran podido llevar a cabo este proyecto.

Agradecer a toda la comunidad científica desplegada durante la XXXI CA su apoyo, ayuda y conocimiento en esta área. También al Comité Polar Español por su asesoramiento y apoyo constante.

Al Ejército de Tierra, en especial al DECET, OCA y DIVOPE. También agradecimiento al INTA por su colaboración y aporte técnico.

Y por último a Cesar y Domingo, instructores y pilotos de vuelo, los cuales nos han volcado todos sus conocimientos y experiencia para poder realizar todo este trabajo en un tiempo record.

Referencias

1. *Directiva 05/07 Campaña Antártica del Ejercito de Tierra donde se detallan las normas, misiones y procedimientos de esta misión. Estado Mayor Ejercito de Tierra 2007(pendiente de actualización).*
2. *Protocolo del Comité Polar Español (CPE) para la operación de aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS) y automatizadas (UAV) en la Antártida Comité Polar Español 2015 (28ª Reunión del CPE el 17 de noviembre de 2015).*
3. *Tratado Antártico prohíbe volar drones con fines recreativos.*
4. *EliteDronSchool (ATO) academia certificada por AESA.*
5. *Centro Instrucción de Medicina Aeroespacial (CIMA) perteneciente al Ejercito de Aire y ubicado en Base Aérea de Torrejón Ardoz (Madrid).*

Caracterización experimental de la entrada en pérdida de superficies alares a baja velocidad

Caballero Gómez, Ángel Enrique[1,*], Serna Serrano, José[2] y López Belchí, Alejandro[2]

[1] Base Aérea de Zaragoza (Ala 31). Ejército del Aire. angelcaballerogomez94@gmail.com (ACG).

[2] Departamento de Ingenierías y Técnicas Aplicadas. Centro Universitario de la Defensa en la Academia General del Aire. jose.serna@cud.upct.es (JSS), alejandro.lopez@cud.upct.es (ALB).

* Autor principal y responsable del trabajo; angelcaballerogomez94@gmail.com (ACG).

Resumen

En el presente trabajo se proponen y valoran varios métodos para la determinación experimental del punto de desprendimiento de la capa límite sobre una superficie alar. Para ello se ha realizado una adecuación del túnel de viento del Centro Universitario de la Defensa con la finalidad de posibilitar la visualización de líneas de corriente, implementando la técnica de visualización *smoke-wire*. Posteriormente, se ha procedido a la grabación de los patrones de flujo sobre un perfil NACA0015 a diferentes valores de ángulo de ataque y velocidades de flujo. Los fotogramas obtenidos de estas grabaciones han sido procesados haciendo uso de técnicas de filtrado y binarización de imágenes para la discriminación de líneas de corriente próximas a la superficie del perfil y, de este modo, calcular la distancia entre la superficie alar y la línea de corriente digitalizada más próxima a la misma. A partir de esta distancia se implementan los métodos de caracterización del punto de desprendimiento. Los dos primeros métodos se basan en un ajuste lineal y cuadrático de esta distancia, aproximación a partir de la cual se puede extrapolar la posición del punto de separación. El tercer y el cuarto método analizan la evolución de la distancia línea de corriente – superficie, y emplean como criterio de separación el incremento continuado de dicha distancia durante una longitud dada, o el incremento mayor que un cierto umbral de esta distancia entre dos estaciones consecutivas. Los cuatro métodos propuestos identifican el punto de desprendimiento de la capa límite con un error absoluto medio inferior al 10 % de la cuerda, siendo el segundo método el que presenta un error inferior de los métodos analizados.

Palabras clave

Aaerodinámica, pérdida aerodinámica, visualización de flujo, *smoke-wire*, túnel de viento, sustentación.

1. Introducción

Las técnicas de visualización de flujos han sido ampliamente empleadas para la comprensión de los campos fluidos. En particular, la técnica de *smoke-wire,* consistente en el sembrado de un flujo de aire con partículas de humo mediante evaporación de una sustancia en filamentos resistivos de pequeño diámetro y la generación de un plano de luz que ilumine las referidas partículas, permite obtener una aproximación de las líneas de corriente del campo fluido bajo estudio [1]. El patrón de líneas de humo iluminadas se puede grabar digitalmente y posteriormente procesar las imágenes obtenidas para determinar parámetros de interés del problema en cuestión. En este trabajo se hará uso de la técnica de *smoke-wire* para determinar experimentalmente el punto de desprendimiento en un perfil alar estandarizado (NACA 0015), para lo cual se ha desarrollado una metodología de tratamiento de las imágenes y algoritmos de detección del referido punto.

El referido punto de desprendimiento es aquel en que la capa límite (región de pequeño espesor del campo fluido próxima a un cuerpo sólido en flujos a números de Reynolds elevados [2]) comienza a contener un flujo reverso (o equivalentemente, el punto donde el esfuerzo de fricción se hace nulo) y, en el caso de perfiles alares, tiene consecuencias drásticas para la práctica del vuelo, con una reducción drástica de la sustentación alar y un aumento de la resistencia [3]. Desde este punto de vista, todos los cursos de aerodinámica para la formación de pilotos hacen énfasis en la comprensión de este fenómeno. Este trabajo, además de las técnicas de procesado de imágenes y detección del punto de desprendimiento, tiene interés por su aplicación práctica en la formación de los futuros oficiales del Ejército del Aire, dado que el sistema de visualización de flujo y el *software* aquí expuesto es empleado en el curso teórico de aerodinámica que deben superar durante su tercer año de estudios en el Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier.

2. Montaje experimental

Para los ensayos propuestos en este trabajo, se han realizado ciertas modificaciones al túnel aerodinámico subsónico de sección cerrada y circulación abierta del CUD [4] (figura 1).

Figura 1. Túnel aerodinámico presente en el CUD.

Para la implementación de la técnica de *smoke-wire* se colocaron 14 filamentos de hilo resistivo inmediatamente aguas arriba de la sección de ensayos (concretamente en el marco de unión con la sección de laminarización (figura 2a)) y un filamento adicional situado a escasos milímetros del borde de ataque del perfil aerodinámico para los ensayos de *flapping*[1]. Todos ellos tuvieron la necesidad de ser tensados con el objetivo de evitar la deformación de los hilos al hacerles pasar una corriente eléctrica y así conseguir líneas de humo uniformes. Para ello se situaron unas pesas en la parte inferior de cada uno de los filamentos (figura 2b). Para la generación de humo, la sustancia empleada fue glicerina, por su facilidad para ser evaporada y generar un humo fácil de visualizar.

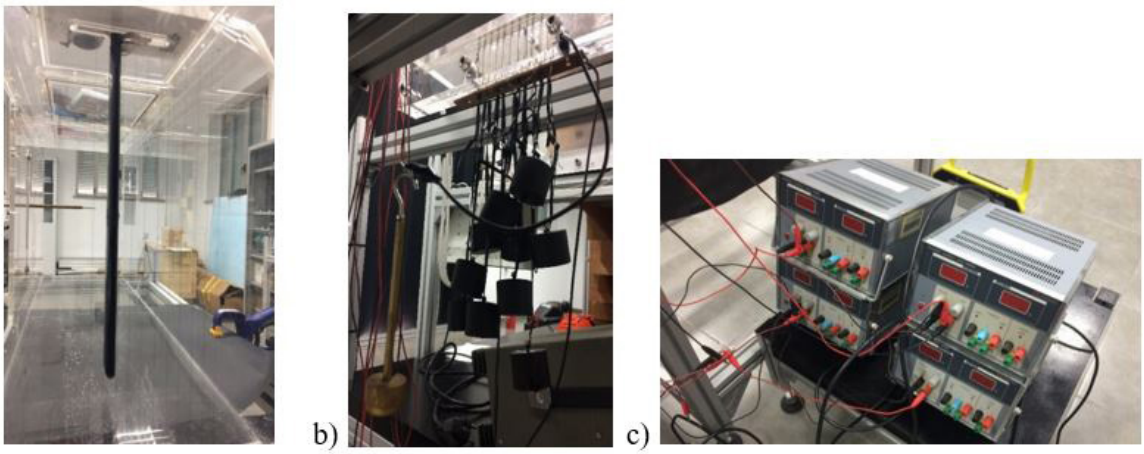


Figura 2. a) Sección de ensayos con las resistencias. b) Pesas para tensar las resistencias. c) Fuentes eléctricas.

Para evaporar la glicerina, se hace pasar por los hilos resistivos una corriente eléctrica. Para tener la intensidad suficiente se emplearon 4 fuentes eléctricas de 24 V y 2 A (figura 2c). En el caso del *flapping*, al emplear un único hilo resistivo (el ubicado en el borde de ataque), se utilizó una única fuente eléctrica con el fin de no elevar excesivamente la temperatura del mismo y rompiese.

Para la iluminación de las líneas de humo se empleó un láser de diodo de color verde y 100 mW de potencia con una lente cilíndrica para la generación de un plano perpendicular al perfil.

El perfil empleado, como se ha comentado, fue el NACA 0015 con una cuerda de c=100 mm y una envergadura de b=400 mm, ocupando todo el alto de la sección de ensayos.

La figura 3a muestra un ejemplo de los fotogramas obtenidos con el sistema comentado.

3. Experimentos realizados y software desarrollado

Los ensayos realizados consistieron en la grabación de las líneas de corriente durante un tiempo aproximado de 30 segundos para diferentes valores del ángulo de ataque del perfil alar (u = 0, 3, 6, 9, 12 y 15º) y tres velocidades de flujo diferentes (u = 0,65, 1,15 y 1,65 m/s). Adicionalmente, se realizó una prueba de *flapping* consistente en una variación continua del ángulo de ataque de 0 a 18º, con una velocidad de flujo de 0,65 m/s.

3.1. Procesado de imágenes

Tras la grabación de cada ensayo, el *software* desarrollado en entorno MATLAB realiza las siguientes acciones:

1) Extracción de los fotogramas grabados.

---

1 *Flapping*: en este trabajo hace referencia al movimiento continuo en cabeceo del perfil aerodinámico.

1. Carga de datos geométricos correspondientes al ensayo (ángulo de ataque y coordenada del borde de ataque del perfil alar). Estos datos son introducidos previamente en el *software*.
2. Transformación de los fotogramas grabados (figura 3a) a escala de grises (figura 3b) y, aplicación de diversos filtros para aumentar el contraste y reducir el ruido, obteniendo imágenes como la mostrada en la figura 3c. Los parámetros de los filtros son introducidos previamente en el *software* y pueden ser modificados en función del experimento.

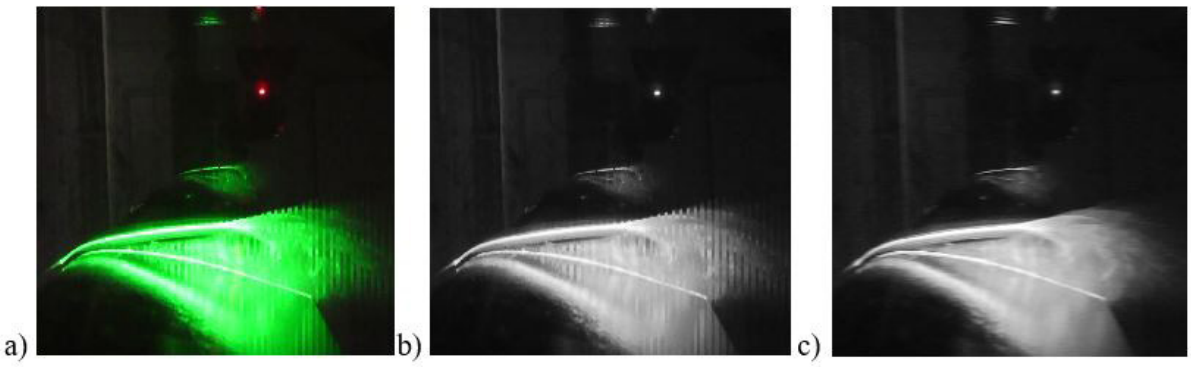


Figura 3. Procesado de fotogramas.

3. Binarización de la imagen y superposición del perfil en la misma.
4. Aplicación del algoritmo de identificación de la línea de corriente más próxima al perfil alar. Para ello se buscan, para cada abscisa (x), los valores de ordenada (y) que tienen valor de intensidad de imagen de 1 (tras la binarización de la imagen, en blanco en la figura 4). De los valores detectados, para cada posición x_i, el que tiene valor de y más próximo al extradós del perfil (en verde en la figura 4) se adopta como la línea de corriente objetivo (en azul en la figura 4).

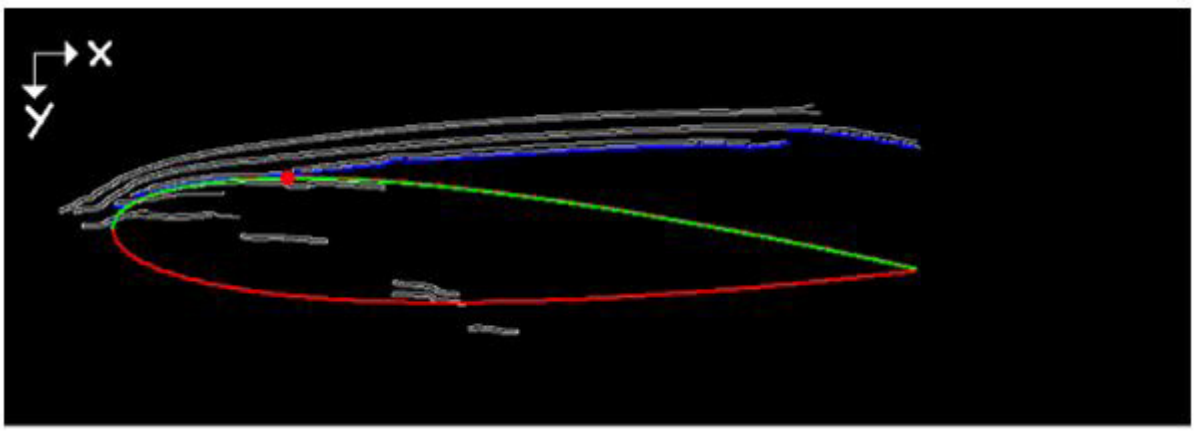


Figura 4. Visualización de las líneas de corriente detectadas tras la binarización (blanco) y, en particular, de la línea de corriente más próxima al extradós sobre la imagen procesada (azul).

5. Cálculo de la distancia existente entre la superficie alar y la línea de corriente más próxima a la misma para las diferentes abscisas (x_i), generando un vector con la evolución en la dirección de la corriente de la referida distancia.
6. Aplicación de algoritmos de detección de irregularidades y reducción de ruido al vector distancia calculado anteriormente.
7. Aplicación del método de identificación del punto de desprendimiento (siguiente epígrafe).

3.2. Métodos de determinación del punto de separación de la capa límite

Se proponen en el presente trabajo cuatro métodos para la determinación del punto de separación de la capa límite una vez que se conoce la evolución de la distancia de la línea de corriente más próxima al perfil. Esta distancia se referirá en el resto del epígrafe como *d(x)*.

- *Primer método.* Se considera que *d(x)* se puede aproximar a una función lineal cuyo corte con el eje de abscisas es el punto de desprendimiento.
- *Segundo método.* Se considera que *d(x)* se puede aproximar a una función cuadrática entre x_{min} y x_{max} , siendo estos valores las posiciones mínimas y máximas para las que se tienen datos de la línea de corriente. En el punto medio de validez de la aproximación cuadrática $x_{med} = (x_{min}+x_{max})/2$, se calcula la recta tangente a la función calculada y su corte con el eje de abscisas se identifica como punto de desprendimiento.
- *Tercer método*. Se genera el vector $\delta(x_i) = d(x_{i+1})-d(x_i)$, esto es, la variación de distancia *d(x)* entre puntos (píxeles) consecutivos. Cuando $D(x_i)$ es positivo en N_p puntos consecutivos, el primero de estos puntos se considera el punto de separación.
- *Cuarto método.* Se identifica como punto de desprendimiento el primer valor de x_i que verifica $\delta(x_i) > C_4$.

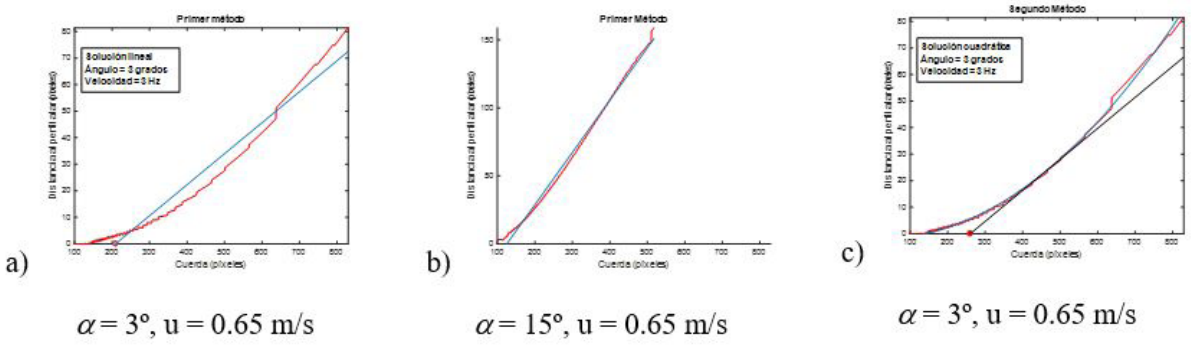


Figura 5. Comparación de la función d(x) (línea roja) con las aproximaciones polinómicas de los métodos 1 y 2 (líneas azules). a) y b) primer método. c) segundo método.

4. Resultados

4.1. Comparación de los métodos de cálculo del punto de separación

Los resultados obtenidos con los diferentes métodos de identificación del punto de desprendimiento varían, siendo uno de los objetivos del trabajo la determinación del método más preciso. Para valorar la precisión de los métodos se ha empleado como variable de mérito el error absoluto medio entre el punto de separación calculado para los distintos fotogramas, $<x_{sep,met,i}>$ (i=1,2,3,4), y el punto de separación obtenido visualmente del análisis de los mismos, $x_{sep,real}$, cuyos valores se recogen en la tabla 1. Como se puede observar en esta tabla, los puntos de desprendimiento muestran, en términos generales, una tendencia a aproximarse al borde de ataque a medida que aumenta el ángulo de ataque y disminuye la velocidad del flujo, que es el comportamiento esperado.

Hay que hacer mención a datos incoherentes con la teoría de perfiles, como la entrada en pérdida del perfil aerodinámico para ángulos pequeños (α=0º) al tiempo que no se detecta separación de la capa límite en el caso de α=3º y u=1,65 m/s o α=6º y u = 1,15, 1,65 m/s. Esto se debe al deficiente acabado superficial del perfil empleado. Sin embargo, en los estadios iniciales, el presente trabajo no pretende tanto determinar el punto de separación exacto sobre una geometría dada, como valorar la capacidad del sistema de visualización de flujo y los algoritmos automatizados para la detección del punto de despren-

dimiento. Consecuentemente, se empleó el material disponible y se dejó para futuros trabajos la mejora del acabado y las tolerancias de las geometrías a estudiar.

$x_{sep,real}/c$		α (º)					
		0	3	6	9	12	15
u (m/s)	0,65	0,330	0,218	0,226	0,079	0,036	0,029
	1,15	0,449	0,163	1	0,101	0,060	0,027
	1,65	0,467	1	1	0,479	0,025	0,047

Tabla 1. Puntos de desprendimientos $x_{sep,real}/c$ obtenidos del análisis visual de los fotogramas. Un valor de 1 indica que no hay separación de la corriente

Adicionalmente, para los dos primeros métodos, al hacer uso de sendas aproximaciones polinómicas (lineal y cuadrática según método) se ha calculado el coeficiente de determinación R^2 de dichas aproximaciones, presentando los resultados en la tabla 2. En esta tabla se puede observar que la aproximación lineal es buena para los ensayos a velocidades bajas (0,65, 1,15 m/s) y ángulos de ataque elevados (12-15º), esto se debe a que en estos casos la corriente se separa en las proximidades del borde de ataque y la línea de corriente de separación tiene un comportamiento en muchos casos lineal [5], sin embargo, cuando aumenta la velocidad o disminuye el ángulo de ataque, al desplazarse hacia el borde de salida el punto de separación hay una mayor zona de la función *d(x)* que corresponde a flujo adherido y, por tanto, el valor *d(x)* estaría relacionado con el crecimiento de la capa límite que no es lineal con la distancia [4]. En relación a la aproximación cuadrática, como es de esperar al aumentar el grado del polinomio de ajuste, mejora el coeficiente de determinación [6], siendo remarcable la bondad de la aproximación en todos los casos con valores superiores a 0,95 excepto para los ensayos a 1,65 m/s y ángulos de 3, 6 y 9º. Estos valores llevan a concluir que no habría una gran mejoría de los resultados si se incrementara el grado del polinomio.

R^2		α (º)					
		0	3	6	9	12	15
u (m/s)	0,65	0,912/0,998	0,954/0,998	0,957/0,988	0,977/0,996	0,989/0,999	0,994/0,999
	1,15	0,845/0,993	0,948/0,951	0,926/0,962	0,989/0,998	0,997/0,998	0,997/0,999
	1,65	0,804/0,988	0,479/0,753	0,785/0,863	0,339/0,596	0,996/0,997	0,984/0,995

Tabla 2. Coeficientes de determinación de la aproximación lineal/cuadrática de la función *d(x)*

Los resultados para el punto de desprendimiento obtenido con los diferentes métodos se recogen en la tabla 3. Hay que remarcar que la escasa calidad de los fotogramas una vez procesados, para el caso de α=9º u=1,65 m/s, no permitió realizar el análisis anteriormente expuesto, no presentando resultados para este caso.

e_1/e_2 e_3/e_4		α (º)					
		0	3	6	9	12	15
u (m/s)	0,65	-0,14/-0,02 +0,07/-0,03	-0,07/+0,00 +0,06/+0,00	-0,06/-0,01 +0,06/+0,06	-0,03/-0,01 +0,08/+0,05	+0,00/+0,01 +0,08/+0,00	+0,01/+0,02 +0,07/+0,06
	1,15	-0,22/-0,04 +0,02/+0,02	-0,09/-0,08 +0,11/+0,00	+0,00/+0,00 +0,00/+0,00	-0,08/-0,07 +0,06/-0,10	-0,03/-0,03 +0,06/+0,04	+0,00/+0,01 +0,07/-0,03
	1,65	-0,22/-0,02 -0,06/+0,53	+0,00/+0,00 +0,00/+0,00	+0,00/+0,00 +0,00/+0,00	-	-0,03/-0,03 +0,10/+0,08	-0,01/+0,01 +0,06/+0,00

Tabla 3. Errores absolutos. Punto de separación calculado con los diferentes métodos, se presenta como como $e_i=[<x_{sep,met,i}>- x_{sep,real}]/c$, donde i=1,2,3,4 hace referencia al método empleado

Analizando la tabla 3, se puede observar que incluso el primer método (de formulación sencilla) proporciona resultados relativamente buenos, con errores inferiores al 10 % de la cuerda (c) en la mayoría de los casos, a excepción de los casos comentados anteriormente en que el coeficiente de determinación R^2 presenta valores bajos. El mejor ajuste del segundo método se traduce en una mejoría de los resultados obtenidos con el primer método, en especial donde este daba errores superiores al 10 %c. El error absoluto medio del segundo método es de 0,02c, con ello se podría argumentar que la incertidumbre en el cálculo del punto de separación al aplicar este algoritmo es del orden del 2 % de la cuerda.

Siendo muy buenos los resultados del segundo método, los métodos 3 y 4 se proponen con el objetivo de trabajar directamente con los datos obtenidos tras el procesado de las imágenes y no ser necesaria la aproximación polinómica. Para el tercer método, se realizó en primer lugar un ajuste del parámetro N_p, procesando los datos con valores N_p = 100, 80, 60, 10. El menor error medio se obtuvo para N_p = 10, y para este valor se presentan los resultados en la tabla 3. Se observó que los puntos de separación de la capa límite presentaban una progresión hacia el borde de ataque más suave que con los métodos anteriores y tenían valores muy similares para cada ángulo de ataque al variar la velocidad. Esto se debe a que la velocidad para estos ensayos no varía considerablemente. Los errores obtenidos están en línea con el primer método, siendo inferiores al 10 % de la cuerda en la mayoría de casos. Para el cuarto método se testaron valores de umbral C_4 = 0,95, 0,90, 0,85, 0,80 y 0,75, obteniendo los mejores resultados (presentados en la tabla 3) para C_4 = 0,95. Con este método, el caso de α= 0º y u = 1,65m/s es identificado como un flujo no separado (x_{sep}/c = 1), de ahí el gran error que se muestra y que puede hacer dudar de la conveniencia de usar este método. Sin embargo, exceptuando este valor atípico, el método funciona con precisión similar a la de los otros métodos, obteniendo errores inferiores al 10 %c.

Como resumen de este epígrafe, todos los métodos proporcionan resultados similares, siendo el mejor método el denominado método 2. Dado que el tiempo de cálculo necesario por los diferentes métodos es mínimo, se pueden emplear todos ellos para procesar cualquier ensayo realizado y, en caso de detectar divergencia significativa de resultados entre los distintos métodos, analizar el caso con mayor detalle para discriminar qué método es el idóneo para dicho ensayo.

4.2. Presentación de resultados

El *software* desarrollado permite al usuario diferentes presentaciones de los resultados. En la figura 6 se muestra parte de la información gráfica que el *software* genera. En particular se muestra, en la parte superior, un esquema del perfil aerodinámico junto con los puntos de desprendimiento obtenidos de los diferentes métodos (1: celeste, 2: rojo, 3: amarillo, 4: fucsia) y las líneas de corriente obtenidas tras el tratamiento de los fotogramas. En la parte inferior izquierda se muestra la posición del punto de desprendimiento calculado con los diferentes métodos para velocidad constante y distintos ángulos de ataque, para ver el efecto de este último parámetro. Análogamente, el *software* puede presentar la dependencia con la velocidad para ángulo de ataque fijo y seleccionar los métodos de cálculo que se desean.

4.3. Flapping

Otro ensayo realizado, como se comentó anteriormente, consistió en la variación continua del ángulo de ataque entre 0 y 18º con la finalidad de estudiar en el futuro el efecto de dicho movimiento en el punto de separación. Esto permitiría detectar diferencias con el caso estacionario y posibles histéresis. En la parte inferior derecha de la figura 6 se presentan los resultados obtenidos para u=0,65m/s y 29 ángulos de ataque diferentes dentro del intervalo de 0 a 18º. En dicha figura, los asteriscos representan medidas para el caso en que el ángulo de ataque va incrementando y los círculos medidas cuando el ángulo de ataque decrece. En esta figura se puede observar cierta histéresis en los ángulos de ataque pequeños, cuando el punto de separación se aleja del borde de ataque.

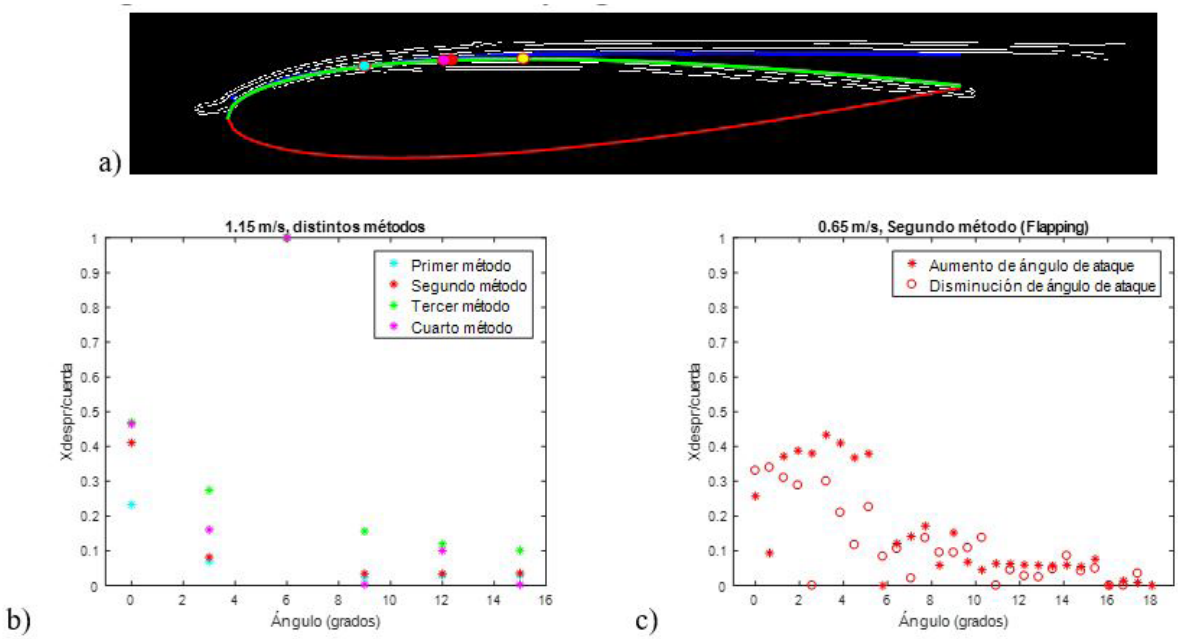


Figura 6. a) Resultados, sobre el perfil aerodinámico, de los puntos de desprendimiento a=0º u = 0,65 m/s; b) variación del punto de desprendimiento con el ángulo de ataque para u = 1,15 m/s; c) Puntos de desprendimiento obtenidos en el experimento de Flapping, aplicando el segundo método de resolución.

5. Conclusiones

En base a los resultados presentados, el sistema de visualización de flujo desarrollado cumple su objetivo para velocidades de flujo bajas, del orden de 1 – 2 m/s. A velocidades superiores, las líneas de humo generadas en los *smoke-wire* se desestabilizan dado que son la estela de los filamentos resistivos y los filamentos no se ven nítidos, no pudiendo procesar correctamente los fotogramas grabados. La intensidad de luz y el sistema de grabación empleados son suficientes para las visualizaciones realizadas.

El *software* desarrollado permite, con unos mínimos ajustes por parte del usuario (geometría, tamaño y posición del perfil alar, umbrales de filtrado, métodos 3 y 4), automatizar la detección del punto de separación de la capa límite. Al emplear distintos métodos, la comparación entre los valores de los mismos puede ayudar al usuario a seleccionar el método más adecuado para cada situación. En general el segundo método, como se ha expuesto, es el que lleva a menores errores. Adicionalmente, el *software* presenta los resultados gráficamente de una manera comprensible para el usuario.

El sistema está preparado para la realización de ensayos de *flapping*, con la finalidad de determinar el efecto de la velocidad angular de variación del ángulo de ataque en los fenómenos de separación de la capa límite, este fenómeno es de especial interés en UAV de pequeño tamaño que generan la circulación necesaria para volar mediante batimiento de sus alas.

Finalmente, se propone una mejora en la calidad del acabado y las tolerancias del perfil aerodinámico para comparar los resultados con casos de referencia ampliamente documentados así como un mejor posicionamiento del sistema de iluminación y grabación para garantizar la perpendicularidad del plano láser al perfil y al eje óptico de la cámara.

Referencias

1. *S. S. Dol, M. A. Mohd Nor y M. K. Kamaruzaman, «An Improved Smoke-Wire Flow Visualization Technique,» de Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, Elunda, Grecia, 2006.*

2. *J. D. Anderson Jr., «Ludwig Prandtl´s Boundary Layer,» Physics Today, vol. 58, nº 12, pp. 42-48, 2005.*
3. *J. D. Anderson, Introduction to Flight, New York: McGraw-Hill, 2005.*
4. *J. Serna, A. López-Belchí, F. J. Sánchez, Velasco, Capacidades del Túnel Aerodinámico del Centro Universitario de la Defensa de San Javier. En Asorey-Cacheda, R. et al., Actas: III Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2015. Ed. Centro Universitario de la Defensa de Marín, pp. 801-808, 2015.*
5. *Williams, J.C., Incompressible Boundary-Layer Separation, Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 9, pp 113-144, 1977.*
6. *J. Aldás Manzano y E. Uriel Jiménez, Análisis multivariante aplicado con R, Madrid: Paraninfo, 2017.*

Diseño y fabricación de una instalación experimental de bajo coste para el análisis de flujos en toberas convergentes-divergentes

Bañón Sánchez, José David[1*], Serna Serrano, José[2] y López Belchí, Alejandro[3]

[1] Base Aérea de Albacete (Ala 14). Ejército del Aire. jdbs1995@gmail.com (JBS).

[2,3] Departamento de Ingenierías y Técnicas Aplicadas, Centro Universitario de la Defensa, Base Aérea de San Javier. jose.serna@cud.upct.es (JSS), alejandro.lopez@cud.upct.es (ALB).

* Autor principal y responsable del trabajo: jdbs1995@gmail.com (JBS).

Resumen

En las últimas décadas, el estudio de flujos supersónicos ha sido realizado en túneles de viento con el fin de obtener resultados empíricos útiles y aplicables a numerosos campos de estudio. En este trabajo se propone el desarrollo de un túnel de viento de descarga de pequeña escala con una tobera convergente-divergente. En esta instalación será posible analizar la distribución de presión en la tobera, la formación de ondas de choque en la misma, y se presenta la opción de anexar una instalación de Schlieren para poder visualizar dichas ondas. El trabajo incluye consideraciones teóricas y de diseño, los cálculos teóricos de dimensionado de la instalación y un análisis detallado de la distribución de presión en la tobera. También se presentan fotos del montaje empírico realizado.

Palabras clave

Túnel de viento, supersónico, tobera.

1. Introducción

La obtención de un flujo de aire supersónico a partir de unas condiciones de reposo o subsónicas generalmente hace uso de toberas convergentes-divergentes. Estas consisten en conductos de sección transversal variable, inicialmente decreciente y posteriormente creciente, siendo conocida la sección de área mínima como garganta. En su versión más simplificada (conductos de sección transversal (A) lentamente variable, flujo uniforme en cada sección, movimiento unidimensional con velocidad u y fluido ideal), el análisis de este problema [1] conduce a la siguiente expresión:

$$\frac{du}{u}(M^2 - 1) = \frac{dA}{A}. \qquad (1)$$

donde M es el número de Mach. Este resultado muestra que para acelerar un flujo subsónico (M<1) se precisan conductos convergentes (dA < 0), en tanto que para el caso supersónico (M>1) se precisan conductos divergentes (dA > 0). Consecuentemente, para conseguir que un flujo acelere de subsónico a supersónico, este debe ser acelerado en un conducto convergente hasta alcanzar la velocidad del sonido y, posteriormente seguir acelerando en un conducto divergente.

En aviación, las toberas referidas anteriormente se encuentran en plantas propulsivas de plataformas de altas prestaciones, generalmente turborreactores o turbofanes de baja relación de derivación (como el que motoriza la plataforma EF2000) para conseguir un chorro de aire de gran velocidad que maximice el empuje. Otra aplicación aeronáutica se encuentra en los túneles de viento supersónicos, en estos la corriente supersónica se hace incidir sobre el objeto bajo estudio (p.ej. un modelo de aeronave supersónica). En este trabajo se presenta un túnel de viento supersónico de muy pequeño tamaño y bajo coste en el que no es posible el estudio de la fluidodinámica alrededor de cuerpos (por el tamaño). Sin embargo, se muestra como una herramienta de gran utilidad para estudiantes de cursos donde se tratan aspectos de flujos compresibles, complementando la formación teórica con una sesión práctica. En esta sesión se comprobarán los resultados teóricos de la distribución de presión en una tobera, la capacidad de la misma de acelerar el fluido hasta valores supersónicos, y, potencialmente, la visualización de las ondas de choque. Estas discontinuidades del campo fluido, sin una demostración física de las mismas, son concebidas por parte del alumnado como un artificio teórico – matemático.

2. Fundamentos teóricos del diseño de toberas para flujos supersónicos

Se considera una tobera convergente-divergente conectada a un depósito de gas presurizado (a presión ($(p_d)_t$) a cuya salida existe un regulador de presión que permite fijar la presión de remanso a un valor $p_t < (p_d)_t$ (Figura 1). Este es el esquema típico de los túneles de viento supersónicos de descarga [2][3].

El primer análisis se realizará para la condición de adaptación, lo que significa en toberas convergentes-divergentes que se tiene flujo supersónico en la zona divergente, siendo la presión de descarga igual a la presión ambiente y no existiendo ondas de choque en el interior ni en la sección de salida de la tobera.

Esta condición se obtiene para una relación entre la presión de remanso y la presión ambiente (p_t/p_{amb}) determinada, fijada la relación de áreas entre la garganta y la salida de la tobera (A_s/A_g). Considerando que el volumen del depósito es V, y que está presurizado inicialmente a P_{0d} y con temperatura T_{0d}, el objetivo de este primer análisis es determinar en función del área de garganta, de la presión de remanso fijada en el regulador y de la presión ambiente, el área de salida necesaria y el tiempo de descarga disponible para el ensayo.

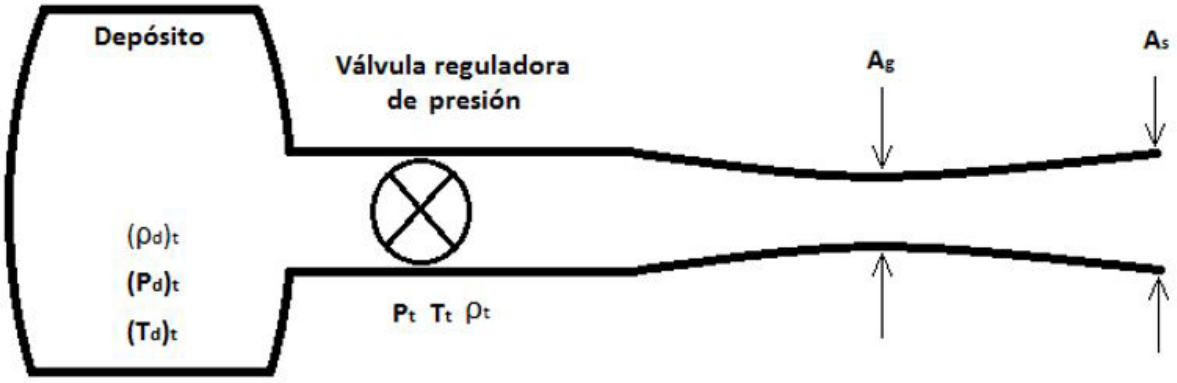


Figura 1. Tobera convergente-divergente conectada a un depósito y a una válvula reguladora de presión.

2.1. Determinación del área de salida de la tobera

En primer lugar, para determinar el área de salida se aplicará la ecuación de continuidad del fluido a través de la tobera [1]. Dado que el gasto másico es constante en la tobera se llega a la siguiente relación:

$$\frac{A_s}{A_g} = \frac{f(1)}{f(M_s)} \; con \; f(M) = M\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \qquad (2)$$

donde M_s se puede calcular de la conservación de las magnitudes de remanso en la tobera y la condición de adaptación:

$$\frac{p_t}{p_{amb}} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_s^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \qquad (3)$$

De esta forma, fijada un área de garganta, y la relación p_t/p_{amb} se puede determinar el área de salida.

2.2 Determinación del tiempo de duración del ensayo

Seleccionadas las áreas de garganta y salida de la tobera es de interés para los ensayos determinar, para unas magnitudes de remanso y un volumen del depósito conocidos, cuánto tiempo se puede mantener el flujo supersónico adaptado a M_s. El cálculo de esta duración consiste en determinar el instante temporal en que la presión del depósito $(p_d)_t$ disminuye hasta el valor de la presión fijada por el regulador (p_t), dado que para tiempos mayores, elr regulador no podrá mantener la presión de remanso necesaria. Haciendo uso de la ecuación de continuidad y la ecuación de la energía en su forma diferencial al depósito. Tras operar convenientemente se obtiene una expresión que determina el tiempo de ensayo para alcanzar una cierta presión en el depósito en función de variables conocidas y el estado inicial del gas en el depósito (p_{0d}, T_{0d}, r_{0d}):

$$t(p_{dt}) = \frac{\sqrt{T_{0d}}\rho_{0d}}{K}\frac{2}{(\gamma+1)}\left[1-\left(\frac{p_{dt}}{p_{0d}}\right)^{\frac{(\gamma+1)}{2\gamma}}\right] \; con\; K = \frac{\sqrt{\gamma}\, p_t\, A_g}{\sqrt{R}V_d} f(1). \qquad (4)$$

2.3. Análisis de la tobera sin condición de adaptación. Aparición y localización de ondas de choque en la tobera

Una vez diseñada una tobera para unas condiciones de adaptación, se pueden estudiar condiciones diferentes. Fundamentalmente, bien porque p_t disminuye o porque p_{amb} aumenta, si no se alcanza la presión de bloqueo sónico (esto es $p_{adap} < p_{amb} < p_{BS}$), se tendrá flujo supersónico tras la garganta de la tobera pero incompatibilidad de presión a la salida, apareciendo una discontinuidad en el campo fluido y en las magnitudes fluidas en forma de onda de choque. Esta discontinuidad produce un salto brusco de presión (de intensidad y en la posición adecuadas) para tener compatibilidad de presión a la salida de la tobera con la presión ambiente. En caso de que aparezca una onda de choque en el interior de la tobera, se plantea el problema de determinar su localización. Esta información permitiría adicionalmente, ajustar el sistema óptico de visualización de forma óptima en los ensayos experimentales.

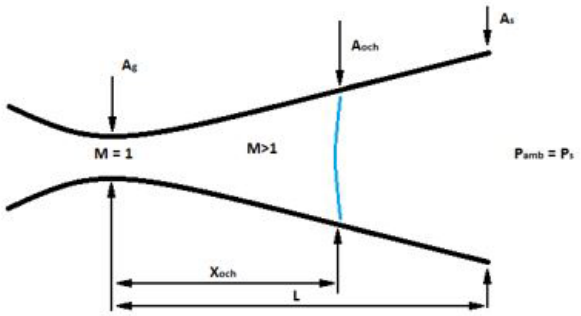


Figura 2. Esquema y formulación de una tobera en la que se forma una onda de choque en la descarga.

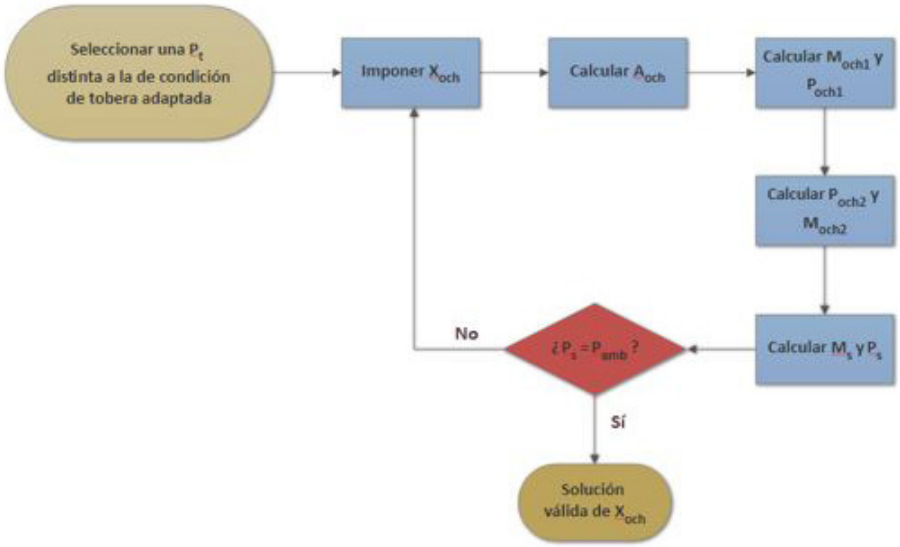


Figura 3. Diagrama de flujo con el procedimiento utilizado para encontrar la posición de la onda de choque en la tobera.

Para la resolución de este problema se hará uso del procedimiento iterativo que se muestra en la figura 3. En este procedimiento se debe fijar una presión de remanso diferente a la de condición de adaptación y que proporcione una onda de choque dentro de la tobera. A partir de ahí, se impone inicialmente una posición aleatoria de la onda de choque (x_{och}), que corresponderá a una sección de área (A_{och}). Con esta área se calcula el Mach (M_{och1}) y la presión (p_{och1}) aguas arriba de la onda de choque haciendo uso de la ecuación (2). Mediante las relaciones de Huygonot se calcula el Mach (M_{och2}) y la presión (p_{och2}) aguas abajo de la onda de choque. Finalmente, empleando la ecuación (2) y la relación (A_{och}/A_s) se calcula el Mach de salida (M_s) y la presión de salida (p_s). Si esta presión coincide con la presión ambiente, la posición de onda de choque es la que se ha fijado. En caso contrario, se ha de continuar con el procedimiento de manera iterativa hasta llegar a una solución válida ($p_{amb}=p_s$).

3. Montaje experimental

3.1. Selección de elementos y dimensionado de la instalación experimental

Para la realización de la instalación experimental, la primera etapa de diseño consistió en la selección y estudio del material disponible y el cálculo de las dimensiones de los nuevos componentes a realizar. Para ello se hizo uso de la metodología descrita anteriormente.

Para el presente trabajo se disponía de un depósito de 120 litros. Por cuestiones de seguridad y limitaciones de material, la presión máxima de presurización, según especificaciones del fabricante, es de 6 bar. Se optó por una presión de salida para la válvula reguladora de presión, en el caso nominal, de p_t=3bar. Con estos parámetros uno de los criterios de diseño del experimento es la existencia de un tiempo de ensayo suficiente (del orden de decenas de segundos) para estabilizar la posición de la onda de choque y poder visualizarla.

De la ecuación (2) se obtiene que la relación de áreas para la presión fijada en el regulador y presión ambiente de referencia (p_{0ISA}) es de As/Ag = 1,088. Considerando una tobera de A_g=12mm^2 (4mm x 3mm) sería necesaria un área de salida de A_s=13,06 mm^2. Por tanto, definiendo un ancho de tobera de 4mm (la tobera se fabricó en metacrilato de cara a realizar visualizaciones en el futuro), se tendrían las dimensiones de la tobera para el caso nominal. Sin embargo, por limitaciones en la precisión de fabricación de los elementos (se precisarían tolerancias del orden de la centésima de milímetro), se optó para los ensayos iniciales por un área de salida de A_s=24mm^2.

Con las dimensiones y presiones anteriores, la ecuación (4), permite calcular el tiempo de ensayo, resultando en t=28,8s, en principio suficiente para los objetivos de la instalación.

3.2. Montaje de la instalación experimental

En la figura 4 se muestran los elementos finalmente empleados en la instalación experimental. La figura 4a presenta un esquema de esta instalación. Inicialmente, un compresor (figura 4b superior) presurizará el depósito (figura 4b inferior) a través de una línea neumática, existiendo una válvula de cierre para cortar el flujo de aire comprimido alcanzados los 6 bar de presión en el depósito.

Posteriormente, el depósito descargará al ambiente a través de la tobera convergente-divergente (fabricada con dos placas de metacrilato de 8 mm y una lámina central de metacrilato de 4 mm que está mecanizada para obtener la geometría de tobera deseada). En la figura 4c se muestra el montaje final de la tobera, incluyendo los sensores de presión empleados. Entre el depósito y la tobera se han instalado una válvula de cierre, que se abre al iniciar el experimento y un regulador de presión. Como se comentó, este elemento fijará la presión de remanso deseada en la tobera. Adicionalmente, el regulador de presión empleado incluye un separador de gotas con el fin de que el aire sea lo más seco posible y que no forme hielo posteriormente en la garganta de la tobera.

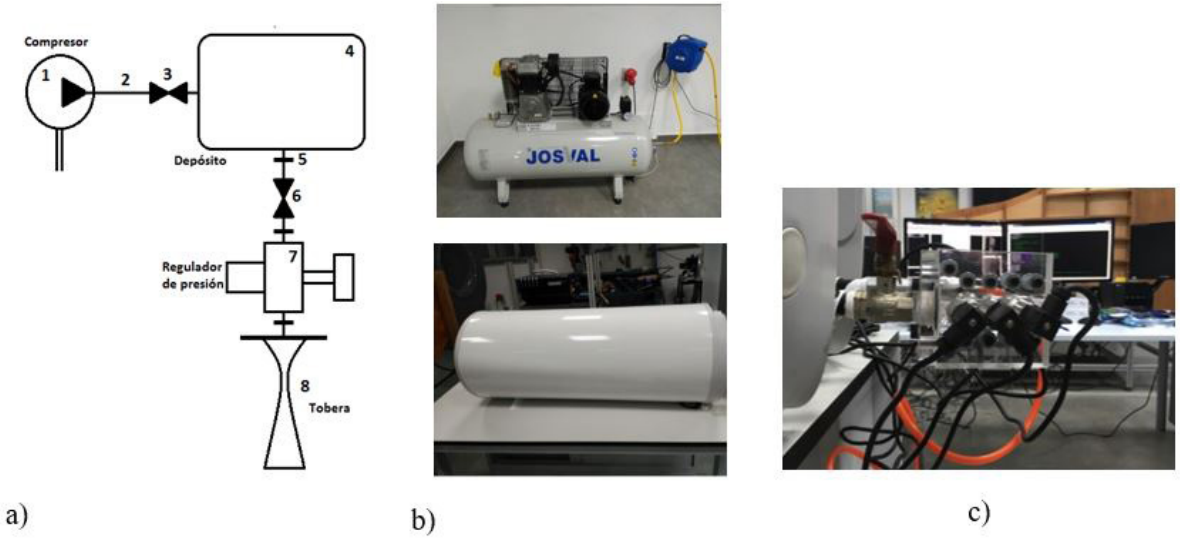


Figura 4. Fotos de la instalación experimental donde se puede ver (de izq. a dcha.) un esquema de la instalación, el compresor y el depósito, y la tobera convergente divergente montada en el depósito.

4. Resultados y discusión

4.1 Medida de la distribución de presión en la tobera: distribución teórica de presión

Una vez que la instalación experimental está en funcionamiento, lo primero que se analizará será la distribución de presión de la tobera, particularmente en su parte divergente. En primer lugar se calculará esta distribución de presión haciendo uso de una formulación teórica sencilla (flujo uniforme, movimiento 1D, fluido ideal) con el fin de comparar los resultados con los obtenidos experimentalmente y determinar el grado de ajuste del flujo real al modelo teórico empleado.

Para el análisis teórico, asumiendo continuidad de gasto y conocida la ley de áreas, la expresión (2) permite calcular el Mach en cada sección de la tobera, asumiendo que la presión y temperatura de remanso son constantes e iguales a las existentes al inicio del experimento. En un segundo paso, haciendo uso de la expresión (3) se determina la presión estática en cada posición.

En la figura 5 se presenta la distribución de presión en la tobera en diferentes condiciones. Para la condición de adaptación, *i.e.*, cuando la presión de remanso es de 3bar (por diseño), en la parte convergente de la tobera (hasta el 25 % de la longitud de la misma), se observa que el flujo en condiciones subsónicas se acelera, lo que conlleva una reducción de la presión. A partir del Mach 1 en la garganta, el flujo se sigue acelerando en condiciones supersónicas en la parte divergente, lo que también conlleva una disminución de la presión. También se muestra en la figura 5 las distribuciones de presión para las condiciones de:

a) Bloqueo sónico ($p_{amb} = p_{BS}$). A la presión de remanso correspondiente a esta solución en la garganta se consigue flujo sónico pero el flujo continúa por la parte divergente en régimen subsónico.

b) Presiones de remanso que generan ondas de choque en el interior de la tobera. Se realiza un estudio de la distribución de la presión en la tobera con dos valores de presión que generan onda de choque en el interior de la misma: 148100 Pa y 143500 Pa.

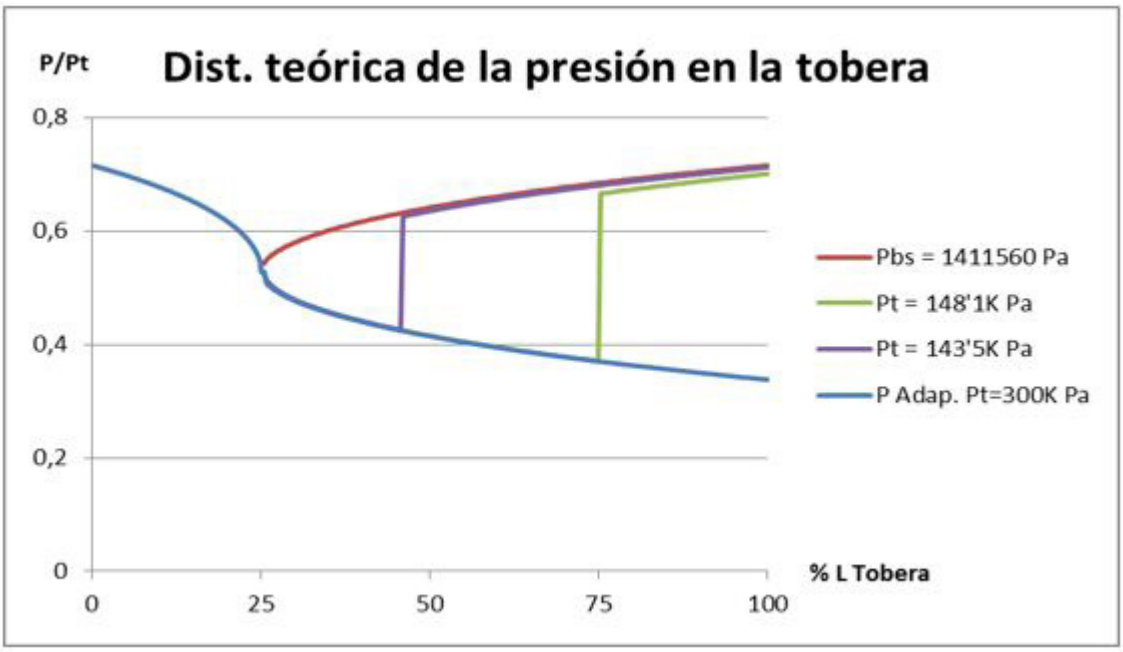


Figura 5. Representación de la distribución de presión teórica para diferentes condiciones de flujo en tobera convergente divergente (As/Ag = 3, pamb = p0ISA).

De la figura 5 se desprende que en todos los casos, el comportamiento de la presión en la parte convergente de la tobera es idéntico; el flujo acelera a Mach 1 con la misma progresión. A partir de la garganta (25 %) podemos ver cómo el flujo supersónico reduce la presión y el subsónico la aumenta. También se puede apreciar que en el caso de aparición de ondas de choque, estas discontinuidades dejan al fluido con velocidad subsónica y, por tanto, el fluido se sigue decelerando (y la presión aumentando) hasta la salida.

4.2. Medida de la distribución de presión en la tobera: distribución experimental de presión

En el estudio experimental realizado de la distribución de presión se realizaron medidas de presión en 5 puntos diferentes de la tobera situados a 12’5, 25, 37’5, 50, y 62’5 mm de la garganta. Se emplearon captadores de presión con fondo de escala 10 bar y salida en intensidad de 4 a 20 mA. La señal de salida del captador fue convertida a voltaje con una resistencia del valor adecuado para poder emplear el sistema de adquisición analógica en voltaje existente (cDAQ) y aprovechar al máximo el fondo de escala del sistema de digitalización (10 V en 16 bits). Para la adquisición y postproceso de datos se hizo uso de un *software* propio desarrollado en el entorno MATLAB. En particular, las señales adquiridas durante el ensayo fueron analizadas para determinar la ventana temporal de flujo estacionario y promediadas en dicha ventana. Adicionalmente se realizó un pequeño ajuste de la presión de remanso en relación a la comandada en el regulador de presión para obtener condiciones sónicas en la garganta de la tobera a partir de los datos medidos en la misma.

Se presentan dos ensayos, uno fijando la presión de remanso a 4 bar y otras fijándola a 2 bares.

Los resultados obtenidos para p_t = 4bar se muestran en la figura 6a, donde las líneas corresponden a distribuciones teóricas y los puntos a valores medidos en la instalación. Se puede ver que la reproducción de las condiciones teóricas es bastante buena en la instalación y tobera ensayadas.

Para el ensayo a p_t = 2 bar, presentado en la figura 6b, la distribución de presión difiere de la calculada. En todos los puntos de medida se esperaría flujo supersónico análogo al encontrado en el caso anterior dado que aparecería una onda de choque situada aproximadamente en x=70mm. Sin embargo, como se

muestra en la 6, el flujo difiere del esperado, encontrando una zona de deceleración de la corriente con velocidades supersónicas que es contradictorio con el carácter divergente del canal. Este tipo de flujo requiere un estudio más detallado que excede el ámbito del presente estudio.

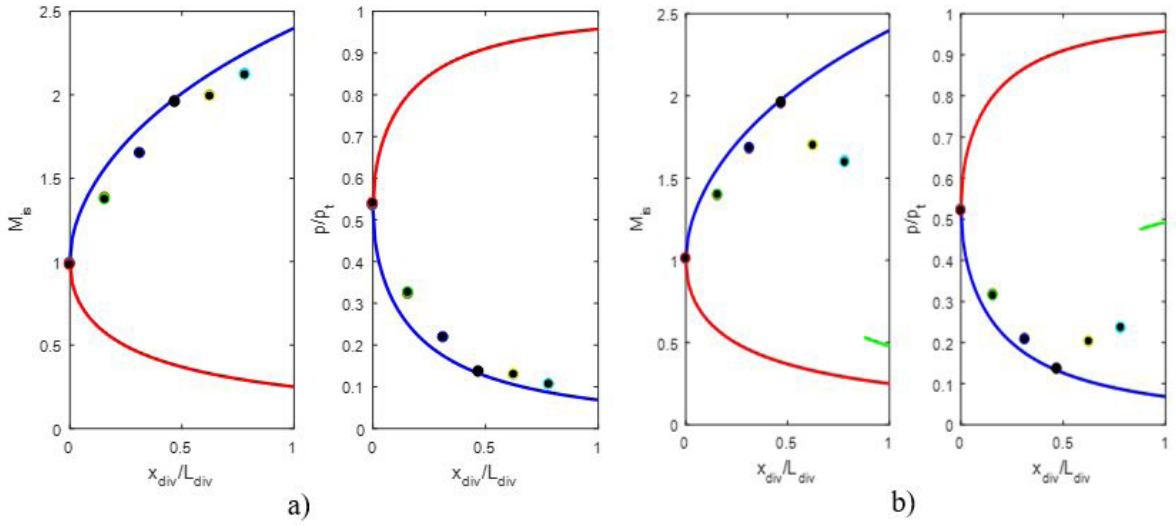


Figura 6. Comparación de distribución de presión experimental (puntos) y teórica (líneas continuas) y números de Mach calculados desde dicha presión. (a) pt = 4bar. (b) pt =2 bar.

5. Conclusiones

En este trabajo se han revisado los fundamentos de las toberas convergentes-divergentes, así como su necesidad para la obtención de un flujo supersónico. A su vez, se ha parametrizado y diseñado una tobera, y se ha realizado una instalación para conseguir dicho flujo. Se ha hecho un estudio de esta tobera tanto en condiciones de adaptación como fuera de ella, haciendo especial hincapié en la formación de ondas de choque dentro de la tobera. Esto resulta fundamental para una futura instalación adenda de visualización de flujo compresible, como pueda ser una instalación Schlieren o cualquiera de las que vienen reflejadas en [4]. Además, se ha podido analizar la distribución de presión tanto de manera teórica como de manera experimental, pudiendo comparar los resultados y mostrando un ajuste razonable para los elementos empleados.

Referencias

1. *Serna Serrano, José. Lección 5: Flujo potencial compresible. Generalidades. Ondas de choque. 2016.*
2. *Bharath, Bhavin K. Design and Fabrication of a Supersonic Wind Tunnel. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 2015.*
3. *Pope, Alan, Goin, Kennith L., «High-speed wind tunnel testing», Wiley, 1965.*
4. *Merzkirch, W. Flow visualization, Academic Press, 2012:62-177.*

Tethered System

García Torres, Rafael

Star Defence Logistics & Engineering, S.L.
Antigua Carretera de Extremadura Km 20.800.
Código Postal: 28935 Móstoles-Madrid. Email: info@sdle.es
Email: rgarcia@sdle.es
* Rafael García Torres; rgarcia@sdle.es

Resumen

Sistema no tripulado cautivo cuyo sistema de energía se alimenta desde tierra, multiplicando en varias horas su capacidad de autonomía de vuelo, además de poder ser desplegado y recogido desde el vehículo.

El objetivo del sistema es obtener una perspectiva de visión superior y más elevada, que evite los obstáculos naturales de la orografía terrestre, y envíe la imagen de la cámara embarcada en la aeronave al vehículo en tiempo real, aumentando la conciencia situacional del vehículo «nodriza» que alberga el sistema.

Palabras clave

Sistema no tripulado cautivo embarcado en vehículo, RPAS cautivo vehicular, RPAS cautivo embarcado en vehículo.

1. Introducción

El artículo explica un sistema no tripulado cautivo, cuya energía le es suministrada desde tierra, con un KIT de adaptación que facilite su integración en varios modelos de vehículos terrestres, para que sea desplegado desde el mismo, y envíe la información captada por los sensores del RPAS a través de una estación de control integrada que permite comandar y recibir la información en tiempo real.

Con este sistema tenemos ventajas de autonomía de vuelo y una perspectiva elevada que nos permite más y mejor distancia de visión.

2. Desarrollo

SISTEMA:

- Aeronave RPAS (drone).
- Sistema de suministro de energía por cable.
- Unidad de comando y control y monitores para visualización de la imagen en el interior del vehículo.
- Gimbal.
- EO/IR.
- Seguimiento de objetivo.
- Estabilización.
- Geolocalización.

Figura 1.

CONCEPTO:

Gracias a la conexión por cable es posible suministrar energía «ilimitada» a la aeronave.

Esto implica poder suspender el RPAS durante varias horas encima del vehículo incrementando la conciencia situacional y mejorando el alcance operativo del vehículo gracias a la nueva perspectiva que brinda el RPAS desde el mismo.

Asimismo, aprovechando la altura de la aeronave, podemos incorporar otros dispositivos que pueden verse beneficiados de esta ventaja. Por ejemplo, en el caso de las comunicaciones podemos alcanzar mayores distancias en línea de vista alzándonos sobre accidentes geográficos gracias a la altura que alcanzamos con el RPAS.

La aeronave siempre permanecerá en la vertical sobre el vehículo, pudiendo incluso avanzar con él cuando se encuentre en movimiento.

Figura 2.

CONTROL DE ADAPTACIÓN:

El sistema incorpora un módulo de control de adaptación totalmente autónomo que implica que el sistema del autopiloto embarcado, así como la sensórica de abordo, regulan de manera automática los parámetros de control durante el vuelo.

El sistema se auto-regula según la fuerza ejercida por el cable, el movimiento del vehículo (terrestre/marino) y las condiciones externas meteorológicas variables.

Las unidades de procesamiento y los algoritmos de control están configurados para conseguir mantener en todo momento la posición del RPAS sobre la vertical del vehículo, siendo capaz de detectar y configurar sus parámetros sobre la plataforma y realizando ajustes internos sobre el controlador y la aeronave en tiempo real.

El objetivo es que el sistema sea totalmente automático y muy fácil de usar, operando el RPAS desde el interior del vehículo mientras este proporciona la información al puesto de mando ubicado en el interior y en tiempo real.

El operador tendrá el control total del RPAS y lo manejará remotamente desde el interior del vehículo en las fases de despliegue, misión y recuperación.

También podría suministrarse la estación de control a modo de «maleta» para ser desplegado en emplazamientos fijos como un puesto de vigilancia estático improvisado.

Figura 3.

GIMBAL:

Aunque la carga de pago del RPAS puede ser personalizable, por defecto el sistema cuenta con un gimbal compuesto por un sensor dual con cámara electro-óptica de alta definición y cámara infrarroja/térmica.

Figura 4.

El gimbal está estabilizado mediante *hardware* para compensar las vibraciones del RPAS y por *software* para una mejor visualización de la imagen de vídeo, así como capacidad de *tracking* y marcado de objetivos.

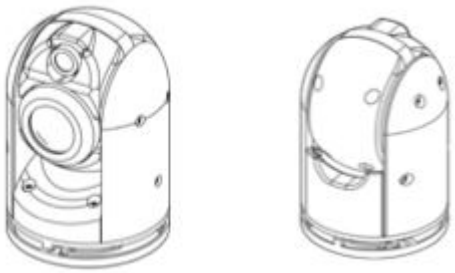


Figura 5.

RESUMEN DE ESPECIFICACIONES:
Tamaño de RPAS: 80x80x25 cm.
Peso RPAS: 5kg.
Alimentación:12V-24V cc.
Sistema de cable:

- Peso: >3kg.
- Longitud: 100 m.
- Bobina, electrónica y batería de backup: 40kg.

Estación de mando y control: monitor y joystick.
Otras opciones disponibles. Capacidad de adaptación y personalización.

Figura 6.

3. Resultados y discusión

Sobre las mejoras tecnológicas del sistema y el empleo en función del tipo de vehículo.

4. Conclusiones

Es un sistema aplicable a los vehículos militares.
Consideramos que es un producto de interés y con capacidad de integración actual.

Misiones y tecnologías de eliminación activa de desechos espaciales

Sanjurjo-Rivo, Manuel[1,*], Sánchez-Arriaga, Gonzalo[1], Fajardo, Pablo[1] y Pulido, Rosa[2]

[1] Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), Dpto. Bioingeniería e Ingeniería Aeroespacial. Avda. de la Universidad, 30, Leganés. 28911.

[2] ISDEFE.

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: manuel.sanjurjo@uc3m.es

Resumen

Desde el lanzamiento del Sputnik 1 en 1957, la población de desechos espaciales en órbita baja alrededor de la Tierra ha aumentado de manera monótona. Existen evidencias sólidas que indican que tal población ha superado el umbral de densidad crítico que da lugar a una cadena de colisiones y su fragmentación (síndrome de Kessler). Por ese motivo, distintas agencias espaciales y organismos internacionales están desarrollando programas dedicados a la reducción de los riesgos asociados a la basura espacial. Entre otros, se está prestando atención a los riesgos relacionados con la colisión entre satélites, la re-entrada incontrolada y la fragmentación de los satélites una vez acabada su vida útil. Las medidas se pueden categorizar en prevención, mitigación y eliminación de residuos. Siguiendo un trabajo, dentro también del marco de la Red Horizontes y dedicado a la prevención, que incluye principalmente la vigilancia y el seguimiento de objetos en órbita, esta ponencia resume el estado del arte de las tecnologías relacionadas con la eliminación activa de desechos espaciales. Estas tecnologías incluyen a los dispositivos de captura de objetos no cooperativos en órbita y a las tecnologías de desorbitado. Tras resumir la necesidad de misiones de eliminación de basura espacial y las iniciativas existentes en la actualidad, la ponencia presenta un análisis crítico de los tipos de misiones propuestas, junto con un estudio de las ventajas y desventajas de cada una de ellas. A continuación, se discuten y comparan las tecnologías de desorbitado (activas y pasivas) y se revisan las tecnologías más comunes propuestas para la captura. En base a ellas, se presentan las conclusiones de la ponencia que incluyen recomendaciones sobre las tecnologías más prometedoras y el papel que España puede jugar en el desarrollo de las mismas.

1. Introducción

La actividad humana en el espacio en los últimos 60 años ha posibilitado la provisión de nuevos y mejorados servicios en tierra, como las telecomunicaciones o los sistemas globales de posicionamiento; así como el incremento en el conocimiento del sistema solar y el universo. Actualmente hay un elevado número de actividades humanas que son dependientes del correcto funcionamiento de los activos espaciales. No obstante, la actividad espacial ha tenido también consecuencias negativas. Entre ellas, el crecimiento de la población de objetos residentes en el espacio que no se encuentran operativos: los desechos espaciales. La población de estos desechos no ha dejado de crecer desde el lanzamiento del Sputnik 1 y la operación segura en ciertas órbitas está amenazada por su presencia (ver resumen en [1]). La posibilidad de que la población de desechos espaciales creciera de manera exponencial fue predicha en los años 70 por Kessler y Cour-Palais [2]. Apuntó al fenómeno de las colisiones en órbita como un proceso relevante en la generación de nuevos fragmentos, y acuñó el término de cascada de colisiones para referirse a la situación en la que el número de fragmentos en órbita crece de manera sostenida debida a las colisiones entre ellos, sin necesidad de aporte de nuevos objetos. Este escenario, se conoce actualmente como síndrome de Kessler [3]. Sin embargo, no es hasta los años 90 cuando el interés de las agencias espaciales por este problema se traduce en la creación del Comité de coordinación inter-agencias para los desechos espaciales (IADC). A partir de ese momento, existen departamentos en las agencias espaciales dedicados al estudio de este problema, y a cargo de programas e iniciativas para la reducción, mitigación y seguimiento de la basura espacial. ESA dispone de un grupo de trabajo dedicado al *space debris* desde 1988, que ha ido creciendo en tamaño y recursos desde entonces; también ha desarrollado el programa *Clean Space* para afrontar el problema de la utilización sostenible del espacio de manera más holística. Las actividades se dividen en monitorización, mitigación y eliminación. La monitorización consiste en realizar el seguimiento y en el desarrollo de modelos de población. La actividad de seguimiento (SST) está dirigida principalmente a alertar sobre posibles colisiones de objetos en órbita y fue tratada en una comunicación previa del DESEID [4]. La mitigación se centra en evitar que la población de residuos aumente, no generando nuevos fragmentos o desechos en el futuro. La IADC ha elaborado una serie de recomendaciones [5].

Este trabajo está dedicado a las actividades de eliminación. La necesidad de llevar a cabo misiones de eliminación activa de desechos espaciales para evitar su crecimiento ha sido analizada en detalle en el artículo de Liou *et al*. [6]. Estudios previos habían apuntado que la población de desechos seguiría creciendo según el proceso descrito por Kessler y Cour-Palais [2] incluso aunque no se produjeran más lanzamientos. Liou analizó la evolución a largo plazo, 200 años, de distintos escenarios: 1) inacción y lanzamiento sostenido de nuevos objetos al espacio; 2) eliminación activa de dos objetos al año; 3) eliminación activa de cinco objetos al año. Se llevaron a cabo simulaciones de la evolución de la población de desechos asumiendo que las actividades de mitigación fuesen altamente exitosas: no existirían nuevas explosiones en órbita y que la vida media de los objetos en órbita baja era de 25 años o menos en un 90 % de los casos. A pesar de ello, en el escenario 1, la población de desechos en órbita baja (LEO) aumentaría en alrededor de un 75 % en 200 años. Por el contrario, la eliminación activa de cinco objetos

al año conseguiría mantener casi constante la población de basura espacial en ese periodo. Estos y otros trabajos pusieron de manifiesto la necesidad de realizar misiones ADR (*Active Debris Removal*), es decir, misiones dedicadas a capturar basura espacial y traerla de vuelta a la Tierra para eliminarla durante la re-entrada (desorbitar). En la última década, se han llevado a cabo distintos estudios de viabilidad de esta clase de misiones, los cuales prestaron especial atención a las nuevas tecnologías que hay que desarrollar y madurar. Uno de los más detallados ha sido el realizado por ESA sobre ENVISAT, que quedó inoperativo en 2012 [7]. Además de las exigencias técnicas, existen otras consideraciones de carácter legislativo sobre la propiedad de los desechos y las responsabilidades sobre los mismos que no se tratarán en este trabajo (véase [8]). Si bien el diseño de una misión ADR exige un estudio en detalle de todos los subsistemas que componen el vehículo espacial dedicado [9], las tecnologías específicas de la misma o más requeridas son las de desorbitado, las de guiado, navegación y control (GNC) en operaciones de proximidad, y las tecnologías de captura. En esta ponencia se tratan, en la sección 2, las tecnologías de GNC y, en la 3, las de captura. En la sección 4, se hace un análisis crítico de las tecnologías de desorbitado. Finalmente, en la sección 5, se incluyen las conclusiones del trabajo.

2. Tecnologías de GNC para misiones de ADR

Independientemente del concepto de misión ADR, el vehículo espacial encargado de ello ha de realizar operaciones en las proximidades del objeto a eliminar. Dado que este será habitualmente no-cooperativo, y no estará controlado, será necesario establecer con precisión el estado dinámico antes de realizar un acercamiento, es decir, el subsistema de GNC se encuentra altamente requerido. Existen trabajos [10] que revisan los retos que es necesario resolver en el GNC para realizar encuentros y/o atraques, con objetos no cooperativos, no controlados, y utilizando elementos de captura no totalmente rígidos [11]. Los desarrollos tecnológicos se han llevado a cabo tanto en los sensores, como en el procesado de imágenes, así como en métodos de guiado y control avanzados. Las soluciones presentadas han de tener en cuenta las distintas fases de la misión (*phasing*, *approach, fly-around,* captura, de-orbitation), presentando habitualmente distintas soluciones de GNC para cada una de ellas. La navegación se realiza con sensores activos (cámaras, LIDAR) o pasivos (cámaras 2D o 3D en visible o infrarrojo, IMUs). Los sensores han de proporcionar la información necesaria para estimar la posición, actitud y movimiento relativo entre el objeto y el vehículo. El procesado de imágenes proporcionado por los sensores ha de producirse con la frecuencia necesaria para una operación segura en proximidad (a veces cercana al tiempo real). Ejemplos de soluciones propuestas incluyen la misión e.Deorbit de la ESA [12]. Otro aspecto crítico del GNC en este tipo de misiones son los algoritmos de guiado y control, dado que es necesario realizar una estimación de alta precisión del estado dinámico tanto del vehículo como del objeto a desorbitar, así como la generación robusta de comandos (considerando incertidumbre). Algunos de los últimos trabajos en este campo están dedicados al modelado de alta fidelidad del sistema durante todas las fases de la misión centrados en aspectos como la flexibilidad del sistema conjunto vehículo-objeto a desorbitar, y su estabilidad dinámica [11]. También son relevantes los trabajos encaminados a utilizar control adaptativo y robusto en las misiones ADR [13]. En varios de los estudios propuestos por ESA y la Comisión Europea, la industria y la academia española han estado presentes. Un listado no exhaustivo de proyectos liderados o participados por la industria española en este campo son: eDeorbit [12], ROGER [14], HYPSOS [15], LEOSWEEP [16].

3. Captura de objetos no cooperativos en órbita

Los métodos de captura de objetos no cooperativos en espacio han sido estudiados de manera extensa en los últimos años en relación a las misiones ADR [17], aunque no todos los métodos de desorbitado exigen que el desecho espacial sea capturado. Normalmente las tecnologías de captura se han clasificado, de acuerdo a la rigidez del mecanismo utilizado, como rígidas o flexibles [17]. En la primera categoría se encuentran las variantes al brazo robótico, el cual se ha sugerido para tratar de cumplir con los requisitos más exigentes de una misión (captura de un objeto no cooperativo y no controlado). El brazo puede ser único, como el de la misión DEOS [18], múltiple, como el de ATLAS [19] o, con tentáculos, una de las

opciones consideradas en el projecto eDeorbit [20], entre otros. Este último, puede disponer de brazo robótico o no, dependiendo del sistema de captura. Entre las mayores ventajas de la captura con brazo se encuentran la madurez y robustez de la tecnología, con experiencia de vuelo en varias misiones. Sin embargo, normalmente su masa es mayor que las de las tecnologías flexibles y hay que hacer un mayor esfuerzo en términos de precisión y control durante la maniobra de aproximación y captura.

Los métodos de captura flexible se pueden clasificar en función del elemento utilizado para ella en los siguientes tipos: captura con red, amarra o arpón. La captura usando una red ha sido descrita en detalle en el estudio de la ESA ROGER [14]. La red dispondría de cuatro masas en los extremos que serían disparadas por un sistema pretensado, de manera que la red se extendiese alrededor del objetivo y se cerrase sobre él. Es un sistema que está siendo estudiado de manera intensiva en la ESA como solución para el problema de la captura de desechos espaciales de distinto tamaño. No obstante, se trata de una tecnología (común en el caso de las flexibles) de difícil control, y testeo en tierra. Por su parte, en el concepto de la amarra, se dispone un elemento en su extremo encargado de asir el objeto a desorbitar. En el extremo de la amarra, se encuentra un dispositivo con tres enganches que capturaría el objeto a desorbitar, lo cual requiere que el objetivo cuente con un punto de enganche. Este concepto ha sido estudiado en detalle en el sistema TSR [21]. Además, la amarra aprovecha los estudios y las misiones realizadas que han utilizado esta tecnología. Finalmente, el arpón (unido con una amarra o cable) se lanzaría desde el vehículo y penetraría en el objeto a desorbitar. En este caso, no es necsario disponer de un lugar en el objeto para asirlo y es compatible con distintos tamaños de desecho. Entre las mayores desventajas de la captura flexible se incluyen su difícil modelado y control (sobre todo en el momento post-captura). En el caso del arpón existe riesgo de generación de nuevos fragmentos o ruptura del objeto a desorbitar. Además, a diferencia del brazo robot en donde toda la captura se hace lentamente y de manera controlada, las tecnologías flexibles tienen normalmente un solo disparo que no debe fallar. Entre sus ventajas destacan su baja masa y requisitos menos exigentes en la maniobra de aproximación.

4. Tecnologías de desorbitado

Estas tecnologías se encargan de disminuir la altura hasta provocar la reentrada del objeto. Tanto en un escenario de ADR, que involucra captura y desorbitado, como en uno de autoeliminación, es decir llevando abordo un kit de desorbitado y activándolo una vez finaliza la misión, la tecnología de desorbitado es imprescindible. Por ello, y según la población de basura espacial aumente y la legislación se endurezca, se espera que se abra un mercado para ellas. Esas perspectivas están estimulando el interés no solo por desarrollar y madurar las tecnologías de desorbitado, sino también por tratar de anticipar cuál de ellas dominará el futuro mercado. Esta última pregunta no es fácil de contestar, pues los requisitos son muy variados y en algunos casos difícilmente cuantificables con la información actual. Entre los que se han mencionado en la literatura se incluyen [1;22]: (i) colocar el tiempo de desorbitado por debajo de 25 años para las órbitas de interés (típicamente altura mayor de 800 km y alta inclinación), (ii) masa pequeña relativa al satélite que se desorbita, (iii) tecnología escalable hasta ser capaz de desorbitar toneladas, (iv) si el desorbitado es largo, maniobrabilidad para evitar colisiones con otros objetos, (v) simple y fiable, y (vi) disminuir el producto del área frontal por el tiempo de desorbitado (). A esta lista hay que añadir otras consideraciones como el coste y el alineamiento de la tecnología con otros intereses industriales. Permitir la reentrada controlada puede ser un requisito adicional, pero seguramente no sea crítico en el futuro si se implementa la filosofía *Design-for-Demise* dirigida a provocar la desintegración del satélite durante la reentrada.

Las tecnologías de desorbitado se dividen en dos familias. Las activas funcionan bajo el principio de acción-reacción e incluyen la propulsión química y la eléctrica, de madurez alta. La química es la única que permite reentrada controlada. En [23], se presenta una evaluación de las actuaciones de estas tecnologías en escenarios de desorbitado. Sin embargo, la propulsión química tiene problemas con el requisito (ii). Un estudio de ESA concluyó que para desorbitar satélites de 200 kg, 1.000 kg y 2.000 kg, la masa del kit de desorbitado basado en propulsión química representaría alrededor de un 7 %, 16,5 % y 22 % [24]. El uso de propelente sólido ofrece claras ventajas, ya que se puede obtener un alto empuje con un

sistema relativamente simple y fiable [25]. Sin embargo, pueden presentar problemas en términos de emisión de partículas y toxicidad del combustible. Es por ello que también se buscan soluciones con propulsión híbrida [26]. La propulsión eléctrica puede ser ciertamente una buena alternativa, especialmente si ya se encuentra abordo por otro requisito de misión. Sin embargo, hay que tener presente que necesita potencia eléctrica, combustible, y un buen apuntamiento durante el largo desorbitado, lo cual dificulta los requisitos (ii) y (v).

Las pasivas operan bajo un mecanismo físico totalmente diferente y también incluyen dos subgrupos. Las velas o sistemas de aumento de resistencia utilizan la resistencia aerodinámica resultado del movimiento relativo entre un sólido (la vela) y un fluido (el aire). Las amarras espaciales electrodinámicas desorbitan gracias a la resistencia de Lorenz que ocurre entre conductores en movimiento relativo (la amarra y el plasma ionosférico) en presencia de un campo magnético (el geomagnético). Estas tecnologías no necesitan propelente, lo cual resulta obviamente en una ventaja importante en términos de masa y simplicidad. En Europa las velas han alcanzado un TRL de entre 5 y 6 gracias al proyecto ADEO de la ESA [27]. Sin embargo, precisamente por el mecanismo físico con el que operan, las velas prácticamente no cumplen ninguno de los requisitos: (a) la densidad del aire es muy pequeña a las alturas críticas (mayores de 800 km) por lo que cumplir años conduce a velas gigantescas para las masas de interés, (b) no es escalable por motivos estructurales y de despliegue, (c) en principio no permite maniobrabilidad, y, lo más importante, (d) no reduce el producto , el cual mide la probabilidad de colisión. Por otro lado, no es difícil demostrar que, en términos de masa y para las órbitas críticas, las amarras son entre uno y dos órdenes de magnitud más eficientes que las velas, más de un orden de magnitud mejor que la propulsión química, y algo menos de un orden de magnitud mejor que la propulsión eléctrica (ver fig. 1 en [22]). Por ello, discutimos a continuación con algo más de detalle el estado del arte de las amarras espaciales haciendo énfasis en el marco europeo y español.

4.1. Amarras espaciales electrodinámicas

Una amarra espacial electrodinámica es un conductor largo unido a un objeto en órbita. Si existe un buen contacto eléctrico con el plasma ambiente, el movimiento relativo de la amarra con respecto al plasma ambiente y la presencia del campo geomagnético resultan en una corriente eléctrica a lo largo de la amarra. La fuerza de Lorenz del campo geomagnético sobre la corriente en la amarra produce el desorbitado del objeto sin necesidad de usar propelente o potencia eléctrica. Tras más de tres décadas de investigación, y un buen número de misiones espaciales, las amarras espaciales electrodinámicas han logrado importantes avances. Dos de ellos son la sustitución de la amarra conductora con aislante por la desnuda [28] y el cambio de sección transversal circular a una geometría tipo cinta [29]. Como resultado, estos dispositivos son ahora muy robustos ante el impacto de micrometeoritos y más eficientes en misiones de desorbitado. Actualmente existen dos tipos de amarras electrodinámicas. El primero consiste en una cinta conductora equipada en un extremo con un emisor de electrones activo [28]. Las dimensiones típicas de la cinta, normalmente fabricada de aluminio, son del orden del cm de ancho, decenas de micras de espesor y varios km de longitud. La cinta captura electrones del plasma ambiente de manera pasiva y el emisor cierra el circuito eléctrico. La selección del emisor depende de la corriente esperada en la amarra y puede incluir desde un emisor de efecto campo a un cátodo hueco. Los emisores activos necesitan potencia, la cual puede ser suministrada por la propia amarra penalizando ligeramente las actuaciones de desorbitado. En el caso del cátodo, es necesario llevar gas abordo, el cual limita el tiempo de operación del dispositivo. La amarra con emisor activo alcanzó TRL 4 en Europa gracias al proyecto BETs [30].

En BETs se propuso un segundo tipo de amarra electrodinámica. En lugar de un emisor activo, la amarra se recubre con un material de baja función de trabajo que emite electrones de manera pasiva por efecto termiónico [31]. Más tarde, se señaló que el efecto fotoeléctrico también ayuda a cerrar el circuito, por lo que se acuñó el término *amarra con baja función de trabajo* (LWT), que incluye ambos mecanismos [32]. En un LWT, un segmento captura electrones y el complementario los emite. Representa un viejo

sueño de la industria aeroespacial ya que permite generar empuje en órbita de manera pasiva, sin usar consumible alguno y sin necesidad de potencia abordo. Es más, como toda amarra electrodinámica, un LWT tiene dos modos de operación. En modo pasivo desorbita el satélite y genera potencia que puede ser usada abordo [33]. Si el satélite tiene potencia disponible y el LWT se despliega de manera adecuada [34], un LWT puede consumir potencia y generar empuje para aumentar la altura de la órbita. Esta cualidad y la ausencia de consumibles abre un abanico muy amplio de aplicaciones comerciales nuevas. Uno que se ha estudiado ya es el desorbitado de adaptadores de carga útil desde órbita de transferencia geoestacionaria [35].

Sin embargo, llevar los LWT a la práctica requiere superar un problema de materiales importante: el desarrollo de un recubrimiento compatible con el entorno espacial, con función de trabajo menor que 1,5eV, y propiedades ópticas (absortividad y emisividad) comprendidas en cierto rango para mantener la amarra caliente de forma pasiva [32]. La Agencia Estatal de Investigación ha financiado recientemente un proyecto dedicado a atacar por primera vez este problema. En marzo de 2019, comenzará E.T.PACK, un proyecto FET-OPEN financiado con 3 M€ por la Comisión Europea. El consorcio responsable tiene un marcado componente español ya que incluye a la UC3M (coordinador), y a las empresas SENER y ATD. También se ha puesto en marcha una red internacional de expertos en amarras y materiales con baja función de trabajo para estimular el desarrollo de la tecnología, y con presencia de miembros de ESA, NASA y JAXA. En 2019, Madrid acogerá la próxima Int. Conference on Tethers in Space. Su larga tradición en amarras espaciales y el liderazgo que ha tomado en estas acciones indican que España ocupa un lugar privilegiado para desarrollar un kit de desorbitado basado en amarras espaciales (con emisor activo o de tipo LWT).

5. Conclusiones

El estado actual de la población de basura espacial, que ya obliga a dedicar importantes recursos a labores de vigilancia y ejecución de maniobras de evasión de colisión, junto con las predicciones suministrados por los modelos, indican que el interés por las tecnologías y servicios asociados a la basura espacial experimentaran un crecimiento importante en las próximas décadas. Aun siendo vitales las acciones en prevención y mitigación, la única solución a largo plazo que hace sostenible el entorno espacial es la eliminación. Estas incluyen en el medio y corto plazo misiones de ADR con el fin de eliminar objetos que ya están en órbitas y estabilizar a la población. En esa fase son necesarias las tres tecnologías descritas en esta ponencia: GNC, captura, y desorbitado. Seguramente, una vez la población esté estabilizada y salga del síndrome de Kessler, solamente la tecnología de desorbitado será necesaria ya que cada satélite podrá llevar abordo un dispositivo dedicado a ese fin. Tal solución parece más económica que implementar misiones de ADR. Debido a la variedad de requisitos que deben cumplir las tecnologías de desorbitado, la discusión sobre cuál de ellas es la más adecuada sigue abierta. Es posible que ninguna de ella domine claramente en el futuro y la elección dependa de consideraciones particulares de la misión como las características de la órbita (altitud e inclinación), masa del objeto a desorbitar, disponibilidad de potencia abordo y/o de un sistema de propulsión (eléctrica o química), y de la necesidad de realizar reentrada controlada. Las amarras espaciales electrodinámicas parecen destacar por su potencial disruptivo, aunque aún necesitan recorrer un camino en términos de desarrollo tecnológico y maduración. Dicho camino es más largo en el caso de la amarra con baja función de trabajo, que sin embargo presenta una serie de ventajas únicas como la ausencia de consumibles. España ocupa una posición privilegiada para desarrollar y transferir al mercado tecnologías basadas en LWT.

Agradecimientos

Agradecemos a la Red Horizontes ISDEFE. El trabajo de GSA está parcialmente financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España (RYC-2014-1535) y la Agencia Estatal de Investigación (AEI) de España (ESP2017-82092-ERC).

Referencias

1. *Sanmartín, R., Sánchez-Arriaga, Seguridad Espacial: una solución práctica para el problema de los residuos espaciales en órbita, III Seminario sobre Actividades Espaciales y Derecho, Inst. Iberoamericano de Derecho Aeronáutico y del Espacio y de la Av Com, 2013, pp 71-82.*
2. *Kessler DJ, Cour-Palais BG. Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1978 Jun 1;83(A6):2637-46.*
3. *Kessler DJ, Johnson NL, Liou JC, Matney M. The kessler syndrome: implications to future space operations. Advances in the Astronautical Sciences. 2010 Feb 6;137(8):2010.*
4. *Sanjurjo-Rivo M, Fajardo P, Sánchez Mayorga J. Horizonte ISDEFE: Espacio. Análisis del marco institucional y de las principales lıneas de desarrollo e investigacion actuales en el area Vigilancia y Seguimiento espaciales (SST). DESEID 2016.*
5. *Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. IADC space debris mitigation guidelines. IADC-02-01 Revision. 2007 Sep;1.*
6. *Liou JC, Johnson NL, Hill NM. Controlling the growth of future LEO debris populations with active debris removal. Acta Astronautica. 2010 Mar 1;66(5-6):648-53.*
7. *Bombardelli C, el al. A plan to Deorbit Envisat. In Proceedings of the 2nd European Workshop on Active Debris Removal, Paris 2012 Jun 18.*
8. *Ansdell M. Active Space Debris Removal: Needs, Implications, And Recommendations For Today's Geopolitical Environment. Journal of Public & International Affairs. 2010 Mar 1;21.*
9. *Wormnes K, et al. ESA technologies for space debris remediation. In 6th European Conference on Space Debris 2013 Apr 22 (Vol. 1, pp. 1-8). ESTEC, Noordwijk, The Netherlands: ESA Communications.*
10. *Kervendal E, Chabot T, Kanani K. GNC challenges and navigation solutions for active debris removal mission. In Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control 2013 (pp. 761-779). Springer, Berlin, Heidelberg.*
11. *Benvenuto R, Salvi S, Lavagna M. Dynamics analysis and GNC design of flexible systems for space debris active removal. Acta Astronautica. 2015 May 1;110:247-65.*
12. *Telaar J, Ahrns I, Estable S, Rackl W, Stefano MD, Lampariello R, Santos N, Serra P, Canetri M, Ankersen F, Gil-Fernandez J. Gnc architecture for the e. deorbit mission. InProc. 7th Eur. Conf. Aeronaut. Space Sci. 2017 Jul.*
13. *Huang P, Zhang F, Meng Z, Liu Z. Adaptive control for space debris removal with uncertain kinematics, dynamics and states. Acta Astronautica. 2016 Nov 1;128:416-30.*
14. *Bischof B. ROGER-Robotic geostationary orbit restorer. In 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law 2003 (pp. IAA-5).*
15. *Tonetti S, et al. Active Debris Removal and Space Debris Mitigation using Hybrid Propulsion Solutions. In Stardust Final Conference 2018 (pp. 163-180). Springer, Cham.*
16. *Ruiz M, et al. The fp7 leosweep project: Improving low earth orbit security with enhanced electric propulsion. In Space Propulsion Conference 2014 May 19 (No. 2980908).*
17. *Shan M, Guo J, Gill E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods. Progress in Aerospace Sciences. 2016 Jan 1;80:18-32.*
18. *Reintsema D et al. DEOS–the German robotics approach to secure and de-orbit malfunctioned satellites from low earth orbits. In Procs i-SAIRAS 2010 Aug Sapporo, Japan.*
19. *Ellery A. A robotics perspective on human spaceflight. Earth Moon Planets. 1999 Nov 1;87(3):173.*
20. *Biesbroeck R. The e. Deorbit study in the concurrent design facility. In the CleanSpace: Workshop, Darmstadt 2012 Sep.*

21. *Huang P, Cai J, Meng Z, Hu Z, Wang D. Novel method of monocular real-time feature point tracking for tethered space robots. J Aerospace Eng. 2013 Jul 2;27(6):04014039.*
22. *Sanchez-Arriaga, G., Sanmartín, J., Lorenzini, E.C., Comparison of Technologies for Deorbiting Spacecraft From Low-Earth-Orbit at End of Mission, Acta Astronautica, 2017, 138, pp. 536-542. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.12.004*
23. *Ionel, A. Performance Evaluation of Propulsion Systems as LEO Deorbiting Devices, International Journal of Engineering, 2017, 3, pp 39-48.*
24. *T. Soares et al, SPADES CDF Study Report, SPADES, assessment of solid propellant autonomous, deorbit System, 2013, CDF Study Report: CDF-137(A).*
25. *Schonenborg, R. A., Solid Propulsion de-orbiting and re-orbiting. Proceedings in the 5th European Conference on Space Debris, 2009.*
26. *Tonetti, S., et al, Active Debris Removal and Space Debris Mitigation Using Hybrid Propulsion Solutions, Confererence Proceeding in the 7th European Conference on Space Debris, 2017, ESA/ESOC, Germany.*
27. *Sinn, T. et al, Results of the Deployable membrane & ADEO Passive De-orbit subsystem activities leading to a drag sail demonstrator, Confererence Proceeding in the 7th European Conference on Space Debris, 2017, ESA/ESOC, Germany.*
28. *Sanmartín, J., Martinez-Sánchez, M., Ahedo, E. «Bare Wire Anodes for Electrodynamic Tethers», Journal of Propulsion and Power,» Vol 9, No 3, May-June, 1993, 353-360.*
29. *Sanmartín, J., and Estes, R. B, «The Orbital-Motion-Limited Regime of Cylindrical Langmuir Probes», Physics of Plasmas, 6, 1, 1999, 395-405.*
30. *Sanmartín, J. et al, BETs: Propellant less de orbiting of space debris by bare electrodynamic tethers. 2012, «Let's embrace space». Publications Office of the European Union, Luxembourg, pp. 506-513. ISBN 978-92-79-22207-8.*
31. *Williams, J. D., Sanmartín, J. R., Rand, L. P., «Low work-function coating for an entirely propellantless bare electrodynamic tether», IEEE T Plasma Sci, 40, 5, 1441-1445, 2012.*
32. *Sanchez-Arriaga, G., Chen, X. Modeling and Performance of Electrodynamic Low-Work-Function Tethers with Photoemission Effects, J Propul Power, 2018, Vol 34 (1), pp. 213-220.*
33. *Bombardelli, C., Sánchez-Arriaga, G. Sistema de generación de potencia eléctrica en órbita por medio de cables conductores flotantes, 2017, Patente ES2562713B2.*
34. *Sánchez-Arriaga, G., Bombardelli, C., Sistema de propulsión en órbita por medio de cables conductores flotantes, 2017, Patente ES2569540B2.*
35. *Sanchez-Arriaga, G., et al., "Optimal design and deorbiting performance of thermionic bare tethers in Geostationary Transfer Orbits», J Propul Power, 2017, Vol 33 (2), pp. 425-432.*

Aplicación de toma de decisiones multicriterio para evaluar técnicas de deflexión de asteroides en estudios de defensa planetaria

Sánchez-Lozano, Juan Miguel[1,*], Fernández-Martínez, Manuel[2]

Departamento de Ciencias e Informática, Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier, MDE-UPCT, C/ Coronel López Peña, s/n, 30720, Santiago de la Ribera, Murcia, SPAIN.

[1] Correo electrónico: juanmi.sanchez@cud.upct.es (JSM).

[2] Correo electrónico: manuel.fernandez-martinez@cud.upct.es (MFM).

* Autor principal y responsable del trabajo: JSM.

Resumen

Según el Laboratorio Lunar y Ciencias Planetarias de la Universidad de Arizona, nuestro planeta ha sufrido más de 3 millones de impactos de asteroides generándose cráteres con diámetros superiores a 1 km. De hecho, según datos recopilados por el Gobierno de los EE. UU. durante el periodo 1994-2003, la atmósfera de la Tierra recibió el impacto de pequeños asteroides en 556 ocasiones. Estos datos constituyen una de las principales razones por las que se han incrementado las inversiones en actividades de detección, mitigación y caracterización de asteroides en los últimos años. La importancia de determinar futuros impactos de este tipo de objetos es de tal magnitud que, desde hace más de dos décadas se están realizando estudios con el objetivo de, no solo calcular las probabilidades y riesgo de impacto, sino también de llevar a cabo un seguimiento constante de los asteroides potencialmente más peligrosos. El objetivo de este estudio consiste en determinar los criterios que habría que tener en cuenta a la hora de evaluar las diferentes técnicas de desviación de asteroides que se están analizando en la actualidad. Para ello se ha recurrido a la elaboración de un cuestionario que será rellenado por expertos en el ámbito de la astronomía y la astrofísica.

Palabras clave

Defensa planetaria, decisión multicriterio, técnicas de deflexión de asteroides, *near Earth object*, asteroide.

1. Introducción

Hace 65 millones de años, en el límite del Cretácico-Terciario, tuvo lugar la última extinción masiva provocando la desaparición de la totalidad de especies de dinosaurios [1]. Entre las teorías más populares de extinción [2], desde el descubrimiento de Álvarez *et al*., en 1980 [3] y Álvarez en 1997 [4], una teoría ampliamente aceptada destaca por encima del resto: el impacto de un gran asteroide en Chicxulub, en la península de Yucatán (México) [5,6]. Dicho impacto generó un cráter de aproximadamente 200 km de diámetro [7]. Según Fulchignoni & Barucci [8], el impacto condujo al planeta a bruscos cambios climáticos [9] que afectaron al medioambiente de forma tan severa que el 50 % de las familias de organismos marinos [10], el 20 % de los géneros [11] y todas las especies de dinosaurios desaparecieron. La pregunta que habría que formular es la siguiente ¿por qué habría que preocuparse por un impacto que se produjo en la era del Paleoceno? La respuesta a dicha pregunta es clara: porque va a volver a ocurrir.

Según el registro de cráteres terrestre y la cronología geológica lunar (la cara agujerada de la Luna es un testimonio mudo), este ambiente de impactos ha existido durante los últimos 3,5 Ga [12]. A pesar de las rápidas erosiones y cambios en la tectónica de placas de la Tierra, se han descubierto y confirmado evidencias de aproximadamente 185 cráteres debidos a impactos o colisiones sobre nuestro planeta. Con las excepciones del cráter Vredeford de diámetro 160 km, formado en Sudáfrica hace aproximadamente 2 Ga, y el cráter Sudbury (130 km), descubierto en Canadá con más de 1,8 Ga, todos los demás grandes cráteres terrestres presentan edades inferiores a 1 Ga [13]. Por tanto, no es de extrañar que los impactos de asteroides se hayan postulado como los desencadenantes principales de la interrupción en el equilibrio de la evolución de las especies [14-16].

Aunque impactos gigantes como el de Chicxulub son muy escasos, cuando se excede el umbral de los efectos destructivos a nivel mundial, como ocurre con asteroides superiores a 3 km de diámetro, la tasa de mortalidad es impredecible [17,18]. De igual modo, los impactos grandes (asteroides con diámetros próximos a 150 m) también son poco frecuentes. No obstante, tales impactos pueden ocasionar grandes catástrofes naturales. A modo de ejemplo, la energía liberada en el terremoto de la costa del Pacífico en la región de Tohoku (Japón) de 2011 se estimó en 45 megatones; este desastre natural provocó pérdidas económicas cuantificadas en 200 billones de dólares según el Banco Mundial. Pues bien, pequeños objetos o asteroides de 150 metros de diámetro podrían liberar cantidades de de orden similar o superior a la del terremoto de Tohoku [19]. Incluso pequeños objetos de diámetros inferiores a 20 metros son preocupantes ya que pueden provocar efectos considerables a causa de su explosión en la atmósfera como por ejemplo, el evento ocurrido en la ciudad de Chelyabinsk en febrero de 2013 [20], el cual causó lesiones (quemaduras, problemas de visión, etc.) a más de 1.500 personas y daños materiales valorados en millones de euros [13].

Según el Laboratorio Lunar y Ciencias Planetarias de la Universidad de Arizona, nuestro planeta ha sufrido más de 3 millones de impactos, generándose cráteres mayores de 1 km de diámetro [19]. De hecho, según datos recopilados por sensores del Gobierno de los EE. UU. durante el periodo 1994-2003, la atmósfera de la Tierra recibió el impacto de pequeños asteroides (generándose bólidos o bolas de fuego) en 556 ocasiones. Estos datos son una de las principales razones por las que NASA ha incrementado en

un factor de 10 las inversiones en actividades de detección, mitigación y caracterización de asteroides en los últimos cinco años [21]. La importancia de determinar futuros impactos de este tipo de objetos es de tal magnitud que desde hace más de dos décadas se están realizando estudios con los objetivos de determinar las probabilidades y riesgo de impacto [22,8,23] (ver fig.1), llevar a cabo un seguimiento constante [24-26] y clasificar los asteroides potencialmente más peligrosos [27].

Figura 1. Distribución de probabilidad de impacto y franjas de riesgo de impacto múltiple para 261 impactos virtuales procedentes de 69 objetos potencialmente peligrosos próximos a la Tierra. Los códigos de colores muestran la probabilidad de impacto (en escala logarítmica) en cada ubicación [28].

Pero no solo es importante conocer las probabilidades y riesgos de impacto, sino también evaluar la eficacia de las técnicas de desviación de asteroides que están siendo consideradas en la actualidad. El objeto de esta comunicación consiste en describir las técnicas de desvío de objetos próximos a la Tierra (*Near Earth Objects*, NEOs) que están siendo consideradas por los técnicos de NASA en la actualidad así como mostrar el diseño de estudio multicriterio que están desarrollando los autores con el asesoramiento de un grupo de expertos para la evaluación y clasificación de dichas tecnologías.

2. Alternativas del problema de decisión multicriterio: métodos de deflexión de asteroides

Tal y como señalan los expertos, la mejor estrategia para evitar que un asteroide colisione contra la Tierra consiste en modificar su aceleración (aumentando o disminuyendo su velocidad) de tal forma que este cruce la órbita de la Tierra antes o después de que nuestro planeta alcance el mismo punto de su órbita [29]. En este sentido, es preciso señalar que la variación de la velocidad de un objeto no solo altera su tiempo de viaje hacia la órbita de la Tierra, sino que también modifica la órbita del mismo alrededor del Sol, lo cual repercute, a su vez, en el lugar y momento en que el asteroide cruzará la órbita de la Tierra. En nuestro estudio de decisión multicriterio pretendemos evaluar los cuatro métodos de deflexión de asteroides que se enumeran a continuación.

1. **Arrastre por gravedad** (*Gravity Tractor,* GT), en el que parte de la masa del asteroide se reutiliza para incrementar la masa de la nave espacial con la finalidad de acelerar el asteroide gravitacionalmente.

2. **Deflexión mediante haz iónico** (*Ion-Beam Deflection,* IBD), en el que el escape de un motor de propulsión por haces de iones de luz solar incide sobre el asteroide.

3. Impacto cinético (*Kinetic Impactor,* KI), en el que un objeto de tamaño considerable se hace colisionar contra el asteroide a una elevada velocidad relativa.

4. Extracción mediante láser (*Laser Ablation,* LA), en el que un láser vaporiza una porción de la superficie del asteroide para ocasionar un retroceso en el movimiento de este.

3. Lista de criterios para evaluar los métodos de deflexión de asteroides

Un total de 10 atributos (ocho de ellos de naturaleza cualitativa o *difusa*) serán utilizados con el objetivo de realizar un análisis multicriterio que permita evaluar las 4 alternativas para deflexión de asteroides anteriormente mencionadas. Es preciso señalar que para cada uno de los criterios difusos que enumeramos a continuación, ha de utilizarse una etiqueta lingüística por parte de los expertos que colaborarán en el análisis. En el apéndice de este trabajo se muestran los conjuntos de etiquetas lingüísticas definidos.

1. (**Difuso; etiquetas de tipo A1**) *Tiempo de construcción* (medido en años), que no considera el tiempo necesario hasta que las tecnologías de deflexión de asteroides consideradas en este estudio alcancen un nivel de desarrollo operativo.

2. **Tiempo de viaje al asteroide** (cuantificado en años), que incluye el tiempo comprendido desde el lanzamiento hasta la órbita C3=0 así como el tiempo de viaje para el encuentro con el NEA (o tiempo de viaje para impacto con el asteroide, en el caso de KI).

3. (**Difuso; etiquetas de tipo A1**) *Duración de la deflexión activa* (medido en años), bajo la suposición de una aceleración uniforme, calculada en cada caso (excepto en el caso de KI, que es instantánea) para producir un desvío del NEA equivalente a 2 radios de la Tierra.

4. (**Difuso; etiquetas de tipo A2**) *Coste relativo de la misión de deflexión* (cuantificado en millones de US dollars).

5. (**Difuso; etiquetas de tipo A3**) *Importancia de la rotación del asteroide*.

6. (**Difuso; etiquetas de tipo A3**) *Importancia de la composición del asteroide*. Usualmente se supone una constitución pétrea para este tipo de objetos.

7. (**Difuso; etiquetas de tipo A3**) *Importancia de la estructura/porosidad del NEA*.

8. (**Difuso; etiquetas de tipo A3**) *Importancia de la forma del asteroide*. Normalmente se asume que este tiene forma esférica.

9. (**Difuso; etiquetas de tipo A4**) *Nivel actual de disponibilidad de la tecnología* necesaria para cada técni**ca de desvío de asteroides.**

10. Impulso *específico* (medido en segundos).

4. Evaluación de los criterios para cada una de las alternativas

Con la ayuda de los expertos, pretendemos dar respuesta a cada una de las siguientes cuestiones.

1. ¿Considera que todos los criterios involucrados en el presente estudio tienen la misma importancia a la hora de evaluar las cuatro técnicas de deflexión de asteroides descritas en la sección 2?

Sí o No

2. Señale el nivel de importancia que usted asignaría a cada uno de los criterios enumerados en la sección 3 para evaluar las técnicas de deflexión de asteroides consideradas en este estudio. Tenga en cuenta que dos o más criterios pueden ser considerados como igualmente importantes.

C1	○ 1st	○ 2nd	○ 3rd	○ 4th	○ 5th	○ 6th	○ 7th	○ 8th	○ 9th	○ 10th
C2	○ 1st	○ 2nd	○ 3rd	○ 4th	○ 5th	○ 6th	○ 7th	○ 8th	○ 9th	○ 10th
C3	○ 1st	○ 2nd	○ 3rd	○ 4th	○ 5th	○ 6th	○ 7th	○ 8th	○ 9th	○ 10th
C4	○ 1st	○ 2nd	○ 3rd	○ 4th	○ 5th	○ 6th	○ 7th	○ 8th	○ 9th	○ 10th
C5	○ 1st	○ 2nd	○ 3rd	○ 4th	○ 5th	○ 6th	○ 7th	○ 8th	○ 9th	○ 10th
C6	○ 1st	○ 2nd	○ 3rd	○ 4th	○ 5th	○ 6th	○ 7th	○ 8th	○ 9th	○ 10th
C7	○ 1st	○ 2nd	○ 3rd	○ 4th	○ 5th	○ 6th	○ 7th	○ 8th	○ 9th	○ 10th
C8	○ 1st	○ 2nd	○ 3rd	○ 4th	○ 5th	○ 6th	○ 7th	○ 8th	○ 9th	○ 10th
C9	○ 1st	○ 2nd	○ 3rd	○ 4th	○ 5th	○ 6th	○ 7th	○ 8th	○ 9th	○ 10th
C10	○ 1st	○ 2nd	○ 3rd	○ 4th	○ 5th	○ 6th	○ 7th	○ 8th	○ 9th	○ 10th

Tabla 1.

3. Compare el criterio que ha seleccionado en primer lugar con cada uno de los criterios restantes. Para ello, se utilizarán las siguientes etiquetas:

- EI (*Equally Important*): igualmente importante.
- mMI (*Moderately More Important*): moderadamente más importante.
- MI (*More Important*): más importante.
- MMI (*Much More Important*): mucho más importante.
- EMI (*Extremely More Important*): extremadamente más importante.

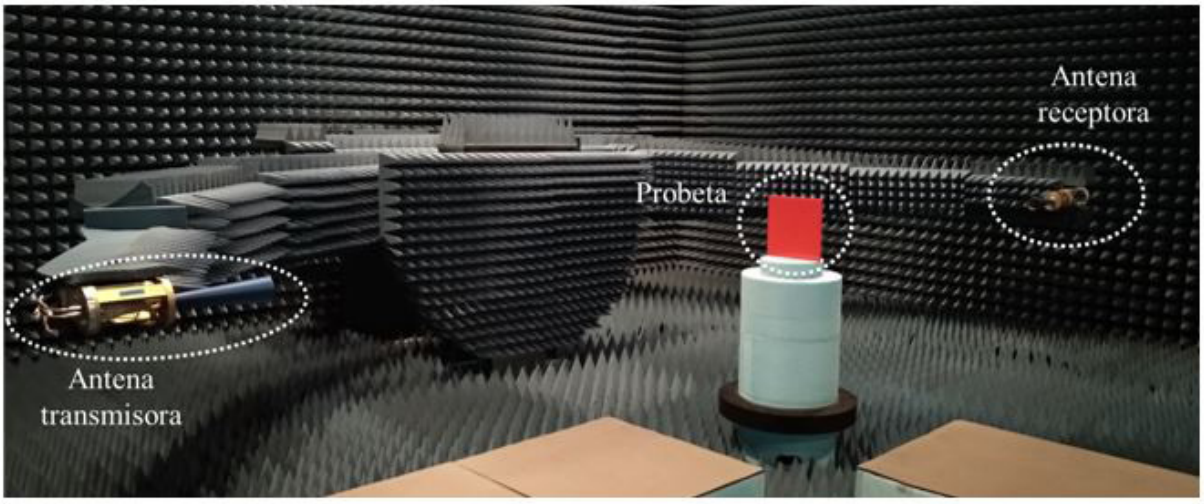


Figura 2. Probeta de HIPS pintada en BIANCHA.

5. Evaluación de las técnicas de desvío de asteroides

En esta sección mostraremos cómo los expertos pueden proporcionar información de utilidad para evaluar cada técnica de desvío de NEA respecto de cada uno de los 10 criterios descritos en la sección 2. Para ello, plantearemos las siguientes cuestiones relativas a cada criterio.

1. Mediante las etiquetas lingüísticas de tipo A1 valorar cada una de las cuatro alternativas respecto al criterio *tiempo de construcción*.

A1	○ **VL**	○ **L**	○ **M**	○ **S**	○ **VS**
A2	○ **VL**	○ **L**	○ **M**	○ **S**	○ **VS**
A3	○ **VL**	○ **L**	○ **M**	○ **S**	○ **VS**
A4	○ **VL**	○ **L**	○ **M**	○ **S**	○ **VS**

Tabla 3.

2. Mediante las etiquetas lingüísticas de tipo A1 valorar cada una de las cuatro alternativas respecto al criterio *duración* de la deflexión activa.*

3. Mediante las etiquetas lingüísticas de tipo A2 valorar cada una de las cuatro alternativas respecto al criterio coste *relativo de la misión de deflexión*.

A1	○ **VH**	○ **H**	○ **A**	○ **L**	○ **VL**
A2	○ **VH**	○ **H**	○ **A**	○ **L**	○ **VL**
A3	○ **VH**	○ **H**	○ **A**	○ **L**	○ **VL**
A4	○ **VH**	○ **H**	○ **A**	○ **L**	○ **VL**

Tabla 4.

4. Mediante las etiquetas lingüísticas de tipo A3 valorar cada una de las cuatro alternativas respecto al criterio *importancia de la rotación del asteroide*.

A1	○ **EI**	○ **VI**	○ **I**	○ **M**	○ **LI**
A2	○ **EI**	○ **VI**	○ **I**	○ **M**	○ **LI**
A3	○ **EI**	○ **VI**	○ **I**	○ **M**	○ **LI**
A4	○ **EI**	○ **VI**	○ **I**	○ **M**	○ **LI**

Tabla 5.

5. Mediante las etiquetas lingüísticas de tipo A3 valorar cada una de las cuatro alternativas respecto al criterio importancia de la composición del asteroide.***

6. Mediante las etiquetas lingüísticas de tipo A3 valorar cada una de las cuatro alternativas respecto al criterio importancia de la estructura/porosidad del asteroide.***

7. Mediante las etiquetas lingüísticas de tipo A3 valorar cada una de las cuatro alternativas respecto al criterio importancia de la forma del asteroide.***

8. Mediante las etiquetas lingüísticas de tipo A4 valorar cada una de las cuatro alternativas respecto al criterio *nivel actual de disponibilidad de la tecnología*.**

* El esquema de la plantilla de respuestas para cada experto sería análogo al utilizado para ilustrar la cuestión 1.

** El esquema de la plantilla de respuestas para cada experto sería análogo al utilizado para ilustrar la cuestión 3.

*** El esquema de la plantilla de respuestas para cada experto sería análogo al utilizado para ilustrar la cuestión 4.

Apéndice. Etiquetas para criterios de naturaleza cualitativa

Las etiquetas lingüísticas definidas para evaluar los criterios de naturaleza cualitativa son las siguientes:

- **Etiquetas de tipo A1** (para determinar la duración temporal):
  - VL (*Very Long*): gran duración.
  - L (*Long*): duración considerable.
  - M (*Medium*): duración media.
  - S (*Short*): corta duración.
  - VS (*Very Short*): duración muy corta.
- **Etiquetas de tipo A2** (para indicar el coste económico):
  - VH (Very High): coste muy alto.
  - H (High): coste elevado.
  - A (Affordable): coste contenido.
  - L (Low): bajo coste.
  - VL (*Very Low*): coste muy bajo.
- **Etiquetas de tipo A3** (para cuantificar la importancia de las restricciones del modelo):
  - EI (Extremely Important): extremadamente importante.
  - VI (Very Important): muy importante.
  - I (Important): importante.
  - M (Moderate): de importancia media.
  - LI (*Little Important*): de poca importancia.
- **Etiquetas de tipo A4** (para indicar el nivel de madurez de la tecnología correspondiente a cada técnica de desvío de asteroides):
  - VH (Very High): muy alto.
  - H (High): alto.
  - M (Medium): medio.
  - L (Low): bajo.
  - VL (*Very Low*): muy bajo.

Referencias

1. *Archibald, J.D. Dinosaur extinction and the end of an era: what the fossils say. New York: Columbia University Press; 1996.*
2. *Archibald, J.S. Dinosaur extinction: changing views, Scotchmoor, J.G., Springer, D.A., Breithaupt, B.H., & Fiorillo, A.R. (Eds.), Dinosaurs: The Science Behind the Stories, American Geological Institute. 2002: 99–106.*
3. *Álvarez, L.W., Álvarez, W., Asaro, F., & Michel, H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction, Science. 1980; 208: 1095–1108.*

4. *Alvarez, W. T. rex and the crater of doom. Princeton, NJ: Princeton University Press; 1997.*
5. *Sharpton, V. L., & Ward, P. D. Global catastrophes in Earth history: An interdisciplinary conference on impacts, volcanism, and mass mortality. Geological Society of America Special Paper. 1990; 247: 631 p.*
6. *Schulte, P., Alegret, L,. Arenillas, I. et al. The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. Science. 2010; 327:1214–1218.*
7. *Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Camargo Z., A., Jacobsen, S. B., & Boynton, W. V. Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico, Geology. 1991; 19: 867–871.*
8. *Fulchignoni, M., & Barucci, M.A. NEO Impact Consequences and Hazards. C. R. Physique. 2005; 6: 283–289.*
9. *Bardeen, C.G., Garcia, R.R., Toon, O.B. & Conley, A.J. On transient climate change at the Cretaceous−Paleogene boundary due to atmospheric soot injections. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2017; 7415–7424.*
10. *Raup, D.M., & Sepkoski J. J.Jr. Periodic extinction of families and genera, Science. 1986; 231: 833–836.*
11. *Sepkoski, J.J. Jr. The taxonomic structure of periodic extinction. In Sharpton, V. and Ward, P., eds. Global catastrophes in earth history. Geological Society of America Special Paper. 1990; 247: 33–44.*
12. *Culler, T.S., Becker, T.A., Muller, R.A., & Renne, P.R. Lunar impact history from 40Ar/39Ar dating of glass spherules, Science. 2000; 287: 1785– 1788.*
13. *Perna, D., Barucci, M.A., & Fulchignoni, M. The near-Earth objects and their potential threat to our planet. Astronomy and Astrophysics Review. 2013; 21:65.*
14. *Cloud, P. The Biosphere. Scientific American. 1983; 249 (3): 176-189.*
15. *Sleep, N.H., Zahnle, K.J., Kasting, J.F., & Morowitz, H.J. Annihilation of ecosystems by large asteroid impacts on the early Earth. Nature. 1989; 342: 139–142.*
16. *Swisher, C.C., Grajales-Nishimura, J.M., Montanari, A., Margolis, S.V., Claeys, P., Alvarez, W., Renne, P., Cedillo- Pardo, E., Maurasse, F.J-M.R., Curtis, G.H., Smit, J., & McWilliams, M.O. Coeval 40Ar/39Ar ages of 65.0 million years ago from Chicxulub crater melt rock and Cretaceous-Tertiary boundary tektites. Science. 1992; 257: 954–958.*
17. *Chapman, C.R., & Morrison, D. Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard, Nature. 1994; 367: 33– 40.*
18. *Chapman, C.R. The hazard of near-Earth asteroid impacts on earth. Earth and Planetary Science Letters. 2004; 222: 1 –15.*
19. *European Space Agency. Asteroid Impact Mission. http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Asteroid_Impact_Mission/Planetary_defence (último acceso: 15/05/2018).*
20. *Popova, O.P. et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization. Science. 2013; 342: 1-16.*
21. *NASA. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. New Map Shows Frequency of Small Asteroid Impacts, Provides Clues on Larger Asteroid Population. https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4380 (ultimo acceso: 14/05/2018).*
22. *Chesley, S.R., Chodas, P.W., Milani, A., Valsecchi, G.B. & Yeomans, D.K. Quantifying the Risk Posed by Potential Earth Impacts. Icarus. 2002; 159: 423–432.*
23. *Milani, A., & Valsecchi, G.B. The Asteroid Identification Problem. Target Plane Confidence Boundaries. Icarus. 1999; 140: 408–423.*
24. *NASA. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Sentry: Earth Impact Monitoring. https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/ (último acceso 16/05/2018).*

25. *Milani, A., Chesley, S. R., Sansaturio, M. E., Bernardi, F., Valsecchi, G. B. & Arratia, O. Long term impact risk for (101955) 1999 RQ36. Icarus. 2009; 203: 460–471.*
26. *Farnocchia, D. & Chesley, S. R. Assessment of the 2880 impact threat from Asteroid (29075) 1950 DA. Icarus. 2014; 229: 321–327.*
27. *Sánchez-Lozano, J.M. & Fernández-Martínez, M. Near-Earth object hazardous impact: A Multi-Criteria Decision Making approach. Scientific Reports. 2016; 6: 37055.*
28. *Rumpf, C., Lewis, H.G., & Atkinson, P.M. The Global Impact Distribution of Near-Earth Objects. Icarus. 2016; 265: 209-207.*
29. *Yeomans, D. K. Near-Earth Objects: Finding Them Before They Find Us. Princeton University Press, 41 William St., Princeton, NJ; 2013.*

ExoMars 2020: fabricación mediante tecnología FDM del cover de protección planetaria para ensayos de compatibilidad electromagnética del sensor AMR

Muñoz Rebate, I.[1], León Calero, M.[1], Fernández Romero, S.[1], Poyatos Martínez, D.[1], Plaza Gallardo, B.[2], Escot Bocanegra, D.[1], Parrondo Sempere, M.C.[1] y Martín Iglesias, S.[1*]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) «Esteban Terradas», Ctra. de Ajalvir, km. 4,5, 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid). Correo electrónico: martinis@inta.es (SMI).

[2] Ingeniería de Sistemas para la Defensa (ISDEFE). Calle Beatriz de Bobadilla, 3. 28040 Madrid. Consultor externo en INTA.

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: martinis@inta.es (SMI).

Resumen

Las misiones espaciales destinadas a un planeta con posibilidad de albergar vida, deben cumplir una serie de requisitos especiales para evitar la contaminación interplanetaria con microorganismos terrestres. La búsqueda de materiales que sirvan como barreras biológicas para proteger los equipos durante las distintas actividades de un proyecto espacial constituye un campo de investigación en continuo desarrollo. En este artículo se explica el proceso de desarrollo y fabricación de un *cover* de protección planetaria para la realización de los ensayos de compatibilidad electromagnética (EMC) de un sensor de campo magnético para la misión ExoMars 2020. Se debe tener en cuenta que las propiedades del material seleccionado deben cumplir con los requisitos de transparencia en radiofrecuencia (RF) para que de este modo no interfiera en las medidas. La novedad que presenta el diseño de este *cover* es el empleo de la tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*) como método de fabricación. Como ventaja, la fabricación aditiva permite el desarrollo de componentes adaptados a las necesidades multifísicas del proyecto (series únicas), fácilmente modificables y de bajo coste. El objetivo de este proyecto es estudiar la viabilidad del empleo de la técnica FDM como método flexible y de bajo coste para la fabricación de equipos de soporte en tierra de proyectos aeroespaciales.

Palabras clave

ExoMars 2020, ingeniería aditiva, *fused deposition modeling*, compatibilidad electromagnética, protección planetaria.

1. Introducción

ExoMars 2020 es una misión espacial cuyo objetivo principal es la búsqueda de indicios de vida actual o remota en Marte. Este proyecto consta de dos elementos: el rover y la sonda superficial. La sonda superficial es un módulo estacionario cuyas funciones son: obtener imágenes de la zona de aterrizaje, estudiar el clima local, realizar medidas de la superficie interna de Marte e investigar la atmósfera marciana. Entre los sistemas incluidos en esta plataforma encontramos el módulo meteorológico METEO-M, dirigido por el *Space Research Institute of Russian Academy of Sciences* (IKI, *Institut Kosmicheskih Issledovanyi*) dentro del cual está integrado el sensor AMR (*Anisotropic Magneto-Resistance*) para la medida de campos magnéticos.

El sensor AMR, desarrollado en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), debe ser sometido a una serie de ensayos de calificación, entre ellos los de compatibilidad electromagnética (EMC) teniendo en cuenta los requisitos técnicos establecidos por IKI de acuerdo al estándar ECSS-E-ST-20-07C Rev. 1 [1]. Todas las actividades de integración, validación y tests deben de realizarse en condiciones de limpieza, es decir, aislamiento del ambiente, para poder cumplir con los requisitos de protección planetaria de la misión [2]. Por ello, ha sido necesario el diseño y la fabricación de un *cover* de protección planetaria que no interfiera en las medidas durante los ensayos de EMC y permita la operación sobre el sensor sin interrumpir, en momento alguno, el requerimiento de protección planetaria. Para cumplir con estos requisitos, el *cover* debe ser fabricado empleando materiales transparentes en radiofrecuencia (RF).

La fabricación aditiva se presenta como una tecnología prometedora en el ámbito de la RF ya que puede utilizar un amplio abanico de materiales poliméricos (termoplásticos) de bajo coeficiente de transmisión [3]. Existen multitud de técnicas aditivas con ventajas diferenciales [4] clasificadas principalmente en función del estado del material que procesen [5, 6]. Entre estas ventajas destacan el ahorro de material, ya que no requiere la fabricación de utillaje [6], y la reducción de tiempos de fabricación. Además, ofrece otros beneficios frente a las técnicas convencionales, siendo posible la fabricación de estructuras optimizadas multifísicamente y adaptadas a la finalidad de la aplicación. Todo ello hace posible la producción de pequeñas series a coste reducido, optimizadas y centradas en la aplicabilidad del componente en la industria aeroespacial. Entre las técnicas más destacadas se encuentra la tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*) [7] que busca que cada vez más sectores industriales centren su atención en la fabricación de piezas funcionales.

En este artículo se explica el proceso de investigación llevado a cabo para el desarrollo y fabricación del *cover* de protección planetaria para la realización de los ensayos de EMC del sensor AMR de la misión ExoMars 2020. La novedad de este proyecto es el empleo de la tecnología FDM como método de fabricación. El trabajo realizado se puede dividir en dos etapas. Una primera fase, donde ha sido necesario el estudio de las propiedades de transparencia en RF de diferentes materiales con el fin de cumplir con los requisitos de EMC. La segunda fase consiste en el diseño y fabricación del *cover* empleando el material seleccionado, así como su comprobación final en la realización de ensayos del sensor. Los resultados obtenidos abren camino para el empleo de la técnica FDM en la fabricación de equipos de soporte en tierra de proyectos aeroespaciales. Como conclusión podemos destacar que la fabricación aditiva ha permitido desarrollar un *cover* de gran versatilidad adaptado a la finalidad de la aplicación y de bajo coste.

2. Selección de material

2.1. Diseño y fabricación de probetas

Teniendo en cuenta que el objetivo de la aplicación es proteger un sensor frente a la contaminación biológica terrestre, no siendo crítico el factor mecánico, se han considerado dos soluciones diferentes de protección planetaria: *cover* fabricado mediante tecnología FDM y un embolsado de polietileno (muy utilizado en otros ensayos de calificación) [8].

Estudios previos realizados en las instalaciones del INTA mostraron el buen comportamiento frente a transparencia en RF que presentan algunos materiales típicos empleados en FDM. Entre los materiales analizados se observó el bajo coeficiente de transmisión que presentaban el poliestireno de alto impacto (HIPS, *High Impact Poliestirene*) [9], y el ácido poliláctico (PLA, *Polylactic Acid*). Finalmente, se seleccionó el material HIPS ya que presenta mejores condiciones de postprocesado (fácil lijado, mecanización y tratamiento químico).

En este estudio se ha empleado como máquina de impresión una Raise3D N2 Plus Dual, cuyo *software* de control es ideaMaker. Las condiciones de fabricación seleccionadas son las mostradas en la tabla 1. Como se puede observar las probetas han sido fabricadas con una densidad de relleno del 100 % ya que el objetivo de estas medidas era caracterizar el material y no el comportamiento según la estructura interna [10]. Teniendo en cuenta los requerimientos de la técnica [11], las probetas fueron diseñadas con las dimensiones de 200 x 200 x 10 mm.

Condiciones de fabricación	
Altura de capa	0,2 mm
Densidad de relleno	100 %
Temperatura de extrusión	235ºC
Temperatura de la cama	100ºC
Diámetro de boquilla	0,4 mm

Tabla 1. Condiciones de fabricación

La imagen de la izquierda de la figura 1 muestra dos probetas fabricadas con HIPS, donde la probeta naranja (HIPS + PUR) incluye un recubrimiento con pintura de poliuretano (PUR, marca Lesonal, RAL 2008). Esta pintura ha sido utilizada en otras aplicaciones por su alta transparencia en RF [12]. En este caso, su objetivo es facilitar la limpieza del *cover* garantizando que se mantiene la transparencia en RF. A pesar del buen comportamiento de esta pintura observado en otras aplicaciones, es necesario comprobar que los valores de transmisión se mantienen en el rango válido para la aplicación. Por otro lado, la imagen de la derecha muestra las bolsas de polietileno. Observando los resultados finales, se decidió fabricar un *cover* de protección empleando la tecnología FDM, ya que permite el control sobre la toma de tierra del instrumento (esencial en los ensayos de EMC) y facilita la integración, la limpieza y protege frente a impactos durante la manipulación.

Figura 1. Materiales analizados: probetas de HIPS (izq.) y bolsas de polietileno (dcha.).

2.2. Ensayo en BIANCHA

Existen diferentes técnicas de caracterización electromagnética de materiales y la elección de una u otra depende de cada estudio concreto. En este estudio se ha optado por la utilización de técnicas de medida basadas en espacio libre, ya que estas se caracterizan por: ser no destructivas y sin contacto, extraer las propiedades electromagnéticas mediante medidas en transmisión o reflexión y por ser adecuadas para medir en un amplio ancho de banda [11]. Cabe destacar que, en este tipo de medidas, los materiales pueden ser heterogéneos a lo largo de su estructura, lo que es una ventaja a tener en cuenta a la hora de medir muestras obtenidas mediante fabricación aditiva. El INTA posee en las instalaciones del Laboratorio de Detectabilidad una cámara polivalente (BIANCHA, *BIstatic ANechoic CHAmber*) capaz de realizar este tipo de medidas en espacio libre. Esta cámara está formada por una mesa rotatoria de doble eje en acimut y dos brazos elevados, de manera que el conjunto puede establecer un escáner esférico y biestático. En los extremos de ambos brazos se colocan dos sondas de medida, las cuales se podrán situar en cualquier punto de una semiesfera imaginaria, pudiéndose así lograr cualquier combinación de ángulos entre las mismas y el objeto a medir [13]. Aunque BIANCHA es capaz de medir en cualquier combinación biestática de ángulos y en ella se pueden hacer ensayos de extracción de parámetros constitutivos basados en [11], en este caso de estudio es suficiente con medir la energía transmitida a través del material para inferir su apantallamiento. La medida del apantallamiento se realizó mediante un analizador vectorial de redes (VNA, *Vector Network Analizer*). La figura 2 muestra la probeta de HIPS pintada situada en vertical en el centro de la cámara con ambas antenas enfrentadas.

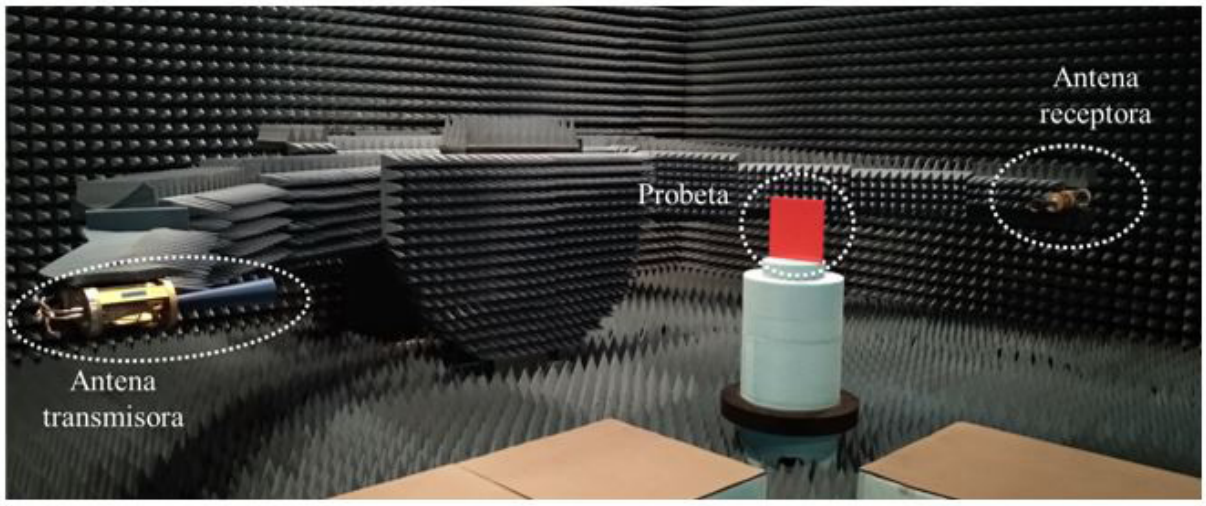


Figura 2. Probeta de HIPS pintada en BIANCHA.

La figura 3 muestra los resultados obtenidos durante los ensayos con BIANCHA donde se puede observar que los valores de apantallamiento están dentro del rango de error de equipo de medida (<1 dB) a lo largo de todo el rango de frecuencias medido (1-9 GHz). Por otro lado, en referencia a la polarización, se puede observar que las muestras no se ven afectadas por la polarización (VV y HH). Cabe destacar que el plástico es absolutamente transparente, ya que no se ve afectado en ningún momento por el campo electromagnético. Por lo tanto, se puede concluir que todos los materiales son válidos para el objetivo de la aplicación.

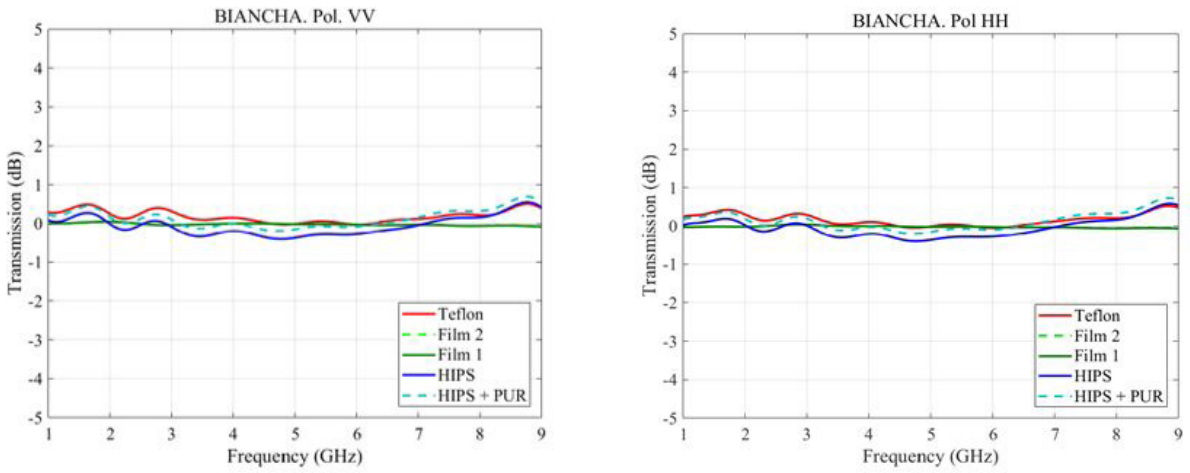


Figura 3. Medidas de apantallamiento de los distintos materiales en el rango de frecuencias de 1 a 9 GHz. Las figuras muestran el coeficiente de transmisión.

3. Cover de protección planetaria

3.1. Diseño y fabricación

El diseño del *cover* debe cumplir tres requisitos principales: proporcionar espacio suficiente para alojar los instrumentos a ensayar, aislarlos del medio exterior y asegurar el control sobre la toma de tierra del instrumento. A esto hay que añadirle la necesidad de disponer de una interfaz, o placa de conexión, que permita la comunicación entre los instrumentos y los equipos de medida, así como, la alimentación. Siguiendo estas pautas, se han diseñado las piezas mostradas en la figura 4. Cabe destacar que, durante su diseño, se han tenido en cuenta aspectos como el proceso de fabricación [14], la integridad estructural o el ensamblaje del conjunto.

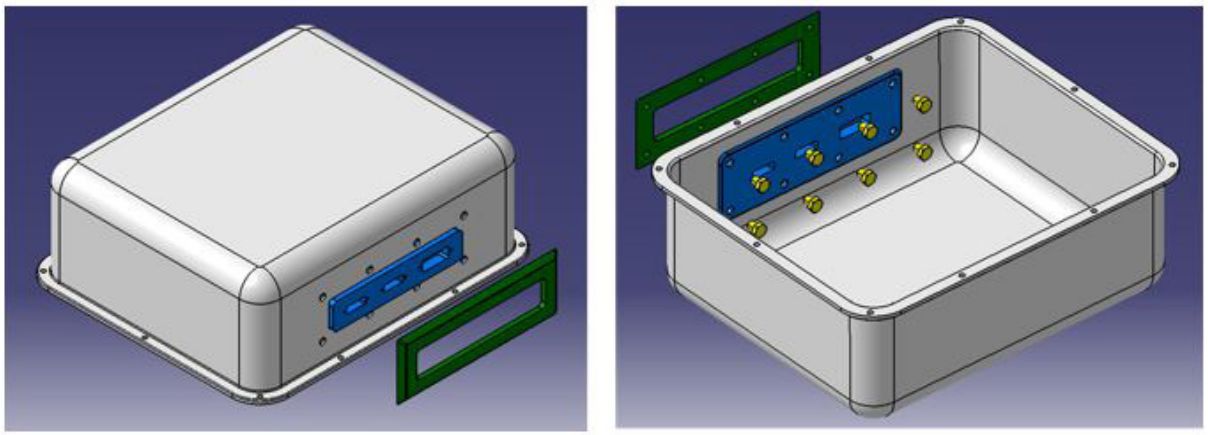


Figura 4. Piezas que componen el cover: estructura principal (blanco), placa de conexión (azul), marco exterior (verde) y tornillos de HIPS (amarillo).

En la figura 4, se observa la estructura principal con forma de paralelepípedo rectangular. Sus dimensiones máximas son 305 x 256 x 105 mm y tiene un espesor de pared de 2 mm. Se debe tener en cuenta que las dimensiones están limitadas por la superficie de impresión (305 x 305 mm), por lo que el diseño ha sido optimizado con el fin de disponer de espacio suficiente para la correcta integración de los instrumentos. Además, las aristas han sido redondeadas con el objetivo de facilitar las tareas de limpieza del protocolo de protección planetaria. Por otro lado, en la parte frontal de la estructura principal

existe un alojamiento rectangular donde se integran la placa de conexión y el marco exterior a traves de ocho tornillos de HIPS. Finalmente, en la parte inferior se dispone de una solapa que permite el sellado completo del *cover* por medio de diez tornillos ISO 4762 de M4 a una placa metálica (AL 7075) que actúa de interfaz con el plano de masa de los ensayos. El espesor de este reborde es de 4 mm para aumentar la rigidez local y asegurar el sellado del *cover* respecto de la base.

El diseño de la placa de conexión la hace independiente de la estructura principal, de tal manera, que se puede adaptar a diferentes configuraciones en función de las necesidades del proyecto. Por ejemplo, ensayar los instrumentos de uno en uno, o simultáneamente varios. La configuración final de la placa incluye una serie de insertos roscados donde son fijados dos conectores MDM25P y un conector SUB-D15P. Esta placa es fijada a la estructura principal mediante una serie de tornillos fabricados en HIPS con el objetivo de minimizar la interferencia electromagnética. Para ello, se han fabricado prismas hexagonales de 10 mm de distancia entre caras y, a continuación, se han mecanizado siguiendo la normativa ISO 4017. La figura 5 muestra el diseño completo del *cover* con los instrumentos en su interior, todos ellos integrados sobre la placa de toma a tierra.

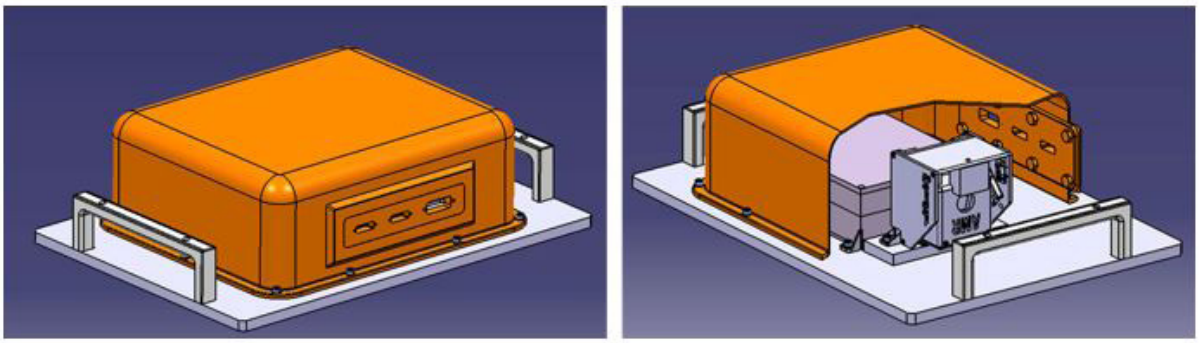


Figura 5. Diseño del cover junto con los instrumentos y la placa de toma a tierra.

La figura 6 muestra las piezas fabricadas empleando los parámetros de impresión indicados en la tabla 1, y sometidas a un postprocesado con el fin de obtener mejor acabado superficial. Para ello, se ha seguido un proceso con varias fases de lijado, incrementando el tipo de grano hasta llegar a valores de grano muy fino (800). El acabado final de las piezas se ha realizado con pintura de poliuretano para facilitar su limpieza.

Figura 6. Piezas impresas (izq.) y montaje final de cover sobre placa de ensayo (dcha.).

3.2. Ensayos de compatibilidad electromagnética (EMC)

Finalmente, ya se ha realizado parte de los ensayos de EMC de la fase de calificación del instrumento AMR en la sala semianecoica del INTA con capacidad de sala limpia ISO 8. El equipo con la protección planetaria fue sometido a las pruebas de emisión radiada de campo eléctrico y magnético, susceptibilidad radiada a campos eléctricos y magnéticos y el ensayo de descarga electrostática, como puede verse en la figura 7. El *cover* diseñado cumplió con las especificaciones y será utilizado en el resto de ensayos tanto de la fase de calificación como de la fase de vuelo.

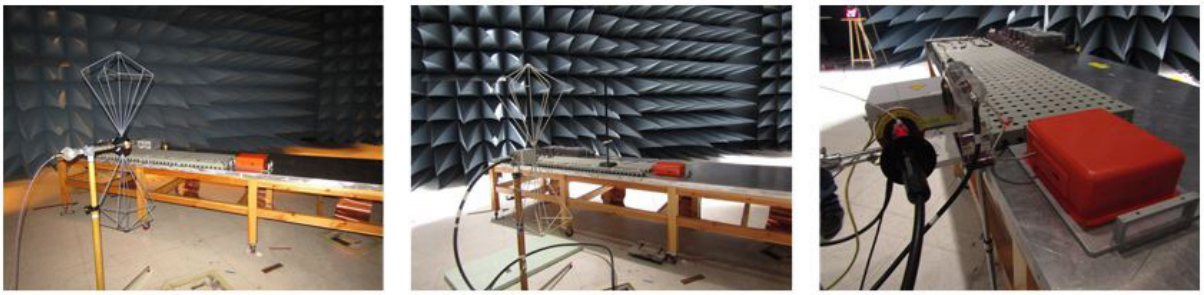


Figura 7. Ensayos de EMC (de izquierda a derecha): ensayo de emisión radiada, ensayo de susceptibilidad radiada y ensayo de descarga electroestática.

4. Conclusiones

En esta comunicación se ha llevado a cabo el desarrollo y fabricación mediante tecnología FDM de un *cover* de protección planetaria para la realización de los ensayos de EMC de un sensor de campo magnético para la misión ExoMars 2020. Para ello, se ha realizado un análisis de las propiedades electromagnéticas de diferentes materiales, donde se ha demostrado la viabilidad para la fabricación de estructuras transparentes en RF mediante el empleo de polímeros comúnmente utilizados en fabricación aditiva. Con el objetivo de cumplir con los requisitos de protección planetaria y facilitar la limpieza del *cover*, el acabado final de la estructura se ha realizado mediante la aplicación de pintura de poliuretano. Esta pintura fue seleccionada debido al buen comportamiento que ha presentado en aplicaciones anteriores de transparencia en RF. Finalmente, este *cover* ha sido utilizado en los ensayos de EMC para la calificación del sensor AMR, permitiendo la realización de los ensayos y protegiendo al equipo de la contaminación biológica. La posibilidad de obtener piezas complejas empleando tiempos breves de fabricación, añade gran valor a este tipo de tecnología, siendo posible la reparación o sustitución de elementos sin generar un gran impacto de retraso en el proyecto. Además, la posibilidad de sustituir la placa de conexión permitiendo ensayar los instrumentos de uno en uno, o simultáneamente varios, supone un gran valor añadido proporcionando gran versatilidad a esta aplicación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (MEIC) bajo el marco del proyecto UAVE3 (TEC2016-79214-C3-1-R) y MAP MARS (ESP2015-70184-R).

Referencias

1. *ESA, European Cooperation for Space Standardization, ECSS. (2012). «Space Engineering. Electromagnetic Compatibility», ECSS-E-ST-20-07C Rev. 1.*
2. *Frick, A., Mogul, R., Stabekis, P., Conley, C. A., & Ehrenfreund, P. (2014). Overview of current capabilities and research and technology developments for planetary protection. Advances in Space Research, 54(2), 221-240.*

3. *Nalwa, H. S. Handbook of Low and High Dielectric Constant Materials and Their Applications, 1999. Two-volume Set.*
4. *Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering.*
5. *Stucker, B., Gibson, I., & Rosen, D. (2010). Additive Manufacturing Technologies. Springer.*
6. *Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing-An Overview. Materials Today: Proceedings, 5(2), 3873-3882.*
7. *Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. Advances in Manufacturing, 3(1), 42-53.*
8. *Deltalab, Stirile bags. [(acceso el 21 de agosto 2018)] Disponible online: http://www.deltalab.es/en/producto/sterile-bags-for-stomacher-blenders/*
9. *Material Data Sheet: Z-HIPS. (acceso el 22 de agosto 2018). Disponible online: https://tca.pt/pdf/Z-HIPS_Material_Data_Sheet_eng.pdf.*
10. *Massoni, E., Silvestri, L., Bozzi, M., Perregrini, L., Alaimo, G., Marconi, S., & Auricchio, F. (2016, July). Characterization of 3D-printed dielectric substrates with different infill for microwave applications. In Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), 2016 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on (pp. 1-4). IEEE.*
11. *Ghodgaonkar, D. K., Varadan, V. V., & Varadan, V. K. (1989). A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies. IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 38(3), 789-793.*
12. *López-Rodríguez, P., Escot-Bocanegra, D., Poyatos-Martínez, D., & Weinmann, F. (2016). Comparison of metal-backed free-space and open-ended coaxial probe techniques for the dielectric characterization of aeronautical composites. Sensors, 16(7), 967.*
13. *Escot, D., Poyatos, D., Aguilar, J. A., Montiel, I., González, I., & De Adana, F. S. (2010). Indoor 3D full polarimetric bistatic spherical facility for electromagnetic tests. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 52(4), 112-118.*
14. *Redwood, B., Schöffer, F., & Garrett, B. (2017). The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. 3d Hubs B.V.*

Área IV - Combatiente

4A. Sistema combatiente

Estudio experimental: «BHBT» producido por amenaza balística

Miranda-Vicario, A. [1,2]*, Bravo, P. M. [2] y Coghe, F. [1].

[1] Royal Military Academy, Department of Weapon Systems and Ballistics, Avenue Renaissance, 30, B-1000 Brussels, Belgium.

[2] Universidad de Burgos, Departamento de Ingeniería Civil, Avda. Cantabria s/n, 09006 Burgos, España.

* Autor principal y responsable del trabajo: angel.miranda@dymasec.be

Resumen

Los cascos militares son capaces de detener fragmentos producidos en explosiones. En los últimos años se está prestando especial atención a incrementar esta protección, de forma que sea capaz de detener balas. Estos requerimientos ya se pueden encontrar para el último casco del Ejército español «Cobat 01» capaz de detener 9 x 19 mm o el casco del Ejército de Estados Unidos *Enhanced Combat Helmet* capaz de detener balas de rifle en ciertas condiciones. Aunque es posible detener este tipo de amenazas, existe el riesgo de que el propio casco produzca un daño en el portador de este. No hay suficientes estudios sobre las posibles lesiones producidas por un impacto que produce una perforación parcial con este tipo de amenazas. Es necesario mejorar el conocimiento en esta área específica. Con este objetivo, en esta investigación, se ha usado munición 9 mm x 19 mm FMJ contra el casco Schuberth, que está en servicio en el Ejército belga para estudiar la deformación producida y su interacción con la cabeza.

Palabras clave

Casco, deformación, impacto balístico.

1. Introducción

Hoy en día, los cascos militares están realizados en materiales compuestos. Estos están hechos con fibras, principalmente de aramida, el material del famoso Kevlar y una resina mantiene las distintas capas unidas, dan forma y solidez al casco. Los cascos están diseñados para detener fragmentos de diferentes artefactos explosivos. Debido a la diversa naturaleza y origen de los fragmentos, esta amenaza se simula con proyectiles que representan los fragmentos (en inglés, *Fragment Simulating Projectile*, FSP), definidos en la norma OTAN [1]. Fueron desarrollados para ensayar y certificar protección balística personal y de vehículos, con una buena repetitividad y sin necesidad de producir una explosión, ya que pueden ser disparados con las armas apropiadas. Existen diversos tamaños de FSP, según los diferentes calibres. Los más usuales para el ensayo de protección balística personal, cascos y chalecos, son los fragmentos de 1,1 g. La velocidad del proyectil queda definida por los distintos interesados. Por ejemplo, para el casco del Ejército español «Cobat 01» está fijada en 650 m/s. Debido al cambio en los escenarios y las armas presentes, se ha percibido la necesidad de incrementar la protección de la cabeza frente a impactos de munición de pistolas y rifles. Este tipo de amenaza, debido a sus características, como el peso o la velocidad de impacto, posee mucha más energía cinética y es más difícil de detener. Sin embargo, hay que tener en cuenta, cuando se habla de protección balística personal, que no solo hay que detener la amenaza, sino que hay que neutralizar la posibilidad de que se produzcan lesiones al portador del casco. Estas se pueden producir incluso si el casco no ha sido completamente perforado, debido a la deformación y a las ondas de tensión dinámicas propagadas causadas por el impacto. Estas heridas potencialmente pueden ser mortales. Un estudio mostró el riesgo de sufrir una fractura craneal de un usuario portando un casco que sufre un impacto balístico con un proyectil de 9 mm [2], si bien es difícil encontrar casos documentados de personal desplegado [3]. Este tipo de lesiones se llaman *Behind Armour Blunt Trauma* (BABT) y específicamente *Behind Helmet Blunt Trauma* (BHBT) para los cascos.

La posibilidad de sufrir daños no ha sido estudiada por las normas, mayormente por la falta de conocimiento de los eventos relacionados, haciendo necesaria la introducción de simplificaciones. Por ejemplo, algunas normas usan como referencia diferentes tipos de arcilla, sin relación directa con el cuerpo humano. Por ejemplo, las normas del «National Institute of Justice» (NIJ) valoran el BABT con el valor de la indentación en la arcilla debido a la deformación de la protección [4,5]. Esta deformación se produce al impactar un proyectil en la protección balística, y disipar la energía cinética para poder detener el proyectil. La arcilla atestigua la huella de la indentación.

Para la protección del cuerpo humano, las normas indican una indentación máxima de 44 mm [6]. Este valor se convirtió en un valor de referencia para cualquier situación, pese a que proviene de la experiencia basada en una cantidad limitada de proyectiles y protecciones [7]. Sin embargo, el hecho de que solamente se hayan documentado incidentes menores indica que este valor es apropiado o incluso conservador. Desafortunadamente, no existe consenso para el caso de los cascos. El ejército de Estados Unidos indica una indentación máxima de 16 mm para los impactos laterales y 25,4 mm los impactos frontal y posterior sobre casco. En Alemania, la agencia «Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen» (VPAM) permite que le llegue a la plastilina 25 J medidos en

base a la deformación de esta [8]. Finalmente, en España, la norma militar limita la indentación a 20 mm [9]. Estas disparidades hacen que sea difícil la comparación o la definición de un criterio claro.

A pesar de que parece evidente la existencia de una relación entre la indentación y el riesgo de lesión, esta relación es difícil de cuantificar, debido a los numerosos mecanismos de lesión y parámetros involucrados. Hoy en día, es necesario clarificar esta relación debido a la mejora que se espera de la protección balística y las nuevas amenazas a las que hay que hacer frente, como las balas de pistola o rifle.

Este estudio se ha realizado con el ánimo de estudiar las cargas que soporta el usuario del casco mientras el casco está deteniendo una bala. Se ha usado munición 9 x 19 mm *Full Metal Jacket* (FMJ) que se ha disparado contra el casco en servicio del Ejército belga. Aunque este casco no se diseñó para detener este tipo de amenazas, usa materiales y técnicas similares a otros cascos militares de distintos ejércitos. En este estudio se va a medir al indentación y la fuerza que se produce al disparar sobre un casco. Ante la imposibilidad de medir estas variables a la vez, se van a usar dos cabezas de maniquíes diferentes.

2. Instalación experimental

Es necesario disparar los proyectiles para poder valorar las propiedades balísticas de los cascos. Para variar la velocidad de impacto, se modificó la cantidad de pólvora en el cartucho. La velocidad se mide con dos bases ópticas montadas en la trayectoria del proyectil. La velocidad medida se corrige para tener en cuenta la deceleración y conocer la velocidad en el momento del impacto.

El casco está fabricado con fibras de aramida, reunidas en capas y posteriormente prensadas para dar forma al casco (figura 1). Es el actual casco de servicio del Ejército belga y es similar a numerosos cascos usados en diferentes ejércitos. La calota tiene tres perforaciones (2 laterales y 1 posterior) para acomodar el sistema de amortiguación necesario. Este sistema consiste en numerosos cilindros huecos de plástico, con una tira de cuero perimetral que garantiza la distancia necesaria entre el casco y la cabeza. Esta separación sirve para mejorar el confort térmico así como poder disminuir la fuerza que llega al usuario durante el impacto.

Figura 1. Casco ensayado.

Figura 2. Cabeza con arcilla Weible.

2.1. Cabezas de maniquí

2.1.1. Cabeza de arcilla del ejército de EE. UU.

Esta primera cabeza es una modificación de la propuesta en la norma NIJ 0106.01 (figrua 2). Esta norma se encuentra derogada y en trámites de revisión, pero ofrece una guía clara para realizar los ensayos balísticos sobre cascos. La cabeza consta de 4 pétalos que dejan un hueco interior, donde se introduce el material testigo. Se ha rellenado con arcilla Weible definida en la norma VPAM [8].

Después de cada impacto, el casco se retira cuidadosamente, y se mide la indentación producida por el impacto. Esta se mide en el punto más profundo en dirección ortogonal a la superficie, según el criterio del operario.

A pesar de que este sistema fue diseñado y creado para medir la indentación, existen diferentes problemas relacionados con esta cabeza que puede afectar a la medida final. Uno de ellos es la variabilidad de la plastilina [10], o la posibilidad de que los pétalos de aluminio interaccionen con el casco y reduzcan su deformación. Esta posibilidad se ha controlado viendo que la indentación de la plastilina no llegue hasta los laterales o que no hayan quedado marcas en el casco del maniquí.

2.1.2. Ballistic Load Sensing Head form

La segunda cabeza, *Ballistic Load Sensing Head form*, (BLSH), está producida por «Biokinetics». Este sistema consiste en una cabeza de maniquí equipada con dos conjuntos de sensores de fuerza, uno en cada lateral (figura 3). Para medir las fuerzas frontales y laterales hace falta otra cabeza adaptada. Estos sensores permiten medir la fuerza soportada por la cabeza durante un impacto balístico. Una almohadilla de goma simulando la piel cubre los sensores. Este sistema fue diseñado para simular el comportamiento de una cabeza humana [11].

Figura 3. Ballistic Load Sensing Head form.

2.2 Proyectiles

Los proyectiles 9 x 19 mm FMJ pesan 7,9 g. Este tipo de munición es muy corriente y se refieren a ella en diversas normas y organismos, como VPAM, NIJ o *Home Office Scientific Development Branch* (HOSDB) [4, 12 y 13]. Este proyectil consiste en plomo reforzado con una camisa de latón. Para los ensayos, la velocidad de impacto se ha variado entre 280 y 380 m/s modificando la carga de pólvora.

3. Procedimiento de ensayo

El maniquí portando el casco se sitúa y alinea enfrente de la boca del arma, tal y como se explica en la norma NIJ 0106.01. Se han ensayado veintiún cascos, habiéndose disparado cada uno de ellos dos veces, una en cada lateral. Doce cascos fueron ensayados con la cabeza de arcilla y nueve con la BLSH, sumando un total de 41 disparos válidos (tabla 1).

	Derecha	Izquierda
Arcilla	12	11
BLSH	9	9

Tabla 1. Número de ensayos

Primero se disparó en el lateral derecho y posteriormente en el izquierdo. Después de cada impacto, los cascos fueron retirados de la cabeza. Para el caso de la cabeza de arcilla, se midió la indentación y se volvió a nivelar la arcilla después de cada impacto. En el caso de la BLSH, se dispararon en un lateral de todos los cascos y después se modificó el sistema para poder disparar en el otro lateral.

4. Resultados y discusión

4.1. Cabeza de arcilla del Ejército de EE. UU.

Los valores medidos de la indentación se muestran en la figura 4. Los datos muestran una cierta dispersión y se podría deducir que es necesario analizar las 2 poblaciones por separado, los impactos en la parte derecha e izquierda. Con lo que se ha realizado un análisis estadístico, que indica que los resultados pueden ser caracterizados por una única distribución normal.

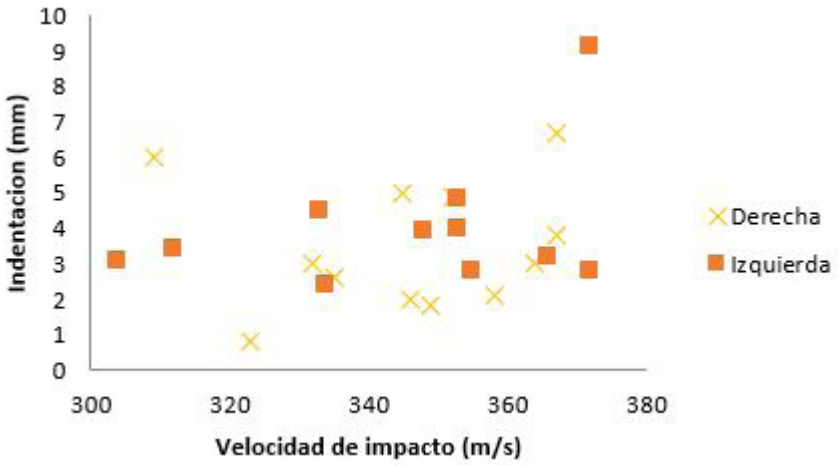


Figura 4. Indentación.

Esta distribución indica que el valor de indentación no está relacionado con la velocidad de impacto, ya que la regresión lineal es prácticamente horizontal. El hecho de poder analizar los datos normalizados permite la comparación entre ellos según diferentes categorías. En los siguientes gráficos se muestra la validez de usar la misma distribución para las dos posiciones de impacto (figura 5).

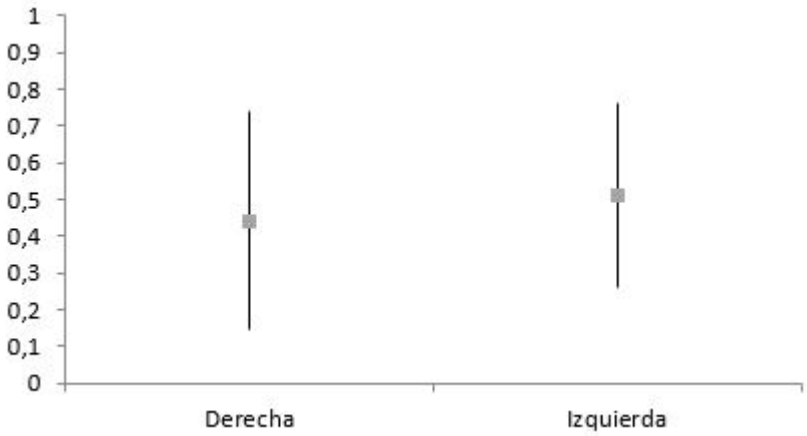


Figura 5. Comparación de las indentaciones normalizadas según las posiciones.

Sin embargo, si se agrupa para los distintos cascos se puede ver que hay una influencia entre cada casco (figura 6).

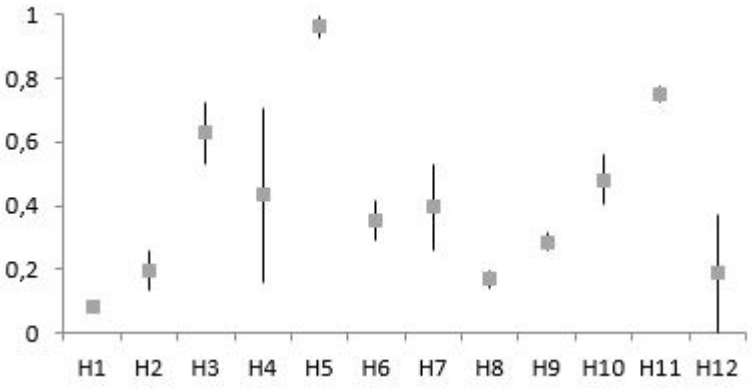


Figura 6. Comparación de las indentaciones normalizadas según los cascos.

4.2. Ballistic Load Sensing Head form

Los valores de la fuerza medidas con la BLSH se muestran en la figura 7. Gracias a los sensores se puede obtener más datos, como es la duración del impacto. El contacto entre el casco y la cabeza dura alrededor de 1 ms y se alcanza el máximo valor de la fuerza en aproximadamente 0,2 ms.

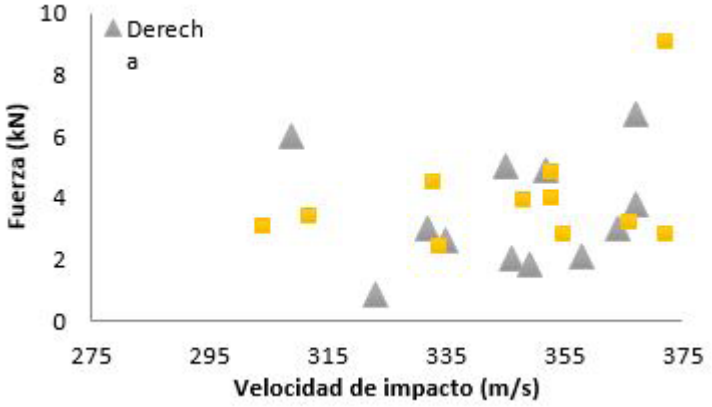


Figura 7. Fuerza.

Después de llevar a cabo un análisis estadístico similar al explicado, se confirmó la existencia de una sola población. Se puede ver así mismo la influencia del casco (figura 8).

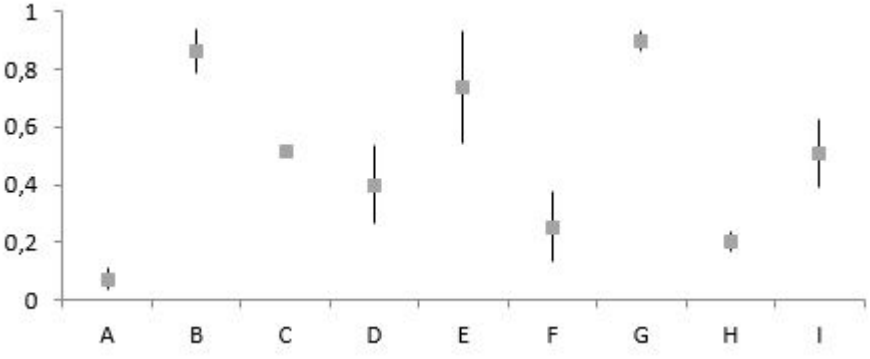


Figura 8. Comparación de la fuerza normalizada según los cascos.

4.3. Energía del impacto

Con el objetivo de comprobar si ambas cabezas producen resultados similares, se ha calculado para ambos sistemas la energía recibida por el maniquí. Al no medirse directamente, es necesario relacionarlo y calcularlo a partir de los valores medidos.

Para la cabeza de arcilla, VPAM propone un sistema de cálculo basado en el volumen del cráter. Como el dato medido ha sido la profundidad de la indentación, se ha estimado el volumen suponiendo que lo ha producido una esfera de 100 mm de diámetro. Este es el valor máximo estimado basado en la zona afectada del casco. El hecho de que la deformación del casco no tome una forma tan voluminosa como la de una semiesfera hace que esto sea una aproximación sobre estime los valores de la energía (figura 9).

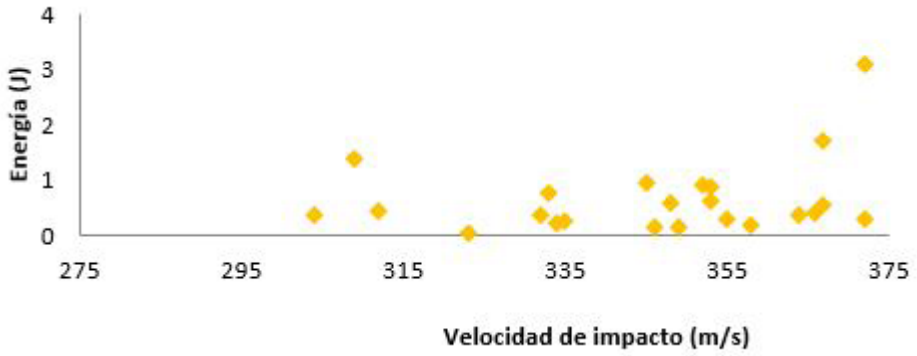


Figura 9. Energía de impacto (arcilla).

La energía que llega a la BLSH se puede estimar a partir de los datos que esta es capaz de medir. Se ha optado por dar valores máximos y mínimos en las aproximaciones necesarias. La superficie del casco afectada, basada en inspección visual, se aproxima a un círculo de 100 mm de diámetro. Este valor se ha considerado como máximo para los cálculos. Para el mínimo se ha optado por un círculo de 9 mm de diámetro que coincide con calibre del proyectil utilizado. A pesar de que la superficie de contacto no se sabe con certeza, tiene que estar dentro del rango indicado. A partir de la densidad del casco, se puede calcular la masa del casco afectada. Si se divide entre el momento entre esta masa, se puede estimar la velocidad de la deformación. Al tener la masa y la velocidad de la deformación, se puede obtener la energía transmitida a la cabeza (figura 10).

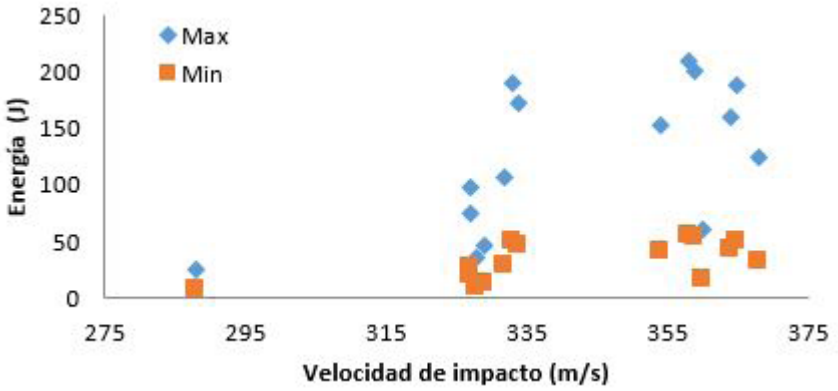


Figura 10. Energía de impacto (BLSH).

Los valores de energía ofrecidos por los dos tipos de cabeza presentan mucha disparidad, haciendo necesario profundizar sobre la metodología de ensayo. La divergencia de los datos imposibilita extraer conclusiones claras. Este hecho hace que sea necesario explorar más acerca de los criterios de lesión

que puede sufrir el portador de un casco, así como la implementación de criterios que hagan posible la existencia de un maniquí que ofrezca resultados confiables.

5. Conclusiones

Se ha ensayado una serie de cascos del Ejército belga frente a un impacto con un proyectil 9 x 19 mm a diferentes velocidades. El evento se ha medido con dos tipos de cabezas. En la primera es posible medir la indentación en la arcilla, y en la segunda, se puede medir la fuerza recibida. La primera cabeza concluye que los impactos tienen una baja energía cinética, mientras que la segunda mide valores entre uno y dos órdenes de magnitud más elevados que el anterior maniquí.

Esta discrepancia hace que sea necesario un estudio más profundo sobre los umbrales de lesión e indicadores útiles que sean fácilmente mesurables para poder mejorar los diseños de los cascos y tener certeza sobre su seguridad.

Agradecimientos

Este estudio se ha realizado gracias al centro de investigación «DYMASEC – DYnamic MAterial Behaviour and SECurity applications» de la «Royal Military Academy» (Bruselas, Bélgica) y financiado por el «Department for Scientific and Technological Research of Defence» de las Fuerzas Armadas belgas (estudio DY-10).

Referencias

1. *NATO. STANAG 2920 - Procedures for the evaluation and classification of personal armour- Bullets and fragmentation threats. 2012 Nov.*
2. *Rafaels KA, Cutcliffe HC, Salzar RS, Davis M, Boggess B, Bush B, et al. Injuries of the Head from Backface Deformation of Ballistic Protective Helmets Under Ballistic Impact. J Forensic Sci. 2015 Jan 1;60(1):219–25.*
3. *Carr DJ, Lewis E, Horsfall I. A systematic review of military head injuries. J R Army Med Corps. 2017 Feb 1;163(1):13.*
4. *Law Enforcement Standards Laboratory of the National Bureau of Standards. Ballistic Resistant Protective Materials - NIJ Standard 0108.01. National Institute of Justice. 1985.*
5. *National Institute of Justice. NIJ Standard-0101.06 Ballistic Resistance of Body Armor. Law Enforcement Standards Laboratory of the National Bureau of Standards. 2008 Jul.*
6. *National Institute of Justice. NIJ Standard-0101.04 Ballistic Resistance of Personal Body Armor. Law Enforcement Standards Laboratory of the National Bureau of Standards. 2000 Sep.*
7. *Hanlon E, Gillich P. Origin of the 44-mm behind-armor blunt trauma standard. Mil Med. 2012 Mar;177(3):333–9.*
8. *VPAM. VPAM HVN 2009 Bullet-resistant helmet with visor and neck guard. 2010.*
9. *Ministerio de Defensa de España. NME-2786 Requisitos técnicos para la homologación del casco de combate. 2013.*
10. *P.L. Gotts. Personal armour testing versus small arms ammunition when the test standard doesn't fit. Problems of mechatronics armament, aviation, safety engineering. 2015 Feb.*
11. *Franklyn M, Lee PVS. Military Injury Biomechanics: The Cause and Prevention of Impact Injuries. CRC Press; 2017. 718 p.*
12. *VPAM. VPAM APR 2006 General basis for ballistic material, construction and product testing. 2009.*
13. *Croft J, Longhurst D. Body Armour Standards for UK Police. HOSDB. 2007.*

Desalinizadoras potabilizadoras autónomas de tamaño reducido

Bordas Rubies Salvador*, Rubio Valladares Carlos

* J. Esteller S.L, Polígono Industrial Molí d'els Frares, calle C, n.º 34, 08620 Sant Vicenç dels Horts, SB, sbordas@esteller.com, SB.

Resumen

Relacionado en: Área 4/4.1. Sistema combatiente/ MT4.1.3 Confort y ayudas a la movilidad.

La consecución de agua potable para estancias prolongadas se puede convertir en un elemento crítico de gestión, que se acostumbra a resolver mediante la instalación de sistemas de purificación de agua a gran escala o el suministro con cubas. Pero estas soluciones no son siempre factibles, debido al volumen de efectivos desplazados o a la imposibilidad de recibir el suministro.

Para las situaciones en que las circunstancias impiden las soluciones anteriores –escaso número de efectivos, corta duración de la misión o imposibilidad de transporte de cubas– la disponibilidad de agua potable se convierte en un problema. Es necesario entonces dotarse de recursos para aprovechar la posible existencia de agua salada, salobre o no potable. La falta de energía eléctrica es también un elemento a tener en cuenta.

Ante esta problemática se necesita un sistema eficiente, desplazable, de muy poco consumo energético y que proporcione agua de boca suficiente desde cualquier punto de suministro. Existen sistemas fiables que desalinizan y potabilizan la cantidad de agua suficiente para beber y cocinar, de fácil manejo y transporte seguro. La versatilidad de estos sistemas se debe a la posibilidad de conseguir energía de fuentes alternativas –batería de vehículos, eólica, solar– además de la energía eléctrica y a la vez conseguir un caudal de agua potable suficiente tanto para beber como para cocinar.

El uso de estos sistemas de potabilización está especialmente indicado para campamentos de corta duración, así como para misiones de actuación rápida. Además, estos sistemas están indicados para misiones humanitarias en desastres naturales, donde se requiere un rápido despliegue de tropas o personal para atender a la población de la zona afectada y asegurar el suministro de agua potable.

Palabras clave

Desalinización, potabilización, purificación, osmosis, agua, virus, bacterias, infecciones, filtrado.

1. Introducción

Relacionado en: Área 4/4.1. Sistema combatiente/ MT4.1.3 Confort y ayudas a la movilidad.

El cuerpo humano precisa para su correcto funcionamiento de la ingesta de 2,5 litros de agua al día (+/- en función del esfuerzo físico y masa corporal) esta cantidad básicamente la cubrimos mediante la ingesta de agua, comida y metabolismo corporal, de esta cantidad 1,2 litros aproximadamente corresponden a agua de boca [1].

En el ámbito militar en misiones de comando, vigilancia, apoyo logístico en zonas apartadas o en actuaciones rápidas en desastres o catástrofes naturales o provocadas, precisamos tanto agua para los grupos de apoyo como para la población afectada.

Tabla 1. Tiempos estimados de supervivencia en función del agua disponible

Tiempo estimado de supervivencia en estado de reposo			
Temperatura	Sin agua	Con 2 litros	Con 10 litros
50	2/5 días	3/5 días	4/6 días
30	7 días	6/8 días	14 días
20	12 días	15 días	23 días
Tiempo estimado de supervivencia caminando durante la noche			
50	2 días	2/3 días	3/5 días
30	4 días	5 días	5/7 días
20	9 días	10/15 días	13/18días

En cuyo caso posiblemente no tengamos la seguridad de disponer de agua potable para uso inmediato, pero sí disponer de agua marina, salobre o de acuíferos sin garantías sanitarias, precisamos de sistemas de potabilización eficientes, de fácil manejo, resistentes y cuya producción o caudal de agua sea suficientemente interesante.

Aquí es donde entra la desalinización y potabilización por osmosis inversa (en adelante, O.I.) puede conseguir aunar estas necesidades.

2. Desarrollo

La osmosis se genera por transvase de fluidos separados por una membrana semipermeable desde la solución de menor concentración a la de mayor concentración.

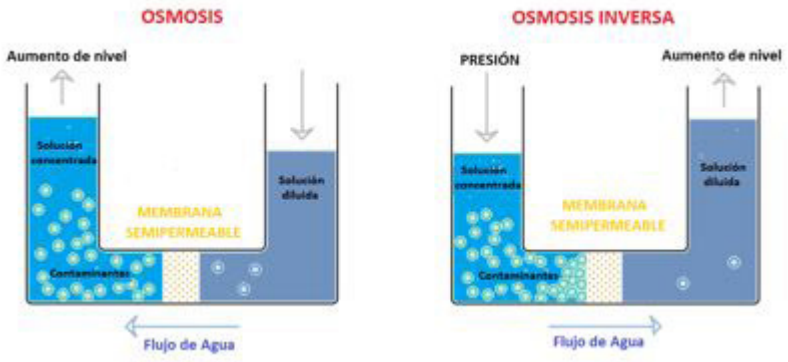


Figura 1. Ósmosis y ósmosis inversa.

La O. I. se produce revertiendo la osmosis mediante la aplicación de presión en el lado de mayor concentración consiguiendo que parte de las moléculas del fluido de mayor concentración (solución hipertónica) al de menor concentración (solución hipotónica) a través de una membrana semipermeable.

Requerimientos:

1. Un sistema de potabilización eficiente.
2. De fácil manejo y mantenimiento. Resistente. Transportable. Autónomo. De bajo consumo.
3. Una producción o caudal de agua sea suficientemente interesante.

En resumen, una miniaturización eficiente de una planta desalinizadora industrial.

La producción de agua desalinizada y potabilizada mediante O.I. en principio requiere de grandes instalaciones o maquinaria transportables de grandes dimensiones que requieren aplicar una gran presión (del orden de 15/30 atmósferas), que no son efectivas para los usos que requerimos, así como de un suministro eléctrico que en diversas ocasiones no tendremos a nuestro alcance, debemos conseguir reducir esta maquinaria a formatos transportables y autosuficientes y que trabajen a menores presiones (entre 3 y 5 atmósferas), lo que también nos comportará menor producción y mayores desechos ya que aprovecharemos del orden del 10 % del agua tratada.

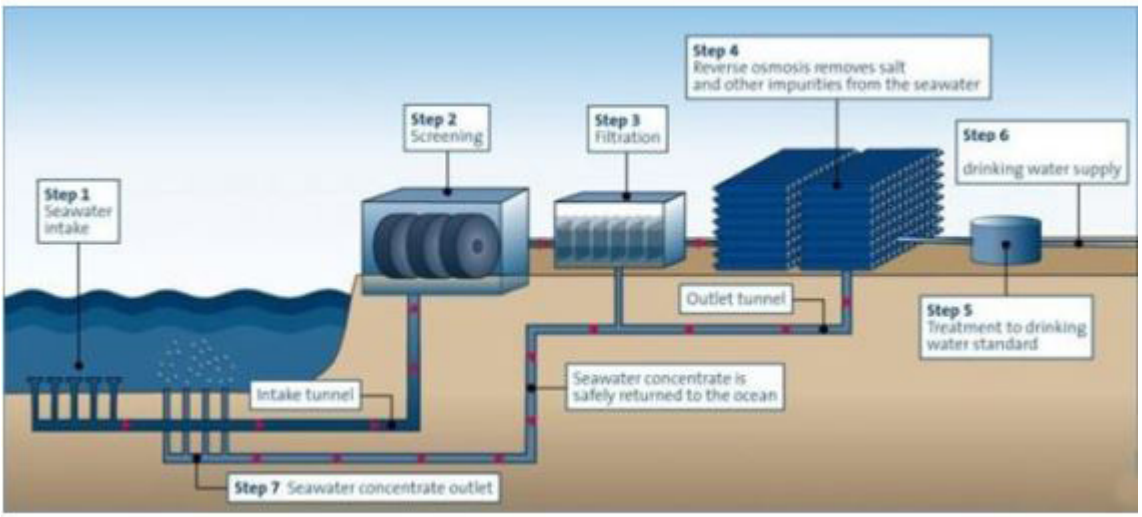


Figura 2. Esquema planta industrial de tratamiento mediante O. I. [2].

Para el caso que nos ocupa, la membrana debe de tener una porosidad en función de los resultados que queramos conseguir, que en nuestro caso es evitar el paso de moléculas o partículas de tamaño superior a la molécula de agua, con lo que conseguiremos además de impedir el paso de las moléculas de cloruro

sódico el de otras moléculas, partículas o microorganismos que puedan ser nocivas para la salud. Debemos aceptar que, ante la dificultad de conseguir membranas con una porosidad perfecta, siempre existirá un pequeño porcentaje de traspaso de algunas de estas moléculas a la solución hipotónica, que en el caso de cloruro sódico puede ser alrededor de un 4 % del existente en la solución hipertónica.

Tabla 2. Retención de partículas según sistemas de filtrado

Retención de partículas sistemas	**Partículas retenidas**				**Tipo de partículas**
Microfiltración					**Partículas en suspensión**
Ultrafiltración					**+ Macromoléculas**
Nanofiltración					**+ Sales monovalentes**
Osmosis inversa					**Agua**

Podemos convenir que las características de las membranas que usemos y en función de la porosidad de las mismas podemos buscar resultados o requerimientos que nos interesen, asimismo el agua una vez osmotizada queda libre de sales y minerales que pueden ser necesarios para el organismo humano (su consumo continuado podría causar su escasez pudiendo generar problemas metabólicos), así como falta de sabor. Estos problemas se resuelven tratando el agua osmotizada añadiéndoles sales y minerales apropiados a las necesidades de consumo.

Además de sales y minerales mediante la O.I. también elimina otros elementos, entre ellos (ver tabla 3).

Tabla 3. Índices de rechazo de la O.I.

Virus	**+99 %**
Insecticidas	**97 %**
Detergentes	**97 %**
Herbicidas	**97 %**
% TDS	**95-99 %**

Para aumentar la productividad así como espaciar el mantenimiento y alargar la vida útil de las membranas debemos realizar un pre filtrado del agua antes de proceder con el procedimiento de O.I.

Debido a que en los tiempos actuales, donde las tecnologías evolucionan a ritmos inalcanzables para la mayoría de la población, no todos los usuarios de materiales de alta tecnología podrían manejarlo, realizar su mantenimiento o repararlo, y en el caso que nos ocupa deberíamos de acompañarnos de técnicos especializados.

Así pues, desarrollamos unas desalinizadoras por medio de O.I. simples con poca o nula electrónica y con materiales de repuesto fáciles de encontrar en lugares remotos.

Podemos estudiar dos tipos de desalinizadoras:

Autónomas con producción de más de 500 litros al día, para grupos reducidos de personas e individuales manuales para uso de supervivencia individual.

Desaladoras individuales manuales para uso de supervivencia

El bombeo manual que debe proporcionar presión al sistema, requiere un esfuerzo considerable y la producción de agua alimentaria es muy bajo, estaríamos hablando sobre 1 litro/ hora.

Figura 3. Desalinizador de supervivencia.

Para aligerar dicho esfuerzo se diseñó un sistema de recuperación de energía *Energy Recovery System* que nos permite producir agua con mucho menos esfuerzo ya que nos permiten recuperar hasta un 60 % de la presión producida durante el bombeo y aplicarlo como ayuda en la impulsión del émbolo de la bomba.

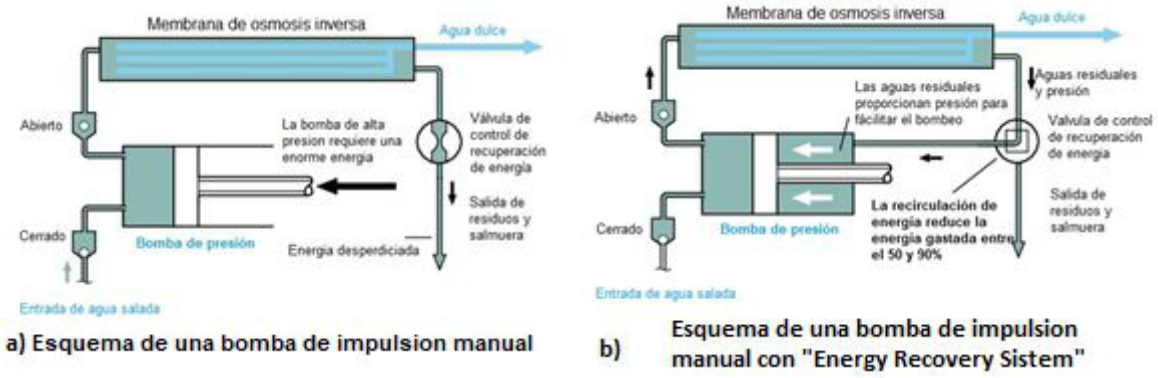


Figura 4. Esquema de bombas de impulsión manual.

Características principales:

- Compacto y ligero
- Caudal 0,89 l/h +/- 15 %
- Rechazo de sal: 98,4 % (min. 95,3 %)
- Peso: 1,13 kg
- Medidas: 12,7 x 20,3 x 6,4 cm.
- Para balsas de supervivencia y equipo individual de emergencia y supervivencia
- Usado por ejércitos a escala mundial
- NATO #4610013136085

Desalinizadoras autónomas con producción de más de 500 litros al día, para grupos reducidos de personas

En casos de emergencias por desastres naturales, intervenciones humanitarias, campos de refugiados, etc., las unidades de primera intervención requieren con inmediatez de agua potable con un caudal interesante y fácil de transportar, posteriormente ya nos llegarán en plazos de 24 a 48 horas camiones cuba o maquinaria pesada de producción.

Así pues el desarrollo de una pequeña planta de desalinización y potabilización de aguas debe de cumplir estos objetivos.

a) Desaladora

b) Equipo de O.I. alimentado con energia solar, produccion entre 500 y 750 litros en 12 horas

Figura 5. Equipos de desalación y potabilización mediante O. I.

Desarrollaremos, pues, un sistema de osmosis inversa de pequeño tamaño que sea eficiente y que trabaje a baja presión (ya que a mayor presión, mayor consumo energético). Asimismo, diseñamos una bomba de presión eficiente y de muy bajo consumo, dotamos al sistema de un pre filtro, que nos ayudará a disminuir la obturación de la membrana y prolongar su plazo de mantenimiento, y también hemos de poder adaptar el sistema a una energía de bajo voltaje ya que esta es más fácil de obtener y ensamblar todo este material más sus accesorios en un embalaje resistente fácilmente transportable.

La parte más importante dentro del equipo y que nos marca la calidad del agua tratada es la membrana, ella nos marcará la diferencia a la hora de garantizar el resultado del equipo, usaremos una membrana de poliamida cilíndrica colocado dentro de un tubo de composite.

Figura 6. Conjunto de membrana y bomba de impulsión.

Según las necesidades que pretendamos atender en cuestiones de caudal de producción y en función de las necesidades de uso (que pueden ser más difíciles por la estructura del terreno donde nos ubiquemos), podemos acoplar una o dos bombas para el funcionamiento del conjunto.

Con una única bomba, esta se ocupa tanto de la succión del agua a osmotizar como de generar la presión de trabajo, usando 2 bombas dispondremos de un sistema más efectivo (también más complejo) con una bomba de succión de la fuente de suministro y una bomba de impulsión que nos sirva para la generar la presión de trabajo.

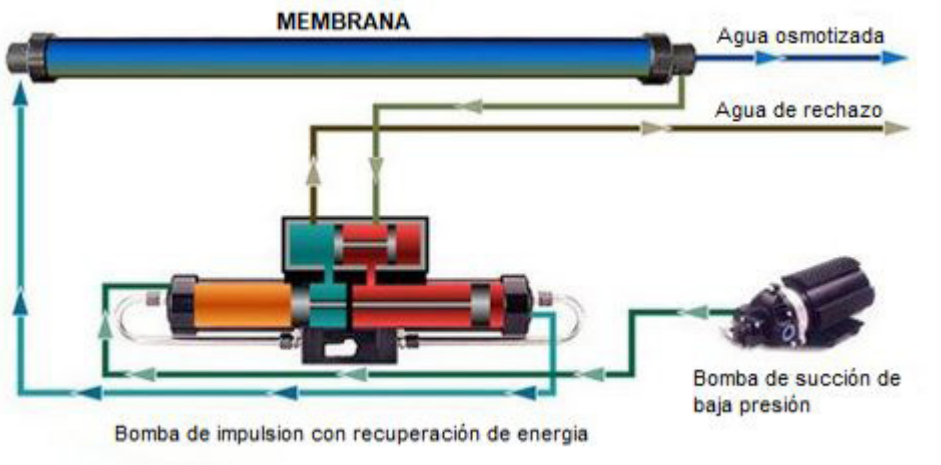


Figura 7. Esquema del sistema de recuperación de energía con «Energy Recovery System».

Debido a las condiciones de uso de estas unidades, es necesario instalar un sistema de recuperación de energía para ayudar a la bomba de presión, con lo cual aprovecharemos la presión del agua de rechazo para ayudar en la impulsión del cilindro de dicha bomba lo que nos reportará reducción de la energía necesaria para el funcionamiento con el consiguiente ahorro de energía.

Acoplamos al equipo dos sistemas de filtrado en el sistema de alimentación de agua para eliminar impurezas que puedan perjudicar el funcionamiento de la bomba y obturar la membrana reduciendo el tiempo de mantenimiento.

El equipo estará dotado de fuentes de alimentación alternativa tanto para corriente alterna 110/220 y de corriente continua de 12/24 voltios y también conectores a sistemas de paneles solares o aerogeneradores.

Si prevemos el uso de paneles solares acoplaremos una batería y su cargador, para apoyarnos en momentos de poca exposición solar y que a la vez nos ayudará en el arranque del equipo.

Usaremos conexiones simples y elementos de control analógicos ya que no requieren personal especializado en electrónica y que se pueden conseguir con más facilidad.

Instalaremos las distintas partes del equipo junto con los tubos de conexión, succión y desecho en una maleta roller con grado de resistencia militar.

Tabla 4. Especificaciones básicas equipos

ALIMENTACIÓN	12 Voltios C. C. 10 Amp. 110-220 C.A. Paneles Solares
Producción	De 30 a 60 litros/hora
Vida útil de la membrana	De 8 a 10 años
Mantenimiento bomba	2.000 a 2.500 horas
Peso	35 a 65 kilos
Medidas	70 X 52 X 40 cm

Estos equipos transportables y cómodos en su manejo que nos producen un buen caudal de agua, aprovechan un 10 % del agua tratada, el resto (agua de rechazo) se devuelve al medio natural o incluso se puede reciclar, la capacidad de succión de la bomba es de +/- 3 atmosferas, con lo cual podríamos elevar el agua de un pozo con esta profundidad como máximo o succionarla del acuífero hasta esta altura.

Recalcaremos que no se eliminan metales pesados no ionizados, y sí que separamos eficazmente sales, productos químicos orgánicos, insecticidas, pesticidas, parásitos, quistes, bacterias y virus.

3. Conclusiones

Se ha conseguido desarrollar sistemas de desalinización y potabilización de aguas que se adaptan desde la supervivencia en condiciones extremas al suministro de agua de boca en condiciones extremas de supervivencia, aportación de agua de boca en episodios de catástrofes naturales y también para unidades militares o cuerpos de seguridad desplazados en zonas con escasos o inseguros suministros de agua potable, pudiendo obtener con estos equipos aguas libres de sal, elementos químicos, residuos orgánicos, bacterias y virus.

Agradecimientos

A Carlos Rubio Valladares (técnico superior en Salud Ambiental). Al equipo de J. Esteller, a Katadyn Group Worlwide y a la organización del congreso por la colaboración y ayuda prestada.

Referencias

1. *Necesidades de agua y nutrición por Francisco Grande Covián, publicado por la Fundación Española de la Nutricion.*
2. *magen de protecwater.com*
3. *Imagen de saudiexpatnews.com. Marcelo Tedesco, Fuente: Airelibredigital.com. Katadyn Group Worlwide (consideraciones sobre el agua).*

Dispositivo ultraligero de evacuación de bajas en ambiente táctico e incidentes con múltiples víctimas

Gómez Macanás, G.J.[1,*]; Rodrigo Arrastio, C.F.[1]; Pérez Rodriguez, C.A.[1]; López Alcañiz, A.[1]; Barcina Hijosa, C.[1] y Martínez Marín, M.[1]

1 UMAAD Zaragoza. Base Aérea de Zaragoza. Email: secretariaumaadzaragoza@ea.mde.es

* Autor principal: Gómez Macanás, GJ. Correo electrónico: ggommac@mde.es

Resumen

La recogida y extracción del combatiente de una zona hostil cuando ha sido herido en combate, es una prioridad para iniciar el proceso de evacuación sanitaria y el transporte del herido, en el menor tiempo posible y por el medio más adecuado, a una instalación de tratamiento sanitario.

El primer interviniente tiene en este caso un papel fundamental. Se pretende que cada combatiente porte en su dotación de combate su propia camilla ligera de extracción para que esté disponible inmediatamente después de que se produzca la lesión y aparezca la necesidad de transporte a zona permisiva fuera del alcance del enemigo.

En ocasiones los medios para realizar esta evacuación son pesados u ocupan gran volumen, y no pueden ser portados por todos los combatientes. En otras ocasiones se pretende que los combatientes improvisen métodos de transporte poco seguros y rápidos. Por ello el disponer de un dispositivo que pueda ser transportado y utilizado por el personal en cualquier momento se considera importante para facilitar el traslado de un herido.

Con este mecanismo que proponemos no sería necesario esperar la llegada del equipo sanitario facultativo hasta el lugar en que se encuentra el herido, sino que el resto de combatientes aproximen al herido con este dispositivo hasta la zona permisiva donde esperarían el equipo sanitario. El uso de este método propuesto de transporte en combate es extensible a otros escenarios posibles como el urbano, alta montaña o el interior de vehículos.

El contar con un material de gran resistencia y con la posibilidad de absorción de líquidos, que puede retrasar la aparición de hipotermia, en caso de demora de la evacuación, puede ayudar a que el paciente llegue en mejores condiciones al centro sanitario, mejorando el pronóstico del mismo.

Hay que saber que este método que proponemos es novedoso, no existe en ningún otro ejército de otro país, supondría una solución muy atractiva y operativa para el desarrollo de las operaciones dando velocidad y seguridad en el movimiento de heridos desde el punto de la lesión hasta la zona permisiva donde esperaría el equipo sanitario.

Palabras clave

Transporte, interviniente, camilla, herido, combatientes.

1. Introducción

Las Fuerzas Armadas se despliegan para realizar su cometido en distintas zonas del mundo. Todo combatiente cuando se despliega fuera de territorio nacional necesita del apoyo de un equipo de asistencia sanitaria, que en función de las necesidades estratégicas y tácticas será de mayor o menor envergadura (célula de soporte vital avanzado, ROLE 1, ROLE 2). El equipo mínimo de asistencia sanitaria estaría conformado por un oficial médico, un oficial enfermero y un auxiliar sanitario.

Todo combatiente necesita recibir instrucción sanitaria de cuidados de autoayuda y socorro a las víctimas que se produjeran en cualquier escenario [1]. Una de las partes de esta instrucción sanitaria trata de enseñar los métodos de transporte de heridos en zona de combate, y para ello se trata cómo transportar con o sin ayuda de material. En el transporte sin ayuda de material se enseña con medios de circunstancias como por ejemplo tableros o ramas de árboles, material poco seguro y muy poco fiable. Este tipo de instrucción crea en el combatiente la sensación de inseguridad al no disponer de material más fiable y accesible para el transporte de la víctima, ya que depende de encontrar o no materiales de circunstancias para improvisar un soporte de transporte mínimamente seguro y fiable.

Todo combatiente que se despliegue a zona de operaciones se le dota del BIC (botiquín individual de combate) que contiene lo necesario para que se le trate de hemorragia externa, traumatismos torácicos abiertos, pequeñas quemaduras y prevención de la hipotermia. En la actualidad no se dispone de ningún elemento pequeño y fiable que quepa en el BIC que sirva para que el personal más cercano iniciara el transporte de la víctima hacia el equipo de asistencia sanitaria.

Las camillas OTAN suelen estar a disposición del equipo sanitario, que normalmente se encuentra en una posición más alejada de la presencia del enemigo o fuego hostil, lo que conlleva un retraso en el inicio de la asistencia sanitaria por parte de los facultativos porque deben llegar hasta el lugar donde se encuentra el herido.

Este método que presentamos mejora de forma novedosa e innovadora el trabajo del equipo sanitario. El dispositivo lo hemos denominado DULET (dispositivo ultraligero de evacuación táctica).

En los escenarios actuales de lucha contra el terrorismo vemos que el enemigo pretende el mayor número de víctimas posibles. Este escenario que satura a los equipos de asistencia sanitaria civiles o militares se denomina escenario de múltiples víctimas. En la actualidad en estos escenarios, no se dispone de este elemento de transporte de víctimas que mejoraría el inicio de la asistencia sanitaria, mejorando por ello el pronóstico de las víctimas.

Objetivos

1. Rescate en combate.

Con la incorporación de la camilla DULET en el BIC de cada combatiente se disminuyen los tiempos de inicio de tratamiento por parte del personal facultativo, además de reducir la exposición del equipo sanitario al fuego enemigo.

Proponemos incorporar la camilla DULET en cada BIC de cada combatiente para que exista un material de transporte inmediatamente accesible y fiable. El personal más cercano a la víctima sería el encargado

de colocar al herido sobre su camilla DULET, que portaría en el interior de su BIC igual que su propio torniquete.

Este mismo personal extraería de la zona de combate al herido hacia una ubicación más segura. En esta zona segura o permisiva se encontraría el equipo sanitario que se encargaría de tratarlo e iniciar su evacuación médica si fuera necesario [2].

2. Dispositivo DULET en escenarios de múltiples víctimas.

En la actualidad se presentan a menudo escenarios en los que se pretende crear el mayor número de víctimas posible y saturar la asistencia sanitaria.

A nivel organizativo, táctico y práctico, creemos que incorporar el dispositivo DULET en grandes cantidades a estos escenarios supondría una ventaja para los equipos sanitarios ya que se conseguiría mayor velocidad en la extracción de las victimas del incidente y puesta en estado de evacuación de las mismas.

Las dimensiones reducidas del dispositivo DULET hacen que se puedan almacenar y transportar en grandes cantidades en un espacio muy reducido.

Actualmente no se dispone de este dispositivo para estos escenarios.

2. Desarrollo

Descripción del material

Es una sábana desechable ultraligera para traslado y cobertura, impermeable y absorbente. Mantiene seco al herido para reducir su pérdida de calor, protege las camillas y mesas quirúrgicas para evitar contaminación cruzada. Puede ser utilizada para trasladar, transferir o mover a heridos de cualquier peso.

Conformidad	Fabricante
Producto de Clase I no estéril. Es conforme a EN 13795. Auto certificación CE según directiva europea 93/42/ECC.	Erabaki SLL Av. San Emeterio Cizur menor (Navarra)

Materiales utilizados para la fabricación del dispositivo DULET

- 100% libre de látex
- Capa superior blanca en contacto con el paciente: polipropileno 100 % hidrófilo de 20 gr/m^2

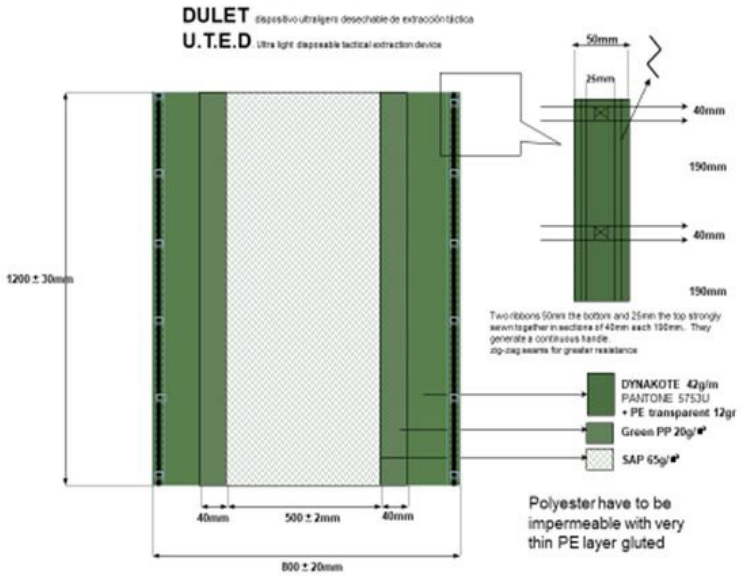


Figura 1. Presentación y medidas.

- Capa intermedia de S.A.P. poliacrilato sódico densidad promedio de 65 g/m^2 ± 5 g entre dos láminas de tissue de celulosa de 5 g
- Capa inferior verde de poliéster de 42 g/m^2
- Peso aproximado del producto listo para su uso 120 g.
- Asas de tracción de poliéster de cinta 144 decitex de 50 mm cosida a la sabana con nylón negro de 150 dtex. Sobre esta una segunda de 25 mm cosida 5 cm dejando tramos de 19 cm libres.

Presentación y medidas

- Sábana de 120 x 80 cm con banda central absorbente de 50 cm x 120 cm
- Tolerancias: medidas ± 1cm/m. Peso ± 10 %/pieza
- Capacidad de absorción ≥2.000ml/m^2
- Resistencia teórica de tracción 220 kg
- Empaquetado individual al vacío para portar en la mochila de combate.

Ejercicios de prueba del dispositivo

La UMAAD-Zaragoza ha probado la camilla DULET en varios ejercicios:

- Con alumnos de la ETESDA (Escuela de Técnicas de Seguridad y Defensa del Ejército del Aire de la Base Aérea de Zaragoza) bajo un supuesto táctico.
- Con miembros de Cruz Roja española en el entorno del Seminario QUIREX 17 desarrollado en las instalaciones de la UMAAD-Zaragoza, bajo un supuesto de atención a múltiples víctimas.

2.1. Ejercicio táctico FIBUA con sargentos alumnos del Ejército del Aire

El ejercicio FIBUA fue desarrollado por los sargentos alumnos de la ETESDA, consistente en planeamiento, dirección y ejecución de operaciones especiales en entorno urbano.

La UMAAD Zaragoza se encargó de instruir al alumnado en la asistencia sanitaria en combate, además de instrucción de uso de la camilla DULET para cada alumno.

El entorno del ejercicio se desarrolló en la zona del CENAD San Gregorio de Zaragoza, conocida como «poblado afgano» por disponer de un complejo urbano simulado. Durante este ejercicio se realizaron 7 extracciones de personal herido. Cada combatiente fue extraído por sus propios compañeros de la zona hostil hasta la ubicación del personal sanitario con su propia DULET. El personal facultativo de la UMAAD Zaragoza adoptó el rol de primer interviniente para estudiar y conocer desde el interior del ejercicio táctico las dificultades reales de utilización de la DULET. En este entorno de combate urbano con presencia de enemigo hostil, se retrasa la entrada del personal facultativo hasta la ubicación del herido debido al alto grado de peligro. Sin embargo, al disponer cada herido de su propia DULET en su BIC, fueron los propios compañeros más cercanos los que iniciaron su transporte hacia el equipo sanitario.

Foto 1. Aérea del poblado afgano CENAD San Gregorio, Zaragoza. Se observan el gran número de edificaciones en las que se realizaron las evacuaciones de heridos. Anillo azul: desarrollo de la maniobra táctica, ubicación de los heridos. Anillo verde: ubicación del equipo sanitario facultativo.

La víctima debe ser colocada sobre la DULET teniendo como referencia la cabeza o casco de la víctima. En la parte superior debe quedar la cabeza de la víctima a la altura de la camilla, sin sobrepasarla.

La parte inferior de la camilla quedará generalmente en la parte media de ambas piernas, a la altura de la mitad de ambos fémures. Una de las características tácticas de la camilla DULET se basa en que al quedar las piernas libres, puede emplearse en el combate urbano en espacios pequeños de difícil acceso, pasillos, habitaciones, subir y bajar escaleras de edificios, meterlo y sacarlo del vehículo.

Foto 2. El herido puede ser colocado sobre la DULET por dos o cuatro miembros del equipo cercano.

Foto 3. El herido es transportado por cuatro miembros no sanitarios. Destacar que la mano libre del personal queda útil para manejar armamento, comunicaciones, etc.

2.2. Ejercicio Seminario QUIREX 2017 con Cruz Roja española

La UMAAD-Zaragoza desarrolla un Seminario QUIREX anualmente con la Cruz Roja española (CRE), en un supuesto de atención a bajas masivas y entorno quirúrgico. Bajo este supuesto, el personal de la UMAAD-Zaragoza instruyó al personal de CRE en el uso del DULET para el manejo de múltiples víctimas. El personal de CRE expresó que este dispositivo mejora la extracción de las víctimas hacia zona segura.

Foto 4 y 5. Personal de CRE transportando a las víctimas desde el punto de la lesión hacia zona segura, una vez que los equipos de seguridad han acordonado la escena.

3. Resultados y discusión

En el ejercicio táctico FIBUA hemos comprobado que si los propios compañeros de la víctima inician con la DULET el transporte del herido hacia el equipo sanitario, se consigue menor tiempo de respuesta a la atención sanitaria inicial que si el herido espera a que llegue con seguridad el equipo sanitario a la víctima.

Otro resultado observado es consecuencia del anterior: se aleja el equipo sanitario del área no permisiva o de combate.

En el ejercicio Seminario QUIREX 17 hemos observado que el personal sanitario de ámbito civil (Cruz Roja en este caso) ha manifestado que este dispositivo mejora los tiempos de extracción de las víctimas desde el foco de la agresión hasta la zona de tratamiento y evacuación de las víctimas.

El dispositivo, se encuentra actualmente en fase de estudio para mejorar los resultados obtenidos en los ejercicios realizados hasta la fecha.

4. Conclusiones

- Se pretende que cada combatiente porte en su dotación de combate su propia camilla ligera de extracción para que esté disponible inmediatamente después de que se produzca la lesión y aparezca la necesidad de transporte a zona permisiva fuera del alcance del enemigo.
- Poder disponer de un dispositivo que pueda ser transportado y utilizado por personal no sanitario en cualquier momento se considera importante para facilitar el traslado de un herido. Con este mecanismo que proponemos no sería necesario esperar la llegada del equipo sanitario facultativo hasta el lugar en que se encuentra el herido, sino que el resto de combatientes aproximen al herido con este dispositivo hasta la zona permisiva donde esperaría el equipo sanitario. Este método propuesto de transporte en combate accesible puede utilizarse en otros escenarios.
- Este método que proponemos es novedoso, supondría una solución muy práctica y operativa para el desarrollo de las operaciones dando velocidad y seguridad en el movimiento de heridos desde el punto de la lesión hasta la zona permisiva donde esperaría el equipo sanitario.

Agradecimientos

A todo el personal participante en los ejercicios de la ETESDA y Cruz Roja.

Conflicto de intereses: los autores declaran no tener ningún conflicto de interés ni guardar ninguna relación comercial con la empresa fabricante del dispositivo.

Referencias

1. *NATO-STANAG 2122: Requirement for training in casuality care and basic hygiene for all military personnel.*
2. *Directrices TCCC para personal sanitario: https://www.jsomonline.org/TCCC.php (acceso 3 septiembre, 2018).*

Estudio e implementación de paneles fotovoltaicos en mochilas de logística para consumos de equipos auxiliares

Alfonsin, Victor[1,*], Maceiras, Rocio[1], Nuñez, J.M.[1] y García-Paz, J.M.[1]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar, Marín, Plaza España S/N. valfonsin@cud.uvigo.es (V.A.), rmaceiras@cud.uvigo.es (R.M.), jnunez@cud.uvigo.es (J.M.N), semagarcia2@hotmail.com (J.M.G.P).

* Alfonsin, Victor; valfonsin@cud.uvigo.es (V.A.).

Resumen

El soldado sigue siendo una de las fuentes más importantes de información tanto para la localización, la detección de objetivos, así como para la señalización de estos. Sin embargo, el rango de operatividad y la maniobrabilidad del soldado, se encuentran restringidos por el peso y el volumen que porta en cada una de sus misiones. Una parte importante de este peso procede de las baterías que debe transportar para satisfacer las necesidades de energía de los equipos que porta. Por ello sería de gran utilidad que el soldado pudiera disminuir parte de ese peso, utilizando algunos sistemas de obtención de energía alternativos. El objetivo de este trabajo es el estudio y la implementación de paneles fotovoltaicos en la mochila logística empleada por las unidades del Cuerpo de Infantería de Marina, con el fin de lograr una reducción considerable de peso. Además, y gracias a estos dispositivos, se dotaría al soldado de autosuficiencia energética, lo cual se podría traducir en una ventaja táctica para el soldado durante su misión. Para ello se han instalado una serie de paneles fotovoltaicos de tipo monocristalino en la mochila logística, todo ello incorporando un sistema de adquisición de datos para el registro en continuo de los valores de tensión e intensidad. A partir de estos valores se ha calculado la potencia y la energía generada durante un periodo de maniobras.

Palabras clave

Fotovoltaico, batería, mochila logística, demanda energética, optrónicos.

1. Introducción

Durante las operaciones y los campamentos militares, se consumen grandes cantidades de combustibles fósiles, que se utilizan para la generación de energía eléctrica, para alimentar los equipos que se encuentran en los puestos de mando, y para poder efectuar el mando y control de cada una de las operaciones. El liderazgo, la táctica y los equipos son piezas indispensables para realizar el mando y control. Para realizar estas tareas, se necesitan equipos electrónicos que lo apoyen. Pero debido a la aparición de nuevos equipos, la demanda energética va en aumento en conjunción con el tiempo de duración de las operaciones. Por todo ello, es muy importante el estudio de la energía para las operaciones militares [1]. Las diferentes fuentes de energía que se podrían obtener en una zona de operaciones, dependiendo de la ubicación territorial en que se encuentren, sería principalmente energía procedente del viento, del sol o de la biomasa. Sin embargo, la más abundante y la que siempre se puede encontrar en casi cualquier zona de operación, es la energía solar [2].

La energía solar sería capaz de proporcionar energía, cuando es muy difícil o imposible proporcionarla por el apoyo logístico de las unidades. Por ello, la mayoría de los países están intentando buscar innovadoras técnicas para el aprovechamiento de esta fuente de energía en las misiones. La generación solar *in situ*, evita la dependencia de centrales eléctricas remotas y de los combustibles fósiles. Mantener un sistema que produzca energía solar, con un sistema de baterías de almacenamiento y un generador puede ser la solución que buscan los ejércitos de todo el mundo para poder operar durante periodos de tiempo prolongados sin dependencia de los recursos.

1.1. Necesidad de energía para un soldado de infantería

Dentro de las posibles aplicaciones de la energía solar en operaciones militares, se encontraría el aprovechamiento de este tipo de fuente energética por parte del soldado de infantería. Por ejemplo, las pequeñas unidades o unidades del tipo de operaciones especiales, cuando necesitan moverse desde su campamento base para realizar alguna de las diferentes misiones (localización y detección de cualquier tipo de objetivos), serían susceptibles del aprovechamiento de este tipo de energía.

Con objeto de realizar dichas misiones, tienen que hacer uso de diferentes tipos de sistemas electrónicos, y, por lo tanto, también deberán emplear diversos tipos de baterías. Esto produce una carga física, ya que la quinta parte del peso que transporta son baterías para recargar esos equipos, mermando así sus capacidades operativas. La mayoría de los equipos son casi imprescindibles para poder mantener las comunicaciones con la unidad superior, y poder enviar con ello la información necesaria para realizar su misión. Para aligerar la carga que debe transportar, actualmente se está estudiando la utilización de diversos sistemas fotovoltaicos, los cuales podrían generar la energía necesaria para cargar los diferentes equipos [3].

1.2. Justificación

Aunque en la mayoría de las operaciones militares se utilizan medios mecanizados y aéreos, el soldado sigue siendo de vital importancia para la mayoría de estas. Los medios humanos pueden proporcionar información, de diversos lugares los cuales pueden ser intransitables tanto para vehículos, como ocultos para la observación aérea. Por lo tanto, el soldado sigue siendo la fuente más importante de información tanto para la localización, detección de objetivos, como para la señalización de estos. El rango de operatividad, y la maniobrabilidad del soldado, se encuentra restringido por el peso y el volumen que porta para cada una de sus misiones. Esta carga puede llegar a pesar entre los 50 y 75 kilogramos. Casi el 25 % de este peso, proviene de la gran cantidad de baterías que debe portar para satisfacer las necesidades de energía de los equipos que porta. Muchos de ellos utilizarán diferentes tipos de baterías. Todo ello se traduce en un aumento más que significativo del estrés físico [4].

Por ello sería de gran utilidad que el soldado pudiera disminuir parte de ese peso, utilizando algunos sistemas de obtención de energía. En este trabajo, se estudia el empleo de paneles fotovoltaicos colocados en la mochila logística, como alternativa para la obtención de la energía necesaria para el funcionamiento de los equipos, con la consiguiente reducción considerable de peso y la posibilidad de proporcionar al soldado una autosuficiencia energética en operaciones.

2. Elementos del sistema

2.1. Mochila logística

La mochila logística usada para las misiones del Cuerpo de Infantería de Marina está fabricada por la empresa Altus. Las mochilas están fabricadas con un tejido cuadrille e impermeable, con el fin de evitar que haya algún tipo de contacto entre el agua del mar y los equipos que se encuentren en el interior. La capacidad de carga que posee una mochila de estas características es de 79 litros, lo cual es suficiente para llevar además de los diferentes equipos electrónicos y el equipamiento individual del soldado (tienda, el saco de dormir, ropa de abrigo y las raciones de comida).

2.2. Paneles fotovoltaicos

Para el aporte energético del sistema aquí planteado se han decidido instalar paneles fotovoltaicos del tipo monocristalino en la mochila. Se ha utilizado este tipo de panel porque este tipo proporciona una mayor eficiencia que otros tipos de tecnologías. Se han instalado dos paneles fotovoltaicos de 470 g de peso y de 15 cm de ancho por 15 cm de largo, en la parte superior de la mochila logística. Estos paneles pueden llegar a obtener con unas buenas condiciones de radiación (1.000 W/m^2), hasta una potencia de 7 W. Adicionalmente, en los laterales de la mochila logística, se han instalado cuatro paneles fotovoltaicos (dos en cada lateral), conectados en paralelo. Estos paneles tienen un peso de 210 g y una longitud de 12 cm de ancho por 10 cm de largo, y cada lateral con dos paneles, puede proporcionar un máximo de 3,5 W, por lo que, con los cuatro paneles, se podría generar hasta un máximo de 7 W.

2.3. Registro de datos

Para la obtención de datos, se ha insertado en la parte posterior de los paneles fotovoltaicos un sistema de adquisición (Easylog USB3), con el cual se guardan los datos en intervalos de tiempo comprendidos entre los 15 y 60 segundos [5]. En total se han colocado dos sistemas de registro de datos, uno para obtener los datos de tensiones para la parte superior de la mochila, y otro para obtener las tensiones de los laterales.

2.4. Cálculo de la potencia fotovoltaica generada

El registro de datos, proporciona medidas de tensión tanto de la parte superior de la mochila, como de los laterales. Para poder calcular la intensidad, y la potencia que proporcionan los paneles fotovoltaicos, se ha colocado una resistencia de 10 ohmios en la entrada del sistema de registro de datos.

Para el cálculo de la intensidad se ha utilizado la ley de Ohm, que proporciona la relación existente entre la intensidad, la tensión y la resistencia existente en el circuito. Cuando en un circuito se mantiene constante una resistencia, como es el caso del circuito con los paneles fotovoltaicos, la corriente del circuito es directamente proporcional a la tensión [6]. A partir del cálculo de la intensidad, se puede calcular la potencia (P), definida a su vez como la cantidad de energía eléctrica que es transportada o consumida en un instante de tiempo. Es normalmente determinado por el valor de la tensión (V), la intensidad (I) o una resistencia constante (R). Se debe tener en cuenta para estos casos, que un aumento de tensión, produce un aumento de la intensidad, y por lo tanto de la potencia.

$$P = V \cdot I = R \cdot I^2$$

2.5. Sistema completo

La ubicación de los paneles fotovoltaicos en la mochila logística, se ha realizado considerando que la colocación de estos no debe impedir que el soldado pueda acceder al interior de la misma. Es necesario que los paneles no estorben a la hora de sacar cualquier objeto, ni en la apertura de cualquiera de sus bolsillos exteriores. Los paneles fotovoltaicos tienen en su parte posterior unas hebillas que pueden ajustarse en la parte superior de la mochila, mientras que en su parte posterior tienen unas pinzas tipo tirantes que se pueden soltar rápidamente (figura 1). El sistema de datos se encuentra integrado en la parte posterior de los paneles.

Figura 1. Mochila logística con paneles fotovoltaicos.

3. Energía generada

En este apartado se realiza el estudio de los datos obtenidos, durante las salidas efectuadas por los alumnos de la Escuela Naval Militar durante el periodo del 1 de febrero al 10 de marzo del 2017. El estudio se ha realizado en zonas de la provincia de Pontevedra y en el campo de adiestramiento del Teleno (León). Los datos para el cálculo de la energía se tomaron teniendo en cuenta para el estudio dos modos de trabajo: estático y dinámico.

3.1. Modo estático

En este apartado, se realiza el estudio de los datos obtenidos por los paneles fotovoltaicos con la mochila en una posición estática durante las horas en que se realizaron los ejercicios de adiestramiento de los alumnos de Infantería de Marina. Este podría ser un caso hipotético de un equipo de reconocimiento para recopilar información del enemigo. Estos equipos se insertan en una posición enemiga y envían información sobre instalaciones y movimiento de personal, por lo que se podría dejar la mochila en una

posición estática para obtener una generación de energía que permita alimentar algunos de los dispositivos electrónicos equipados.

Se han realizado dos experiencias en diferentes ubicaciones en modo estático. La primera de ellas en la provincia de Pontevedra. La temperatura media para esta zona en invierno es de 8,3 ºC, y en verano de 19,9 ºC [7]. La irradiación solar oscila entre la más baja de 1,6 kWh/m^2 y la más alta de 7,2 kWh/m^2 Los datos en modo estático fueron tomados el día 29 del mes de enero de 2017, en las instalaciones de la Escuela Naval Militar en Marín. El día amaneció con chubascos y una temperatura que iba desde los 11 ºC de mínima a 14 ºC de máxima. El lugar de toma de datos fue un lugar libre de edificios, con poca vegetación y sin árboles. Teniendo en cuenta la tensión y la intensidad de los paneles, se pueden obtener los valores de la potencia generada por cada uno de los paneles (lateral y seta), así como la potencia total generada por ambos.

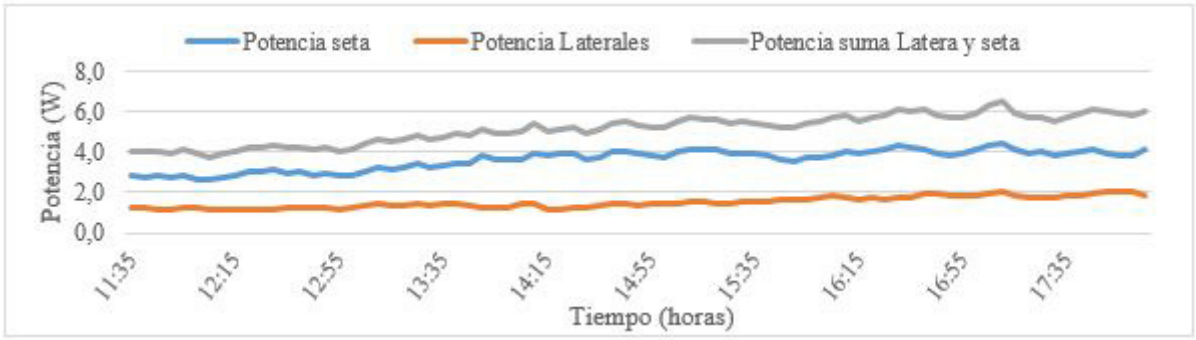


Figura 2. Potencia generada por de los paneles fotovoltaicos día 29/01/17.

En la figura 2**.** se puede apreciar que la mayor potencia generada ha sido en la parte superior de la mochila, con un valor de potencia media de 3,6 W, mientras que para el caso de los laterales la potencia media es de 1,5 W. Además, se ha obtenido que los paneles nos podrían proporcionar en las 6 horas de toma de datos una energía 30,6 Wh.

Por otra parte, se ha realizado una segunda toma de datos en otra ubicación, en el campo de adiestramiento del Teleno, que se encuentra en la comunidad autónoma de Castilla y León, en la provincia de León. Su temperatura media oscila entre los 3,4 ºC en invierno, y los 19,9 ºC en verano. La irradiación solar para la provincia de León oscila entre 1,8 kWh/m^2 y 7,8 kWh/m^2.

Los datos en modo estático se tomaron el día 7 de marzo, durante un campamento realizado por los alumnos de Infantería de Marina. El día amaneció ligeramente nublado, si bien a lo largo de la mañana el día fue abriendo. Las rachas de vientos eran fuertes y procedentes del suroeste. Los resultados de potencia obtenidos situando la mochila logística en modo estático se pueden observar en la figura 3. La energía total obtenida fue bastante alta (89,6 Wh).

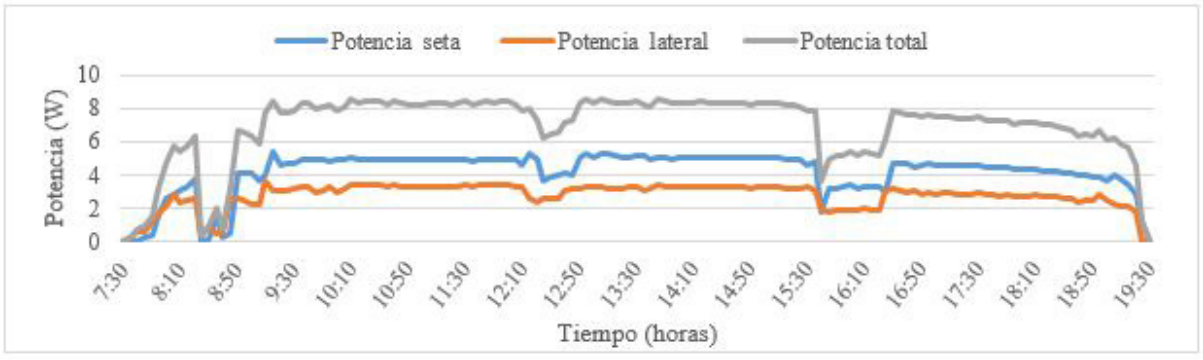


Figura 3. Gráfica de las potencias de los paneles día 7/03/17.

3.1.1. Suministro equipos en modo estático

La figura 4**.** muestra el resumen de los valores de energía obtenida con los paneles en el modo estático. En ella se recogen también los dispositivos electrónicos transportados por el infante de marina que podrían ser alimentados con dicha energía, así como los tiempos de utilización. Se puede observar que tanto el Harris RF-7800S como los equipos optrónicos tendrían energía durante 1 día en ambos escenarios, mientras que el resto de equipos disponen de energía durante más tiempo de uso en el Teleno.

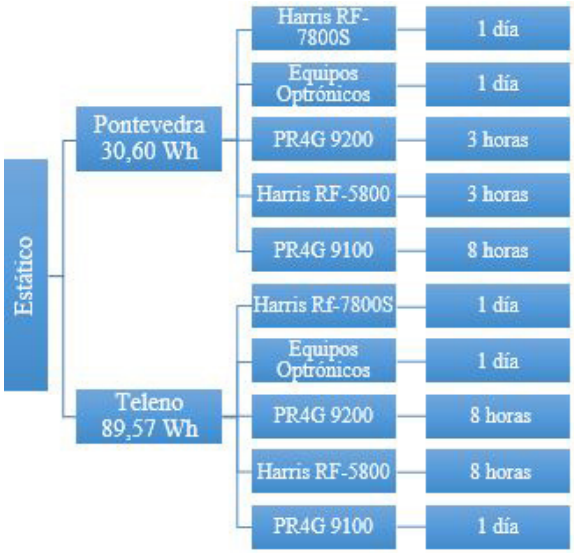


Figura 4. Dispositivos alimentados modo estático.

3.2. Modo dinámico

En este caso se realizó el estudio de la energía obtenida por los paneles fotovoltaicos, situando la mochila logística en un modo dinámico, realizando para ello el movimiento a pie o en vehículo desde una posición a otra. Durante este movimiento podrían influir algunos factores como las sombras producidas por los árboles y la vegetación.

El primer muestreo fue realizado el día 9 del mes de febrero, se tomaron los datos durante la salida realizada en las proximidades de la base militar General Morillo en Figueirido (Pontevedra). El día amaneció nublado, y permaneció del mismo modo durante el transcurso de los ejercicios efectuados por los alumnos de Infantería de Marina. La temperatura del día 9 alcanzó un mínimo de 4 ºC, y una máxima de 11 ºC. En esa zona de ejercicios no se encontraban arboles altos ni vegetación espesa, lo que beneficia la obtención de la radiación solar. Los ejercicios realizados por los alumnos de Infantería de Marina fue el asentamiento de morteros de 81 mm en dos posiciones diferentes. Con los datos obtenidos de tensión e intensidad de ambos paneles fotovoltaicos se obtuvo la potencia fotovoltaica generada por cada uno de los elementos (seta y laterales), y por lo tanto la potencia total generada para el periodo de maniobras en Pontevedra (figua 5**.**).

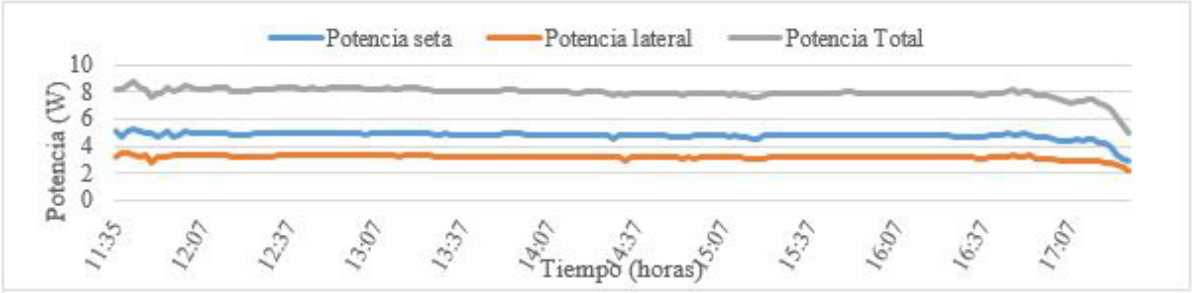


Figura 5. Potencia generada por los paneles fotovoltaicos el día 9/02/17.

En los paneles colocados en la seta se obtuvo una potencia media de 4,76 W, mientras que los paneles laterales una potencia media de 3,17 W. Con respecto a la energía proporcionada por los paneles se obtuvo en las 6 horas de muestreo se generó una energía de 47,58 Wh.

Los siguientes datos se tomaron el día 16 de febrero durante la ejecución de un ejercicio de patrullas en las proximidades de Cangas (Pontevedra). Se trata de una zona de abundante vegetación, con árboles de gran altura, lo que dificulta la toma de datos de radiación. El día fue soleado, con una temperatura máxima de 20 ºC. La zona en la que se tomaron los datos fue. La distancia recorrida durante la patrulla fue de 9 km. Este día se obtuvo una radiación media de 224,5 W/m^2, existiendo dos picos principales de radiación solar: 600 W/m^2 a las 12:00 horas, y de 500 W/m^2 a las 14:00 horas. En la figura 16. se pueden observar el descenso de la potencia en tres franjas horarias. Estos descensos son debidos al movimiento de los alumnos a la zona de ejercicios a las 11:51 horas y el regreso a las 15:41 horas. El descenso producido a las 14:00 fue debido al movimiento de la patrulla por una zona de árboles donde apenas había radiación solar. La potencia obtenida en los paneles de la seta ha sido mayor que la de los paneles colocados en los laterales. La potencia media de los paneles laterales ha sido de 1,09 W, mientras lo de la seta ha sido 1,61 W. En las 6 horas que ha durado la maniobra se ha generado una energía de 16,20 Wh.

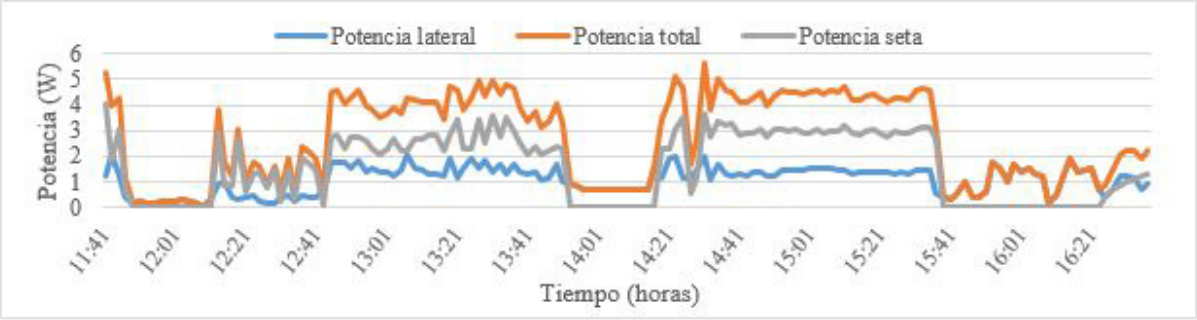


Figura 6. Potencia generada por los paneles fotovoltaicos el día 16/02/17.

3.2.1. Suministro energético en modo dinámico

La figura 7**.** muestra el resumen de los valores de energía obtenida con los paneles en el modo dinámico.

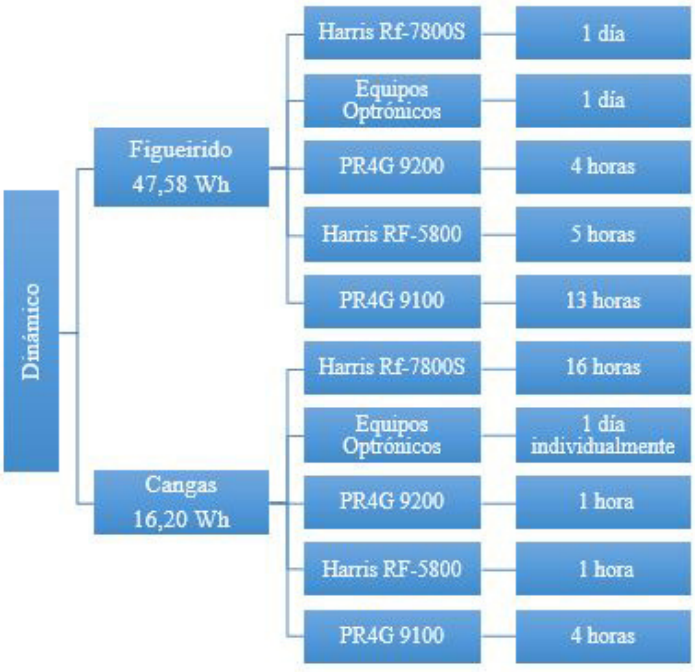


Figura 7. Dispositivos alimentados en modo dinámico.

Se puede observar que los equipos optrónicos tendrían energía durante 1 día en el caso del primer escenario de Pontevedra (Figueirido). Sin embargo, en el segundo escenario (Cangas) únicamente se tendría energía durante 1 día para cada equipo optrónico pero trabajando de manera individual.

El resto de equipos de comunicaciones disponen de energía durante más tiempo de uso en el primer escenario que en el segundo, esto es debido fundamentalmente a la diferente ubicación y condiciones meteorológicas.

4. Conclusiones

En primer lugar se ha implementado en la mochila logística unos paneles fotovoltaicos para alimentar dichos equipos, uno en la seta (7 W) y uno en cada lateral (2x3,5 W). Finalmente, se han registrado los datos de tensión e intensidad fotovoltaica y a partir de ellos se ha calculado la potencia y la energía producida por los mismos.

Con el fin de obtener datos de energía lo más fiable posible, las mediciones han sido llevadas a cabo en distintos escenarios y en dos modos de operación: estático y dinámico. En modo estático se obtuvo una cantidad de energía promedio de 60 Wh, mientras que en modo dinámico la energía promedio obtenida fue 31 Wh. Con estos valores de energía se ha determinado qué equipos pueden ser alimentados y su autonomía, obteniéndose que todos los equipos optrónicos pueden ser alimentados con esta energía, mientras que, dependiendo del equipo de comunicaciones utilizado, podría ser alimentado durante varias horas para su funcionamiento.

Por tanto, en función de los resultados obtenidos se puede decir que es posible alimentar la mayor parte de los equipos durante un periodo de tiempo lo suficientemente amplio. De la totalidad de la energía generada, el 70 % procede de los paneles ubicados en la seta mientras que el 30 % restante proviene de los paneles laterales. Este resultado permite concluir que la utilización de los paneles laterales ofrece unos resultados aceptables con lo que se recomienda su utilización, ya que el incremento de peso es mínimo en comparación con las ventajas que aporta.

Referencias

1. *El impacto de las tecnologías y la forma de hacer la guerra. S.L.: Ministerio de Defensa.*
2. *P. Solanilla Aplaza, A. Ponce. Energías Renovables Desplegables: Hacia las misiones sostenibles. Madrid: Instituto Español de Estudios de Defensa., 2011.*
3. *A. Versprille. Military Tests Energy Generating Backpack. s.l. : National Defense, 2015.*
4. *J. Kacprzyk, N. Pina. Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. 2012. Vol. springer.*
5. *Lascar Electronics. [En línea] 2017. [Citado el: 18 de Febrero de 2017.] www.lascarelectronics.com.*
6. *R. J. Fowler. ELECTRICIDAD. Principios y Aplicaciones. Barcelona : Reverte S.A, 1994.*
7. *Agencia Estatal de Meterologia. www.aemet.es. [En línea] 2017. [Citado el: 4 de Febrero de 2017.] www.aemet.es.*

Modelización numérica de casco EOD ante impacto de fragmento

Loya, Jose A.[1,3]*, Aranda-Ruiz, Josué[1,3], Rodríguez-Millán, Marcos[2,3], Miroir, Kentin[4]

[1] Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid. Avda. de la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid, España. jloya@ing.uc3m.es (JALL), jaranda@ing.uc3m.es (JAR).

[2] Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid. Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid. mrmillan@ing.uc3m.es (MRM).

[3] Centro Universitario de la Guardia Civil, C. Princesa s/n, 28300 Aranjuez, Madrid, España.

[4] Dpto de Estructuras y Mecánica de Materiales, (SIGMA Clermont). Campus des Cézeaux, CS 20265, 63178 AUBIERE CEDEX, Aubière, Francia, (KM).

* Autor principal y responsable del trabajo; jloya@ing.uc3m.es (JALL).

Resumen

En este trabajo se ha estudiado y analizado numéricamente la respuesta de un casco diseñado para la desactivación de explosivos (EOD) frente a impacto de fragmento. Para ello se ha utilizado el código comercial de elementos finitos ABAQUS/Explicit modelizando el comportamiento de los diferentes materiales mediante subrutinas de usuario. Los resultados obtenidos permitirán el desarrollo óptimo de este tipo de sistemas de protección, mejorando la ergonomía y minimizando los daños producidos por dicho impacto en el usuario.

Palabras clave

Sistemas de protección personal, impacto, daño, elementos finitos.

1. Introducción

Existe una necesidad real de mejorar los sistemas de protección personales que usan las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado (FFCCSSEE) y Fuerzas Armadas (FFAA) frente a amenazas balísticas y explosivas que puedan darse en escenarios delictivos, terroristas, o por la participación en conflictos internacionales [1].

Ante la eventual explosión de un dispositivo explosivo que manipule un técnico en desactivación de explosivos (TEDAX), el riesgo debido al impacto de la onda de choque de la explosión junto al impacto de fragmentos, bien formen parte del recipiente contenedor o sean metralla adicional, pueden conllevar un desenlace fatal para el técnico. Es por ello que estos especialistas utilizan equipos de protección que, persiguiendo la máxima comodidad y facilidad de movimiento posible con la minimización del daño personal provocado por la amenaza, combinen distinto tipo de materiales según la zona del cuerpo a proteger (ver figura 1.a), desde paneles cerámicos para protección de pecho y extremidades (alúminas y carburo de boro) a fibras de alta resistencia para tejidos (aramida, fundamentalmente) para el traje y casco, por ejemplo.

Figura 1. (a) Equipo EOD modelo OLYMPIA de United Shield International; (b) Casco.

Los cascos más modernos, a pesar de combinar materiales más ligeros y resistentes a base de materiales compuestos reforzados con fibras de aramida para el bloque del casco y viseras trasparentes de policarbonato, alcanzan pesos superiores a los 4 kg. Su peso elevado, junto a situaciones de estrés físico y mental, y posiciones de trabajo incómodas, dificulta enormemente el desarrollo de la actividad, por lo que el uso de herramientas numéricas que ayuden a mejorar su diseño y optimizar espesores, ha despertado gran interés.

A la hora de desarrollar un modelo numérico completo es necesario conocer y calibrar el comportamiento de todos y cada uno de los componentes que conforman todo el sistema de protección. Es por este motivo que el objetivo de este trabajo es analizar numéricamente el comportamiento de la visera de protección frente a impacto de un proyectil tipo FSP (*Fragment Simulation Projectile*), teniendo en cuenta su interacción con el resto de materiales, como un primer paso para la calibración de un modelo numérico completo.

2. Modelo de elementos finitos

El casco de desactivación de explosivos analizado es el modelo OLYMPIA de United Shield International (figura 1.b), empleado por fuerzas y cuerpos de seguridad de diferentes países, de calota fabricada en Kevlar™ y visera de protección frontal de policarbonato. El análisis numérico se ha realizado mediante el método de elementos finitos, empleando para ello el código comercial ABAQUS/Explicit. El modelo incluye la calota fabricada de material compuesto reforzado con tejido de aramida, la visera de protección de policarbonato y el aislante que se coloca entre el casco y la visera; además se incluye el modelo del proyectil FSP (ver figura 3.a).

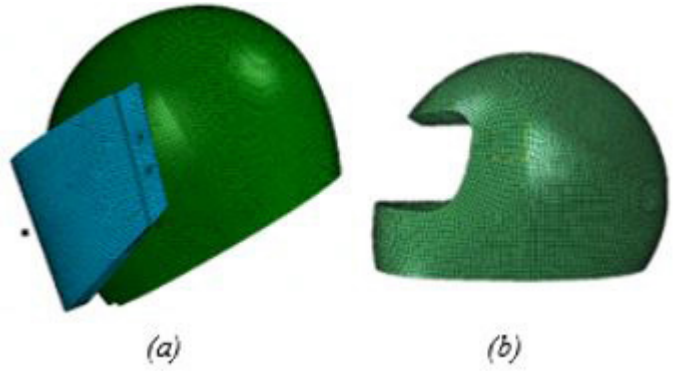


Figura 3. (a) Modelo numérico completo. (b) Modelo numérico de la calota.

La parte del modelo correspondiente a la calota, mostrada en la figura 2.b, consta de un total de 40.508 elementos de tipo C3D8R, y el comportamiento del material compuesto de aramida se ha modelizado mediante el desarrollo de una subrutina de usuario. La conexión entre visera y calota se hace con presión a través de una junta de elastómero que mejora el sellado. Dicho elastómero se ha considerado como elástico y lineal, con un módulo de elasticidad de valor E=5 GPa y un coeficiente de Poisson de valor υ=0.4. El modelo numérico del aislante, mostrado en la figura 4.c, consta de un total de 4.003 elementos, también del tipo C3D8R.

La visera considerada posee un espesor de 21 mm. En cuanto al mallado de la misma, está formado por 110.398 elementos de tipo C3D8R (figura 4.a), y la modelización del comportamiento del policarbonato del que está fabricada (detallado en la sección 3) también se ha considerado mediante el desarrollo de una subrutina de usuario. La interacción entre casco y visera se ha realizado mediante una condición de tipo «tie» en las zonas de unión entre ambos elementos.

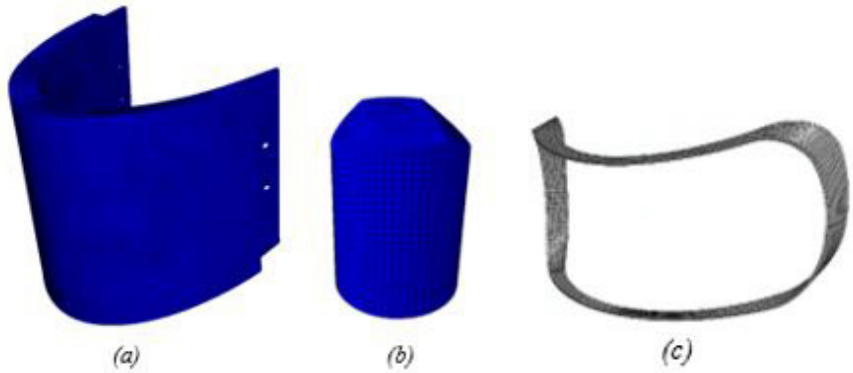


Figura 4. Componentes del modelo numérico. (a) Visera. (b) FSP. (c) Aislante.

Tal y como se ha comentado anteriormente, se ha simulado el impacto de un fragmento metálico (FSP) de 1.1 g de masa, producido como resultado de una posible explosión, el cual se ha definido según la norma STANAG 2920. Dicho proyectil ha sido mallado con un total de 8.395 elementos, también de tipo C3D8R (ver figura 3.b)

3. Descripción de los materiales

3.1. Material de la calota

La calota del casco está fabricada en material compuesto reforzado con fibras de aramida, cuyas propiedades mecánicas dependen de la dirección de dichas fibras, y se recogen en la tabla 1.

E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	E_3 [GPa]	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	G_{23} [GPa]	ν_{13}	ν_{23}	ρ [kg/m^3]
18,5	18,0	4,5	0,77	2,6	2,6	0,33	0,33	1.230

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la fibra de aramida Kevlar-29 [2]

Su comportamiento constitutivo se ha considerado elástico lineal hasta rotura, considerando como criterio de fallo el de Hashin [3], implementado este último mediante una subrutina de usuario tipo VUMAT. Los parámetros de daño que definen este criterio se recogen en la tabla 2.

X_{1T} [MPa]	X_{2T} [MPa]	X_{3T} [MPa]	X_{1C} [MPa]	X_{2C} [MPa]	X_{3C} [MPa]	S_{12} [MPa]	S_{13} [MPa]	S_{23} [MPa]
555	555	1.050	555	555	1.050	77	1.060	1.086

Tabla 2. Parámetros de daño para el criterio de Hashin en material compuesto reforzado con fibras de aramida Kevlar-29 [2]

3.2. Material de la visera

Para el policarbonato de la visera, se ha considerado un modelo de material termoviscoplástico, con un criterio de daño implementado también mediante una subrutina de usuario tipo VUMAT [4]. Los parámetros que definen el modelo de daño se han calibrado a partir de los ensayos experimentales realizados por Ravi-Chandar *et al*. [5], que consisten en el impacto asimétrico de un proyectil cilíndrico contra el canto de una probeta plana con entalla simple. Dicho criterio de daño recoge de manera simultánea dos modos de fallo: modo de fractura frágil, definido por la tensión principal máxima, y modo de fractura dúctil, definido a partir de la densidad de energía de deformación.

3.2.1 Criterio de fallo frágil

Se ha definido mediante un criterio tensional de rotura local, basado en la tensión principal máxima, de forma que cuando se alcance un valor crítico de dicha tensión principal máxima se produzca la fractura:

$$\boldsymbol{\sigma_I = \sigma_I^{crit}(\dot{\varepsilon})} \qquad (1)$$

Se ha considerado una dependencia del valor de σ_I^{crit} con la velocidad de deformación, siguiendo la misma metodología empleada por Dolinski *et al*. [6]. Dicha dependencia ha sido obtenida a partir de los resultados experimentales de Ravi-Chandar *et al*. [5], resultando finalmente:

$$\boldsymbol{\sigma_I^{crit}(\dot{\varepsilon}) = \begin{cases} \sigma_{I,cuas}^{crit} & si\ \dot{\varepsilon} \leq 27000\ s^{-1} \\ \sigma_{I,dinam}^{crit}(\dot{\varepsilon}) & si\ \dot{\varepsilon} > 27000\ s^{-1} \end{cases}} \qquad (2)$$

donde:

$$\boldsymbol{\sigma_{I,cuas}^{crit} = 160\ MPa} \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma_{I,dinam}^{crit}(\dot{\varepsilon}) = 1.622 \cdot 10^{-11}\dot{\varepsilon}^3 - 1.3274 \cdot 10^{-6}\dot{\varepsilon}^2 + 3.6544 \cdot 10^{-2}\dot{\varepsilon} - 178.27\ MPa} \qquad (4)$$

donde el valor crítico calculado, de 160 MPa, concuerda con el publicado por Dorogoy y Rittel [7]. Además, al tratarse de un criterio de fractura frágil, es lógico pensar que se debe dar en aquellos puntos en los que la deformación plástica equivalente sea considerablemente baja, por lo que se ha impuesto como requisito adicional, que la expresión (1) solo sea válida en aquellos puntos en los que se cumpla:

$$\bar{\varepsilon}_p \leq 0.05 \quad (5)$$

3.2.2 Criterio de fallo dúctil

Se trata de un criterio de fractura global que consiste en establecer un nivel crítico de densidad de energía de deformación, W_{crit}, a partir del cual comenzará la degradación del material, y un valor límite de densidad de energía de deformación, W_{frac}, que determinará cuándo se produce la fractura. La representación esquemática de este criterio se recoge en la figura 4.

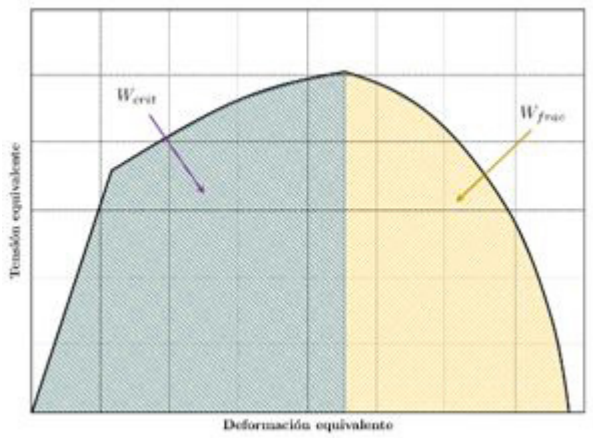


Figura 5. Representación esquemática del criterio de fractura dúctil.

El valor crítico de la densidad de energía de deformación se establece según la expresión (6):

$$W_{crit} = \int_0^{\alpha} \sigma_{ij}\, d\varepsilon_{ij} \quad (6)$$

donde σ_{ij} y ε_{ij} son las componentes de los tensores de tensión y deformación respectivamente. El límite de integración superior α se fija como el nivel de deformación equivalente crítico ε_{crit}, a partir del cual la resistencia estructural comienza a deteriorarse de forma gradual de acuerdo a la expresión (7):

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}^*(1 - D^b) \quad (7)$$

donde es la tensión equivalente ya degradada en el instante actual, para una deformación equivalente dada $\bar{\varepsilon} \geq \bar{\varepsilon}_{crit}$; y b un exponente que permite establecer el tipo de relación entre $\bar{\sigma}$ y $\bar{\sigma}^*$ D a es el nivel de daño existente en el material, pudiendo tomar valores comprendidos entre 0, si se encuentra intacto, y 1 si está completamente dañado. Dicho parámetro D se define como:

$$D = \frac{W - W_{crit}}{W_{frac} - W_{crit}} \quad (8)$$

En el caso del PC, como en muchos polímeros en general, se produce una diferencia de comportamiento entre tracción y compresión, siendo generalmente la resistencia de estos materiales menor a tracción. Por este motivo, se ha agregado a este criterio de daño dúctil, una diferenciación entre los elementos que estén trabajando a tracción y los que lo estén haciendo a compresión. Dicha distinción se realizará mediante el uso del tercer invariante del tensor de tensiones I_3, considerando que si dicho valor es

positivo, el elemento se encuentra traccionado, mientras que si el valor es negativo, el elemento estará comprimido. Así, se definen unos valores de densidad de energía de deformación W_{crit} y W_{frac} tanto a tracción como a compresión, los cuales se recogen en la tabla 3.

W_{crit}^{trac}	W_{frac}^{trac}	W_{crit}^{comp}	W_{frac}^{comp}	b
50 MJ/m^3	70 MJ/m^3	140 MJ/m^3	170 MJ/m^3	1

Tabla 3. Parámetros del criterio de fractura dúctil

Adicionalmente, se ha incluido un valor límite de deformación ε_{max}=1.6, [8], para evitar posibles errores numéricos derivados de la excesiva distorsión que aparece en elementos próximos a su eliminación y que derivan en problemas de convergencia.

3.3. Material del FSP

El FSP está fabricado en acero AISI 4340, definiéndose el comportamiento termoviscoplástico del material mediante un modelo de Johnson-Cook [9], cuya función de endurecimiento viene definida por las expresiones:

$$\boldsymbol{\sigma_Y}\left(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\boldsymbol{p}}, \dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}^{\boldsymbol{p}}, \boldsymbol{T}\right) = \left[\boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\boldsymbol{p}})^{\boldsymbol{n}}\right]\left[\mathbf{1} + \boldsymbol{C}\,\boldsymbol{ln}\left(\frac{\dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}^{\boldsymbol{p}}}{\dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{\mathbf{0}}}\right)\right]\left[\mathbf{1} - \boldsymbol{\theta}^{\boldsymbol{m}}\right] \qquad (9)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \frac{\boldsymbol{T} - \boldsymbol{T_0}}{\boldsymbol{T_m} - \boldsymbol{T_0}} \qquad (10)$$

donde $\bar{\varepsilon}^p$ es la deformación plástica equivalente, $\dot{\bar{\varepsilon}}^p$ la velocidad de deformación plástica equivalente y $\boldsymbol{\theta}$ la temperatura absoluta. Para el acero AISI 4340, los parámetros que aparecen en las expresiones (9) y (10) han sido obtenidos de [10]. El coeficiente de Quinney-Taylor que define el porcentaje de trabajo plástico que es transformado en calor es igual a $\boldsymbol{\beta=0.9}$. La temperatura inicial se ha fijado en $\boldsymbol{T_0=293\ K}$ y la temperatura de fusión en $\boldsymbol{T_m=775\ K}$. Además, el modelo para el acero tiene en cuenta la relación entre la presión, la densidad y la energía interna a través de la ecuación de estado de Mie-Grüneisen:

$$\boldsymbol{p}\left(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\boldsymbol{p}}, \dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}^{\boldsymbol{p}}, \boldsymbol{T}\right) = \frac{\boldsymbol{\rho_0 c_0^2 \eta}}{(\mathbf{1} - \boldsymbol{s\eta})^2}\left(\mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{\Gamma_0 \eta}}{\mathbf{2}}\right) + \boldsymbol{\Gamma_0 \rho_0 E_m} \qquad (11)$$

donde ρ_0 es la densidad de referencia, c_0 la velocidad del sonido en el material, $\boldsymbol{\eta}$ es la deformación volumétrica nominal (definida como $\boldsymbol{\eta=1-}\ \rho_0 / \rho_0$, siendo $\boldsymbol{\rho}$ la densidad actual), Γ_0 es una constante material, E_m la energía interna por unidad de masa, y $\boldsymbol{s}$ es una constante en la ecuación de estado hidrodinámica de Mie-Grüneisen. Los valores de los parámetros pertenecientes a dicha ecuación de estado se han obtenido de [11].

4. Resultados obtenidos

La curva balística obtenida para la visera se muestra en la siguiente figura:

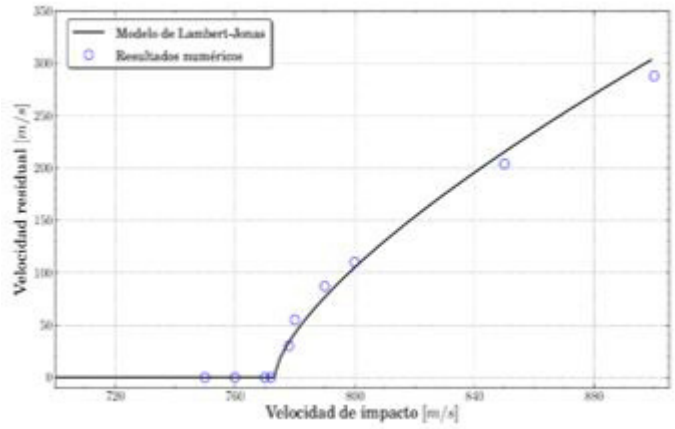


Figura 6. Resultados obtenidos para el límite balístico de la visera de PC.

En la figura anterior se representa la velocidad residual de salida del proyectil V_r, frente a la velocidad de impacto V_i. Estos datos han sido ajustados mediante una regresión de mínimos cuadrados de acuerdo a la ecuación de Lambert-Jonas [12]:

$$V_r^p = A\left(V_i^p - V_{50}^p\right) \quad (12)$$

donde A y p son coeficientes de regresión, y V_{50} es el valor del límite balístico, definido como la velocidad a la cual el proyectil perfora el objetivo el 50 % de las veces. Se puede comprobar cómo el límite balístico predicho por el modelo numérico, $V_{50} \approx 773$ **m/s**, es muy similar a los 780 m/s proporcionados por el fabricante [13], cometiéndose un error de apenas un 0,9 %.

El mecanismo de fallo del material de la visera es de tipo dúctil, no llegando a alcanzarse en ningún caso el valor de tensión principal máxima crítica que daría lugar a un modo de fractura frágil. Los elementos de la zona externa de la visera (los que primero entran en contacto con el proyectil) rompen al alcanzar el valor de densidad de energía de deformación a fractura a compresión , $W_{frac}^{comp} = 170\ MJ/m^3$, mientras que los de la parte trasera de la misma se eliminan al alcanzar el valor límite a tracción $W_{frac}^{trac} = 70\ MJ/m^3$.

En la figura 6 se puede observar la secuencia del impacto del proyectil contra la visera a una velocidad de 770 m/s, por debajo del límite balístico del PC de la visera de protección. En este caso el proyectil se detiene antes de atravesar la visera por completo.

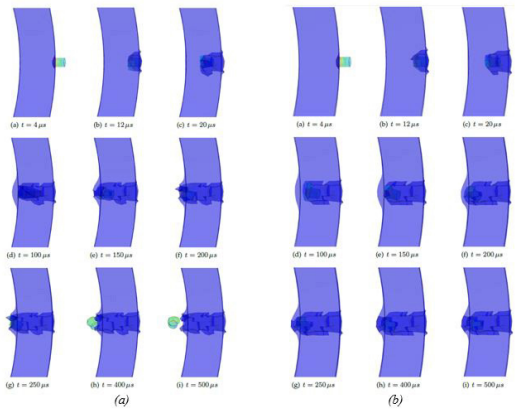


Figura 7. Secuencia de impacto de fragmento contra la visera; (a) por debajo del límite balístico, (b) superando el límite balístico.

5. Conclusiones

En este trabajo, se ha analizado numéricamente el comportamiento frente a impacto de un modelo de protección personal, como es un casco EOD. Concretamente, y como estudio preliminar, se ha estudiado la respuesta a impacto de FSP de la visera de protección frontal de policarbonato, incorporando el modelo de daño del material, y comprobando que la respuesta de la misma, incorporada a un modelo completo del casco, se corresponde con la observada experimentalmente.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la financiación recibida del Ministerio de Economía y Competitividad y al programa FEDER a través de los proyectos DPI2017-88166 –R y RTC-2015-3887-8.

Referencias

1. *Taber K.H, Warden D.L., Hurley R.A. Blast-related traumatic brain injury: what is known? The Journal of Neuropsychiatry & Clinical Neurosciences. 2006; 18(2), 141-145.*
2. *Tse K.M. Development of a realistic finite element model of human head and its applications to head injuries. Tesis Doctoral, National University of Singapore, 2013.*
3. *Hashin Z. The elastic moduli of heterogeneous materials, J. Appl. Mech. 29, 143-150, 1962.*
4. *Aranda-Ruiz J.* Criterios de fallo aplicables a polímeros de uso structural sometidos a cargas impulsivas. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2017.
5. *Ravi-Chandar K., Lu J., Zhu Z. Failure mode transitions in polymers under high strain rate loading, International Journal of Fracture. 2000;101, 33-72.*
6. *Dolinski M., Rittel D., Dorogoy A. Modeling adiabatic shear failure from energy considerations, Journal of Mechanics and Physics of Solids. 2010; 58, 1759-1775.*
7. *Dorogoy A., Rittel D. Effect of confinement on thick polycarbonate plates impacted by long and AP projectiles, International Journal of Impact Engineering. 2015; 76, 38-48.*
8. *Faye A., Parmeswaran V., Basu S. Mechanics of dynamic fracture in notched polycarbonate, Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2015; 77, 43-60.*
9. *Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, In: Proceedings of the seventh international symposium on ballistics, 1983.*
10. *Ozel T., Zeren E. Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high speed machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007; 35, 255-267.*
11. *Tham C.Y., Tan V.B.C., Lee H.P. Ballistic impact of a KEVLAR helmet: Experiment and simulations, International Journal of Impact Engineering. 2007; 35, 304-318.*
12. *Lambert J.P., Jonas G.H.. Towards standardization of in terminal ballistics testing: velocity representation, Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, Report No. BRL-R-1852. Maryland, 1976.*
13. *[Internet, accedido el 16-02-2018]. Available from: http://defensetechs.com/portfolios/anti-explosives-and-drugs-3/*

4B. Factores humanos

Ensayos de evacuación de un edificio con 200 soldados del Regimiento de Infantería América 66

Martín-Gómez, César[1], Zuriguel, Iker[2,*], Maza, Diego[2] y Garcimartín, Ángel[2]

[1] Departamento de Construcción, Instalaciones y Estructuras, Universidad de Navarra, 31080 Pamplona, España. cmargom@unav.es

[2] Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Navarra, 31080 Pamplona, España. iker@unav.es (IZ), dmaza@unav.es (DM), angel@unav.es (AG).

* Autor principal y responsable del trabajo

Resumen

Son numerosos los sistemas termodinámicos, estructurales, de procesos... que pueden simularse para anticiparse a lo que sucederá en la realidad pero ¿cómo se simula la presión de una masa de personas que sienten pánico y quieren evacuar un edificio?

Existen experiencias con animales vertebrados (ratones, ovejas...) para analizar parámetros como la velocidad y la presión entre los miembros del conjunto. Incluso la literatura científica está alimentada de numerosos ensayos y experiencias en los que decenas, centenares, a veces miles de personas, son analizadas en su movimiento, tranquilo, sin presión, para prever cómo evacuarán un espacio ocupado.

No obstante, experiencias con personas sometidas a alta presión no se han encontrado más allá del trabajo que plantean los investigadores en esta comunicación. En el pasado estos mismos investigadores, físicos especializados en medios granulares y arquitectos, llegaron a realizar una serie de ensayos con 100 estudiantes universitarios y una relativa alta presión.

Por ello, el ensayo que se expone supone un paso importante cualitativo por dos cuestiones: alto número de participantes (duplicado respecto a anteriores experiencias) y la presión, que puede considerarse muy alta, entre los participantes en el ensayo.

Palabras clave

Arquitectura, evacuación, protección contra incendios, física, medios granulares.

1. Origen, motivación y objetivos

Durante años, un grupo de expertos en física y matemática aplicada de la Universidad de Navarra ha estado investigando el comportamiento de las partículas inertes que fluyen a través de un estrechamiento [1], habiendo comprobado que algunos procedimientos que reducen la probabilidad de obstrucción en el caso de medios granulares inertes (ensanchar el orificio tiene un efecto beneficioso, así como colocar un obstáculo ante la puerta) pueden aplicarse con éxito a la materia activa, al menos en principio [2].

La importancia que esto puede tener en el diseño arquitectónico es, por supuesto, notable y es así como surge la colaboración con un grupo de investigadores de la Escuela de Arquitectura, implicados en diferentes proyectos de protección contra incendios en edificios. Por tanto, los ensayos que a continuación se exponen, buscan alcanzar una mejor comprensión sobre cómo evitar los peligros de obstrucción en las multitudes que atraviesan salidas de emergencia o espacios estrechos.

Además de estudios previos con partículas esféricas inertes, los investigadores han realizado estudios de evacuación con ovejas, donde se analizan el tamaño de las puertas entre otros parámetros de influencia. La elección de las ovejas resulta lógica como paso intermedio entre los granos inertes y los seres humanos [2]. En este caso, el protocolo experimental implicaba un rebaño de 90-100 ovejas que pasan por una puerta estrecha aprovechando que, cada mañana, el rebaño es sacado del corral para limpiarlo y colocar el alimento. A partir de los resultados obtenidos con ovejas, se concluyó que la reducción de la presión de los animales en la puerta conduce a una mejora del tiempo de tránsito y, por tanto, se reduce el tiempo de evacuación. Es importante destacar que la mejora se produce a través de una reducción en los bloqueos de larga duración que son, de hecho, los que puede desencadenar los accidentes más graves. La aplicación evolucionada de esta metodología a la evacuación de personas es lo que se planteó inicialmente con 100 estudiantes, con pruebas en diferentes condiciones de estrés y motivación [3].

Figura 1. Soldados formados instantes antes de comenzar los ensayos (5 de mayo de 2017).

Estas experiencias previas del equipo de investigadores en la evacuación de personas, demostraron la necesidad de realizar experimentos similares (donde se permite contacto y empuje moderado) con un número mucho mayor de personas [4]. Y es así como se llegó a contactar inicialmente con el Cuerpo Nacional de Policía y el Centro Universitario de la Guardia Civil en Aranjuez (con una extraordinaria predisposición para ejecutar los ensayos), aunque se decidió la ejecución de los ensayos con el Regimiento América 66, pues al estar la sede de los investigadores en Pamplona, por razones de logística, tiempo y economía, se confirmó esta como la opción más operativa, amén de la excelente colaboración que se planteó desde el primer momento.

El objetivo de estos ensayos es, pues, trabajar con una masa estadística que implique un mayor número de personas respecto a ensayos previos, así como aumentar la intensidad de presión entre los participantes (hasta el punto previo en que se puedan producir daños físicos). O planteado en terminología científica: caracterizar la evolución temporal del caudal instantáneo para diferentes niveles de competitividad y dos combinaciones de salidas del recinto.

2. Antecedentes

Son numerosas las referencias a ensayos de evacuación existentes tanto en el plano teórico de simulación, de ensayos o referidos a evacuaciones reales [5] [6] [7] [8], incluyendo la definición del concepto de «lento es más rápido» (*Slower-Is-Faster* - SIF) para sistemas complejos constituidos por muchos agentes que interactúan de manera no lineal, sistemas de producción organizados o tráfico vehicular [9]. Se deja al lector que ahonde en dicha bibliografía, para centrarnos en este apartado en la singularidad del trabajo planteado por los investigadores.

Por tanto ¿cuáles son los antecedentes de los investigadores involucrados en estos ensayos? Como se ha comentado, se había tenido oportunidad de realizar diversos ensayos con ovejas, en los que se había analizado detalladamente el efecto que la posición del obstáculo tiene sobre las propiedades del flujo de ovejas a través de las constricciones. En estos casos, se observó que la colocación del obstáculo a 80 cm parece ser la mejor opción: en una posición más cercana el obstáculo es perjudicial, mientras que una colocación más distante es beneficiosa pero el efecto se hace más débil que para el caso de 80 cm. Aunque no puede asegurarse que esa distancia sea la posición óptima, estos resultados apuntan hacia la existencia de una distancia óptima alrededor de este valor. Al mismo tiempo, estos resultados evidencian la extrema sensibilidad del flujo a la posición de obstáculo, haciendo hincapié en la gran importancia de hacer una elección adecuada dependiendo de la situación [10].

También se observó que cuando el obstáculo está demasiado cerca de la puerta, la distribución de los tiempos de paso es notablemente diferente a las otras situaciones, siendo necesaria una mayor investigación de este efecto ya que, hasta ahora, el cambio en la fenomenología cuando el obstáculo está demasiado cerca de la puerta solo se ha estudiado a fondo para el caso de los granos inertes que fluyen de un silo. Por desgracia, en el caso del silo, el atasco permanece estable para siempre, al contrario de lo que sucede con ovejas, peatones o materia activa en general [10].

Más adelante, se realizaron una serie de ensayos con 100 estudiantes de la Universidad de Navarra. Los resultados mostraron –por primera vez de forma experimental– que una disminución de la presión en una puerta del edificio tiene un efecto beneficioso sobre el flujo: el efecto «más rápido es más lento», definido en inglés como *Faster-Is-Slower* - FIS [3].

Por otra parte, estas observaciones pueden apoyar diseños alternativos de salidas de emergencia, tales como colocar un obstáculo delante de la puerta. A pesar de que este «artefacto» implica una dinámica más compleja que en los experimentos informados en estos trabajos, parece razonable que la reducción de la presión lograda por el obstáculo es la causa de la mejora del flujo. Además, las observaciones de las ovejas y de la materia granular vibrada, sugieren que el FIS puede ser un fenómeno universal en la materia activa y en los medios discretos que fluyen a través de constricciones estrechas [9].

3. Cómo se han ejecutado los ensayos

Los ensayos se llevaron a cabo con la colaboración de 200 soldados del Regimiento de Infantería América 66, ubicado en Aizoain (Navarra). Durante una mañana, se realizaron 30 evacuaciones con distintas

condiciones de estímulo y con/sin la presencia de un obstáculo previo a la salida. Los soldados llevaban ropa oscura y se les proporcionó un sombrero rojo, con el propósito de facilitar la identificación de cada persona en las grabaciones de vídeo y medir con precisión el tiempo entre dos individuos consecutivos. El retraso entre una persona y otra es la variable con la que se describe el fenómeno [3].

Figura 2. Trabajos para el montaje de la puerta y la colocación de los sensores de presión.

En el espacio del polideportivo reservado a los ensayos, estas evacuaciones han requerido las siguientes operaciones:

1. Preparación de un soporte para la cámara de alta resolución, que registra la evacuación desde el interior del polideportivo. La cámara está a 5 m de altura y 1,2 m suspendida hacia el interior. Esta cámara registra el área donde se colocan los participantes.
2. Mando a distancia. Dado que la cámara de alta definición no tiene un mando a distancia, se dispone de un dispositivo que permite su control.
3. Construir un soporte para la cámara de seguridad. Una cámara de seguridad se coloca en el exterior sobre la puerta de salida. La lente *Fisheye* se utiliza para colocar el centro de la imagen a 1,2 m de la puerta.
4. Cableado. Cables de alimentación y datos para las cámaras.
5. Escala. Para obtener imágenes que se pueden utilizar para la conversión de píxeles / distancia en ambas, la cámara de alta definición y en la cámara de seguridad.
6. Retirar la puerta de salida de hierro. También se protegen las bisagras, para evitar que nadie se lastime con ellas.
7. Ajustar el tamaño del hueco de salida. Dos tableros de DM de 5 cm de espesor se colocan sobre el hueco de la puerta hasta conformar un espacio de 0,75 m para la evacuación.
8. Colocar los sensores dinámicos de presión múltiple en los laterales de la puerta.
9. Definición de la posición inicial de los diferentes colaboradores. Se delimita un área del polideportivo dentro del cual todos los participantes deben estar posicionados. Su tamaño se calcula para tener una densidad media inicial de cuatro personas por metro cuadrado. La región tiene el mismo formato 16:9 que la cámara HD.
10. Diseño y construcción del obstáculo (fibra de vidrio) para poder rellenarlo de agua con dos objetivos: primero, que sea suficientemente pesado para evitar que se mueva (1.000 kg) y, segundo, para permitir su rápido llenado/vaciado para modificar su posición y realizar las diferentes pruebas en el tiempo previsto.

Hay que decir que los participantes fueron informados de antemano sobre lo que iban a hacer, pero sin conocer el objetivo de los ejercicios [3], pues este conocimiento habría cambiado su comportamiento natural. En

una serie de pruebas, se pidió a los participantes que salieran de una manera tranquila, sin empujar en exceso. En otra serie se les pidió que salieran con presión. Ambas opciones se realizaron con/sin obstáculo.

Figura 3. Formación en el interior del polideportivo antes de comenzar la evacuación.

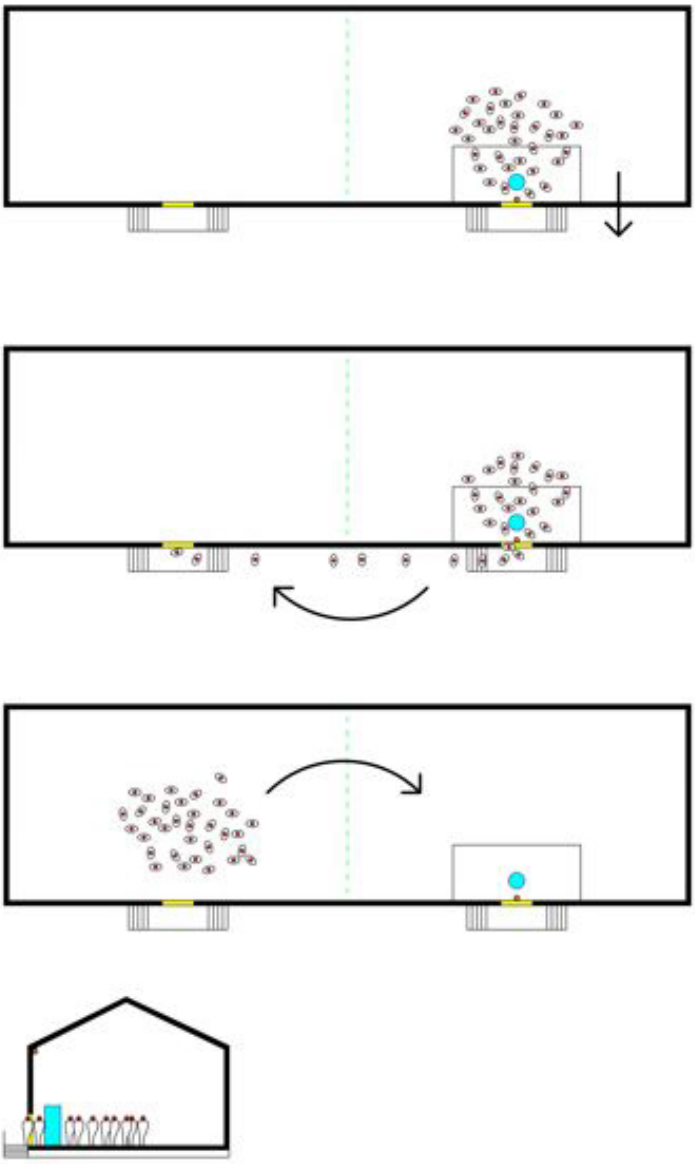


Figura 4. Diagrama con la secuencia de movimientos (de arriba a abajo): los participantes buscan colocarse en la zona designada; se hace una señal con un silbato y comienza la evacuación. Los participantes comienzan a salir sin detenerse y retornan por otro acceso al interior del polideportivo. Una vez que están dentro y se ha comprobado que está todo en orden, vuelven al área inicial, pero en una posición diferente para iniciar una nueva prueba. La sección inferior permite tener una mejor comprensión del interior del espacio donde se realizan los ensayos.

Los datos recogidos en las pruebas son:

1. Con los fotogramas extraídos de las grabaciones de cámaras de seguridad (a 25 cuadros por segundo) se obtiene un diagrama espacio-tiempo que permitirá posteriormente determinar con precisión el tiempo de cruce de cada participante.
2. Tiempo de evacuación. Tiempo empleado en la salida medido por un colaborador con un cronómetro. Este tiempo coincide con el tiempo transcurrido desde la señal de comienzo hasta el paso del último participante según se obtiene con el diagrama espaciotemporal.
3. Velocimetría de seguimiento de los participantes. Obtiene la posición en cada momento de los participantes a partir del vídeo grabado con la cámara HD.
4. La presión de los participante se estima con sensores de presión colocados en los laterales de la puerta.

Figura 5. Participantes saliendo por la puerta y volviendo a la posición de inicio del ensayo.

4. Conclusiones y futuros pasos

Se ha explicado el origen, objetivos y metodología de los ejercicios de evacuación de 200 personas, variando la competitividad y la colocación de un obstáculo delante de la puerta. El número de repeticiones de prueba en las mismas condiciones permite un análisis estadístico exhaustivo que, confiamos, revele nuevas características de los procesos de salida en situaciones de alta intensidad. En este sentido, debemos señalar que este tipo de pruebas deben ser la base para la validación de métodos numéricos. Solo entonces se puede obtener cierta fiabilidad para utilizar simulaciones por ordenador a fin de comprender mejor las evacuaciones de presión extrema, escenario en el que los experimentos son inviables por su peligrosidad.

Sobre la ejecución, las pruebas han generado una gran cantidad de información, de la que solo se han analizado hasta ahora los tiempos de cruce de los diagramas tiempo-espacio. Además, con las películas disponibles, se está realizando el análisis de la trayectoria de los participantes para cuantificar parámetros importantes como densidad de personas dependiendo de la distancia a la puerta, o los movimientos en masas que surgen cuando aumenta la motivación del participante.

Obviamente, el paso desde la investigación fundamental en medios granulares, hasta la posible obtención de una solución comercial que haya podido confirmar con seguridad su valor en caso de emergencia, es muy largo, pero esta experiencia ha supuesto un indudable paso cualitativo. Por todo ello,

se puede afirmar con seguridad que se trata de una experiencia que proporcionará numerosos datos de calidad para avanzar en los requerimientos de evacuación de edificios.

Agradecimientos

El origen de estos trabajos está en los proyectos del Ministerio de Economía y Competitividad FIS2011-26675 y FIS2014-57325; Mutua Montañesa; Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (Argentina) PICT2011-1238; y PIUNA (Universidad de Navarra). Hemos de agradecer la colaboración de Luis Fernando Urrea en la asistencia técnica con los sistemas de vídeo, de Elia Ibañez-Puy y Juan Carlos Sánchez en el montaje de los ensayos, así como de Uxue Aristu en el tratamiento de datos y la preparación de esta documentación.

Estos ensayos hubieran sido sencillamente imposibles sin la colaboración y predisposición de los mandos, oficiales, suboficiales y tropa del Regimiento América 66, a quienes se debe y se quiere dedicar este trabajo.

Referencias

1. *Janda A, Zuriguel I, Garcimartín A, Maza D. Clogging of granular materials in narrow vertical pipes discharged at constant velocity. Granul Matter [Internet]. Springer Berlin Heidelberg; 2015;17(5):545–51.*
2. *Pastor JM, Ferrer LM, Ramos JJ, Zuriguel I. Flow and clogging of a sheep herd passing through a bottleneck. 2015;22808:1–7.*
3. *Martín-Gómez C, Zuriguel I, Mambrilla-Herrero N, Garcimartín Á, Pastor M. Methodology to validate the «faster is slower» concept. B Abstr Int Fire Saf Simp 2015. 2015;(April):237–40.*
4. *Garcimartín A, Parisi DR, Pastor JM, Martín-Gómez C, I. Z. Flow of pedestrians through narrow doors with different competitiveness. J Stat Mech Theory Exp [Internet]. 2016;1–17. Available from: stacks.iop.org/JSTAT/2016/000000 doi:10.1088/1742-5468/2016/00/000000*
5. *Kim H, Park J-H, Lee D, Yang Y. Establishing the methodologies for human evacuation simulation in marine accidents. Comput Ind Eng [Internet]. 2004 Jul [cited 2014 Jan 21];46(4):725–40.*
6. *Peacock RD, Hoskins BL, Kuligowski ED. Overall and local movement speeds during fire drill evacuations in buildings up to 31 stories. Saf Sci [Internet]. Elsevier Ltd; 2012 Oct [cited 2014 Jan 21];50(8):1655–64.*
7. *Davidich M, Geiss F, Mayer HG, Pfaffinger A, Royer C. Waiting zones for realistic modelling of pedestrian dynamics: A case study using two major German railway stations as examples. Transp Res Part C Emerg Technol [Internet]. Elsevier Ltd; 2014;37:210–22.*
8. *Kobes M, Helsloot I, de Vries B, Post JG. Building safety and human behaviour in fire: A literature review. Fire Saf J [Internet]. Elsevier; 2010 Jan [cited 2014 Jan 21];45(1):1–11.*
9. *Pastor JM, Garcimartín A, Gago P a., Peralta JP, Martín-Gómez C, Ferrer LM, et al. Experimental proof of Faster-is-Slower in multi-particle systems flowing through bottlenecks. 2015;2800(JUNE):1–6.*
10. *Zuriguel I, Olivares J, Pastor JM, Martín-Gómez C, Ferrer LM, Ramos JJ, et al. Effect of obstacle position in the flow of sheep through a narrow door. Phys Rev E [Internet]. 2016;94(3):32302.*

Eficacia de un entrenamiento interválico de alta intensidad como entrenamiento operativo específico

Agustín Curiel-Regueros[1], Asier Carrera-Busto[1], Vicente Javier Clemente-Suárez[1 2]

[1] Sport Science School. European University of Madrid. Spain, Research Center in Applied Combat (CESCA). Toledo. Spain, email: curielagus@gmail.com

[2] Agustín Curiel Regueros; correo electrónico: curielagus@gmail.com

Resumen

Las principales investigaciones centradas en el estrés del personal militar se han centrado en cómo los soldados pueden desarrollar el trastorno de estrés postraumático (TEPT) debido a la exposición crónica a las situaciones estresantes de combate.

La respuesta psicofisiológica de los soldados en operaciones de combate ha sido determinada por investigaciones recientes que muestran cambios metabólicos, de modulación simpática, fuerza y activación cortical debido a situaciones estresantes, pero hay una falta de conocimiento sobre metodologías efectivas de entrenamiento.

El objetivo de este estudio fue analizar el efecto de un entrenamiento de interválico operativo de alta intensidad (HIIT) en la respuesta psicofisiológica y el rendimiento de disparo de 20 soldados profesionales del Ejército español, que realizaron un HIIT operativo compuesto por 3 series de 7 repeticiones de ejercicios basados en procedimientos militares operativos con 30 s de carga de trabajo y 30 s de reposo entre repeticiones y 5 min descansando entre series. También fue evaluada una prueba de tiro en diferentes posiciones después de cada serie. Lactato sanguíneo, esfuerzo percibido, estrés, fuerza de las piernas, brazos y músculos respiratorios, temperatura de la piel, saturación de oxígeno en la sangre, frecuencia cardíaca, activación cortical, memoria a corto plazo y la respuesta a la ansiedad fueron evaluadas antes y después del entrenamiento.

Después de la intervención se vio un aumento significativo en la percepción de esfuerzo percibido, estrés, fuerza de la pierna, frecuencia cardíaca y lactato; y una disminución en la saturación de oxígeno y la activación cortical. El rendimiento de disparo no se vio significativamente afectado por la fatiga. Concluyendo que un HIIT operativo logra una respuesta psicofisiológica similar a la evaluada en simulaciones de combate en soldados profesionales, produciendo una disminución en la excitación cortical y los valores de lactato por encima del umbral anaeróbico.

Palabras clave

Combate, activación cortical, soldado, ansiedad.

1. Introducción

Las principales investigaciones en población militar se han centrado en cómo los soldados pueden desarrollar el trastorno de estrés postraumático (TEPT) debido a la exposición crónica a situaciones estresantes del combate (1). El TEPT es un trastorno de ansiedad que produce diferentes respuestas fisiológicas como un incremento de frecuencia cardíaca (FC), aumento de la presión arterial y un descenso de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) (2).

El efecto agudo del estrés en combate en la respuesta psicofisiológica de la población militar ha sido investigado. Numerosos estudios muestran un aumento en valores de lactato, creatinquinasa (CK), urea, activación cortical y fuerza de las piernas y disminución en la fuerza isométrica después de situaciones de combate y un descenso en la activación cortical, mostrando una fatiga del sistema nervioso central (SNC) (3,4). En esta línea, se han observado efectos en paracaidistas después de un salto táctico paracaidista, aumentando el cortisol, la FC, las habilidades motrices finas, el sistema nervioso simpático y la fuerza de las piernas y disminuyendo la ansiedad somática (SA) después del salto (5) y afectando la respuesta psicofisiológica en el combate posterior aumentando la FC y disminuyendo las habilidades motoras finas (6). Otro factor importante que influye de diferentes maneras en la respuesta psicofisiológica es la experiencia previa y el entrenamiento, mostrando una mayor respuesta al estrés en sujetos noveles (4,7).

Aunque está claro que el efecto de la exposición aguda al estrés de combate afecta la respuesta psicofisiológica del soldado, hay una falta de estudios que analicen el efecto del entrenamiento operativo en esta población.

Hasta donde sabemos, no hay estudios previos que analicen el entrenamiento actual que cumplan con los requisitos de combate, como el entrenamiento de intervalo de alta intensidad, *High Intensity Interval Training* (HIIT), método de entrenamiento recomendado por literatura específica para el entrenamiento militar (4,8,9). Luego, el objetivo de este estudio fue analizar el efecto de un HIIT operativo en la respuesta psicofisiológica y el rendimiento de disparo de soldados profesionales. Consideramos que un HIIT operativo alcanzaría una respuesta psicofísica similar a la evaluada en simulaciones de combate por estudios previos (3-9).

2. Desarrollo

20 soldados del Ejército español fueron analizados (n = 20; edad: 36,0 ± 5,7 años; altura 174,4 ± 7,6 cm; peso 74,5 ± 8,3 kg; servicio militar: 15,4 ± 5,7 años; operación militar: 9,2 ± 11 meses). Todos los procedimientos, el entrenamiento y las mediciones fueron aprobados por el jefe médico de la unidad y explicados antes de la intervención a todo el personal militar, que dio su consentimiento voluntario de acuerdo con la Declaración de Helsinki.

Todos los participantes realizaron un HIIT operativo compuesto por 3 series de 7 repeticiones de 30 s con intensidad máxima, descansando 20 s entre los ejercicios y 5 min entre series, en este tiempo de descanso los soldados realizaron una prueba de tiro. Los soldados fueron equipados con botas, casco,

uniforme militar y una mochila de combate. El peso total transportado por el personal militar fue de 20 Kg durante la intervención. HIIT estaba compuesto por siete ejercicios basados en procedimientos militares operativos:

- Subir y bajar escaleras con el equipo de combate.
- Llenar y vaciar una caja de arena con una pala.
- Llevar cajas de munición en un circuito en zig-zag.
- Pasar un circuito de obstáculos.
- Arrastrar un disco de peso (20 Kg) con una cuerda TRX.
- Levantar y arrojar una pieza de la cadena del tanque M113 (15 kg).
- Asalto simulado, combinando sprint y «cuerpo a tierra».

Prueba de tiro

Después de cada serie de HIIT operativo, los participantes realizaron una prueba de tiro en la que dispararon tres veces en tres posiciones diferentes: de pie, arrodillado y sentado armados con una carabina neumática de aire comprimido de 4,5 mm. La suma de la puntuación de los tres disparos fue analizada por cada posición.

Procedimientos

En primer lugar, analizamos la composición corporal de los participantes por un Inbody 270 antes de la intervención, siguiendo protocolos previos [10,11].

Luego, se midieron la respuesta psicofisiológica y el rendimiento de disparo antes e inmediatamente después de cada serie de HIIT operativo con mismos protocolos de investigaciones previas en población militar [3,4,6,9,12]. Los siguientes parámetros fueron analizados antes y después de cada HIIT: lactato sanguíneo, esfuerzo percibido (RPE), fuerza de las piernas y la fuerza muscular del tren superior temperatura de la piel, saturación de O_2 en sangre (BSO) y frecuencia cardiaca (FC), parámetros de fuerza muscular respiratoria, activación cortical con el umbral cortical crítico de fusión (UFCF), memoria a corto plazo, respuesta a la ansiedad por el cuestionario CSAI-2R, y el estado de ansiedad por el cuestionario de ansiedad estado-rasgo (STAI).

También fue medido el lactato, la FC y el rendimiento de disparos antes y después de cada serie del HIIT operativo.

Para analizar el efecto del entrenamiento HIIT fue utilizado el paquete estadístico de IBM SPSS (versión 21.0; SPSS, Inc., Chicago, IL). Primero se determinó la normalidad de la muestra con la prueba Shapiro-Wilk y al aceptarse las hipótesis de normalidad y homocedasticidad de esta se analizaron las diferencias entre los valores pre y post con una T de Student y de cada serie del HIIT operativo con una ANOVA de medidas repetidas con un post hoc de Bonferroni. El nivel de significancia para todas las comparaciones se estableció en $p < 0,05$.

3. Resultados y discusión

RESULTADOS

Los resultados se muestran con su media ± SD. Los resultados pre y post de las variables psicofisiológicas estudiadas se muestran en la tabla 1. RPE, percepción de estrés, UFCF, salto horizontal, FC y lactato presentaron un aumento significativo y los valores de SAT muestran disminución significativa.

	PRE	POST	T	Sig
Estrés (0-100 scale)	11,55±12,96	37,85±22,92	-5,36	0,00
RPE (6-20 scale)	6,6±1,31	14,55±1,96	-16,81	0,00
Temperatura (ºC)	37,15±1,09	37,59±0,74	-1,94	0,07
Frecuencia Cardiaca (bmp)	74.5±16.61	121.1±18.55	-17.28	0.00

	PRE	POST	T	Sig
SAT 0_2 (%)	98,35±0,99	95.9±1.02	8.08	0.00
FTS (N)	46,73±7,4	48,05±8,31	-1,33	0,20
SH (cm)	193,03±19,43	205,25±21,41	-5,66	0,00
FVC (l)	4,91±0,88	5,24±0,96	-1,63	0,12
FEV (1)	3,90±0,66	3,96±0,69	-0,53	0,60
PEF (l/min)	9,50±2,67	9,60±2,14	-0,23	0,82
UFCF (Hz)	34,45±3,15	35,90±3,16	-2,94	0,01
AUTC	5,1±3,24	4,00±3,26	1,93	0,07
AS	5,3±4,74	6,1±4,76	-0,75	0,46
SC	17,55±3,79	17,45±5,05	0,09	0,93
Estado de ansiedad	4,35±5,25	4,00±4,12	0,42	0,68
Lactato (mmol/L)	2,38±1,51	12,37±4,23	-9,95	0,00
Memoria	1,00±0,00	0,95±0,22	1,00	0,33

Table 1. Psychophysiological variables measured before and after the HIIT operative training (M±SD) RPE (*Rating of Perceived Exertion*); $SATO_2$ (saturación de oxigeno): FTS (fuerza del tren superior); SH (salto horizontal); FVC (*Forced Vital Capacity*); FEV1 (*Forced Expiratory Volume in 1 Second*); PEF1 (*peak expiratory flow*); UFCF (umbral de frecuencia crítico de fusión); AC (ansiedad cognitiva); AS (ansiedad somatica); AUTC (autoconfianza).

Las variables medidas antes y después de cada serie se muestran en la tabla 2. Los valores de lactato de cada grupo presentaron un aumento significativo en comparación con los valores previos al lactato. Acerca de Δlactato en las diferentes series, hubo un aumento significativo en la primera serie.

	Series 1	Series 2	Series 3	F	POST HOC
HRBS (bpm)	161,4±17,69	168,9±19,92	174,5 ±22,91	2.001,28	-
HRAS (bpm	127,5±22,83	133,6±22,43	134,8 ±26,01	862,29	-
SST	11,7±3,37	13,1±3,91	13,5±2,78	582,92	-
KST	14,2±2,78	14,0±2,44	15,4 ±2,35	2.221,41	-
SIST	15,5±2,80	15,2±3,30	15,6 ±1,88	1.544,34	-
TST	41,4±6,80	42,2±8,04	44,4 ±4,96	1.575,40	-
Δ Heart Rate intraserie (bpm)	-33,9±21,55	-35,35±13,04	-39,65±18,26	139,06	-
Δ Heart Rate interserie (bpm)	86,90±24,61	94,40±25,07	99,95±27,26	331,38	-
ΔLactate (mmol/L)	7,6±5,56	0,7±4,36	1,72±2,81	98,97	1>2,1>3
Lactate (mmol/L)	9,95±5,36	10,64±4,58	12,37±4,23	153,60	3>1, 2>1

Table 2. Frecuencia cardiaca, lactato rendimiento de tiro entre series (M±SD). HRBS (*heart rate before shoot*); HRAS (*heart rate after shoot*); SST (*standing shoot test*); KGST (*kneeling ground shoot test*); SIST (*sitting shoot test*); TST (*total shoot test*).

DISCUSIÓN

El objetivo de este estudio fue analizar el efecto de un HIIT operativo en la respuesta psicofisiológica y el rendimiento de disparo de soldados profesionales. La hipótesis inicial se cumple ya que la respuesta psicofisiológica evaluada en el HIIT operativo fue similar a la observada en simulaciones de combate.

Encontramos un aumento significativo en el lactato después de la primera serie HIIT. Estos datos alcanzaron valores por encima del umbral anaeróbico, resultados vistos en estudios previos realizados

en combates cuerpo a cuerpo, urbanos, simétricos y asimétricos y en saltos tácticos en paracaídas [3,4,6,13]. Este aumento significativo en el sistema metabólico láctico durante el entrenamiento significa que el efecto de la HIIT operativo fue efectivo ya que provoca una respuesta metabólica similar a la monitorizada en situaciones tácticas y de combate anteriores [3,4,6,13]. En esta línea, al centrarnos en la activación metabólica anaeróbica, hemos encontrado un aumento significativo en la FC, como se vieron en investigaciones previas realizadas en diferentes escenarios de combate [6,7,14]. Esta activación fisiológica se debió al estrés producido por el HIIT operativo, que aumentó la modulación del sistema nervioso simpático, donde el sistema de lucha y huida se activaba debido al estrés de combate [6,13,15]. Esta activación también produjo una disminución en la $SATO_2$, probablemente debido a un aumento de la temperatura durante el entrenamiento [16].

Con respecto a los valores de respuesta cortical, encontramos una disminución en la excitación cortical, síntoma de fatiga en el sistema nervioso central, reflejado por el aumento en los valores de UFCF [17]. Esta reacción ha sido observada previamente en población militar en combate simulado y saltos tácticos en paracaídas [4,18]. A pesar de la disminución de la excitación cortical, la manifestación de la fuerza del tren inferior no se vio afectada, aumentando después del HIIT operativo. Probablemente, este aumento se debió al aumento en la activación del sistema nervioso simpático producido en el HIIT, que produce un mayor número de eferencias de la corteza en los músculos [19]. Por contrario, la manifestación de la fuerza respiratoria y del tren superior no se vio modificada significativamente.

Acerca de la perfección del esfuerzo percibido durante el HIIT operativo, encontramos un aumento significativo en el RPE. Este resultado fue similar a otros estudios [4,13]. En la misma línea, la percepción del estrés aumentó después del entrenamiento, sin afectar la capacidad de memoria del soldado, en contraste con estudios previos realizados en combate asimétrico (19). Además de esto, no encontramos ninguna relación entre el estrés percibido y la respuesta de ansiedad, probablemente por la falta de estrés de combate en el entrenamiento.

El rendimiento de disparo no se vio significativamente afectado por la fatiga. Este hecho mostró una buena habilidad de tiro en las condiciones de fatiga en este grupo militar.

4. Conclusiones

Un entrenamiento HIIT operativo logra una respuesta psicofisiológica similar a la evaluada en simulaciones de combate en soldados profesionales, produciendo una disminución en la activación cortical y los valores de lactato sobre el umbral anaeróbico.

Agradecimientos

Queremos agradecer la contribución de la Escuela Central de Educación Física del Ejército español.

Referencias

1. *Xue C, Ge Y, Tang B, Liu Y, Kang P, Wang M, et al. A meta-analysis of risk factors for combat-related PTSD among military personnel and veterans. PloS one 2015;10(3):e0120270.*
2. *Tan G, Dao TK, Farmer L, Sutherland RJ, Gevirtz R. Heart rate variability (HRV) and posttraumatic stress disorder (PTSD): a pilot study. Appl Psychophysiol Biofeedback 2011;36(1):27-35.*
3. *Clemente Suárez V, Robles Pérez J. Análisis de los marcadores fisiológicos, activación cortical y manifestaciones de la fuerza en una situación simulada de combate. Archivos de medicina del deporte 2012;29(14):9.*
4. *Clemente Suárez V, Robles Pérez J. Respuesta orgánica en una simulación de combate. Sanidad militar 2012;68(2):97-100.*
5. *Clemente-Suárez VJ, Robles-Pérez JJ, Fernández-Lucas J. Psycho-physiological response in an automatic parachute jump. J Sports Sci 2017;35(19):1872-1878.*
6. *Sánchez-Molina J, Robles-Pérez JJ, Clemente-Suárez VJ. Effect of parachute jump in the psychophysiological response of soldiers in urban combat. J Med Syst 2017;41(6):99.*

7. *Clemente-Suárez VJ, de la Vega R, Robles-Pérez JJ, Lautenschlaeger M, Fernández-Lucas J. Experience modulates the psychophysiological response of airborne warfighters during a tactical combat parachute jump. International Journal of Psychophysiology 2016;110:212-216.*
8. *Tornero-Aguilera JF, Robles-Pérez JJ, Clemente-Suárez VJ. Effect of Combat Stress in the Psychophysiological Response of Elite and Non-Elite Soldiers. J Med Syst 2017;41(6):100.*
9. *Clemente-Suarez VJ, Robles-Perez JJ. Mechanical, physical, and physiological analysis of symmetrical and asymmetrical combat. J Strength Cond Res 2013 Sep;27(9):2420-2426.*
10. *Ramos-Campo DJ, Martínez Sánchez F, García PE, Rubio Arias JÁ, Cerezal AB, Clemente-Suarez VJ, et al. Body Composition Features in Different Playing Position of Professional Team Indoor Players: Basketball, Handball and Futsal. International Journal of Morphology 2014;32(4).*
11. *Suárez VC, Campo DR, González-Ravé JM. Modifications to body composition after running an alpine marathon: Brief clinical report. International SportMed Journal 2011;12(3):133-140.*
12. *Suárez VJC, Pérez JJR. Psycho-physiological response of soldiers in urban combat. Anales de Psicología/Annals of Psychology 2013;29(2):598-603.*
13. *Sánchez-Molina J, Robles-Pérez JJ, Clemente-Suárez VJ. Physiological Response of a Paratrooper Unit in Urban Combat.*
14. *Molina JS, Pérez JJR, Suárez VJC. Respuesta fisiológica de una unidad paracaidista en combate urbano. Archivos de medicina del deporte: revista de la Federación Española de Medicina del Deporte y de la Confederación Iberoamericana de Medicina del Deporte 2017(179):135-139.*
15. *Sandín B. El estrés: un análisis basado en el papel de los factores sociales. International Journal of clinical and health psychology 2003;3(1).*
16. *Sinex JE. Pulse oximetry: principles and limitations. Am J Emerg Med 1999 Jan;17(1):59-67.*
17. *Clemente-Suárez VJ. The application of cortical arousal assessment to control neuromuscular fatigue during strength training. J Mot Behav 2017;49(4):429-434.*
18. *Clemente-Suárez VJ, Delgado-Moreno R, González-Gómez B, Robles-Pérez JJ. Respuesta psicofisiológica en un salto táctico paracaidista HAHO: caso de Estudio. Sanidad Militar 2015;71(3):179-182.*
19. *Delgado-Moreno R, Robles-Pérez JJ, Clemente-Suárez VJ. Combat stress decreases memory of warfighters in action. J Med Syst 2017;41(8):124.*

Optimización de la cadena de suministro del Banco de Sangre y Tejidos de Aragón

Carrillo Ruiz, José Antonio[1,*], Sancho Val, José Joaquín[2], Domingo Morera, José María[3], Sancho Val, Luis Ignacio[4] y Pérez Aliaga, Ana Isabel[3]

[1] Secretaría General Técnica, Ministerio de Defensa, 28071 Madrid.

[2] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, 50090 Zaragoza.

[3] Banco de Sangre y Tejidos de Aragón, 50017 Zaragoza.

[4] Hospital Comarcal de Alcañiz, Área de Hematología y Hemoterapia, 44600 Alcañiz (Teruel).

* Autor principal y responsable del trabajo: jcarrillor@et.mde.es

Resumen

La gestión de los bancos de sangre y la optimización de sus recursos (sangre total, hematíes, plasma y plaquetas), es una cuestión sanitaria de extraordinaria importancia hoy en día, tanto en la sanidad civil como en la militar y, especialmente, en la sanidad militar de campaña. El hecho de que tanto la donación como la demanda sean estocásticas, sumado a las particularidades de los bancos de sangre (centralizados o descentralizados), del propio proceso de donación (obtención de sangre total, aféresis), de los donantes (número de donaciones y tiempo transcurrido entre ellas) y de la sangre (derivados obtenidos, diferentes usos y caducidades de los mismos), hace muy interesante el estudio de esta cadena de suministro estableciendo como objetivo prioritario ajustar la oferta y la demanda de los diversos componentes de una manera eficiente y diferenciada. La literatura científica dedicada a la gestión de la cadena de suministro de la sangre es abundante, pudiéndose clasificar en tres grandes categorías: simulación (teoría de colas, cadenas de Markov, eventos discretos, método de Montecarlo, etc.), análisis estadístico (regresión, análisis de supervivencia, ANOVA, etc.) e investigación operativa (programación lineal, entera o estocástica dinámica). El objetivo del presente trabajo es dar una solución matemática óptima, novedosa (inspirada en el Bin Covering Problem y en el Bin Packing Problem) y particular, a uno de los recursos sanguíneos de los bancos de sangre, la formación de concentrados de plaquetas, para su posterior aplicación a la gestión de la totalidad de estos recursos en la medicina militar de campaña, todo ello en el ámbito de las diferentes misiones internacionales en las que se ven inmersas nuestras Fuerzas Armadas.

Palabras clave

Banco de sangre, optimización, medicina militar de campaña.

1. Introducción

La donación de sangre es uno de los pilares básicos de la salud. Toda la asistencia quirúrgica, oncológica, de trasplantes y de los servicios de urgencias se sustenta, básicamente, en la disponibilidad de componentes sanguíneos. El aseguramiento de este suministro de componentes sanguíneos y hemoderivados necesita, entre otras cuestiones, de la solidaridad y generosidad de un colectivo de donantes sanos, altruistas y voluntarios [1]–[4]. Por ello, uno de los pilares del Plan Nacional de Hemoterapia, junto a la seguridad y el uso óptimo, es el autoabastecimiento de los mismos.

En líneas generales existen dos tipos básicos de donación: de sangre total (unos 450 cm^3) y de componentes (donación por aféresis). Cada uno de ellos tiene una serie de ventajas que los hacen más adecuados para unos u otros casos, siendo hoy en día absolutamente innegable que deben de coexistir la donación de sangre total y la de componentes para de ese modo ofrecer a los pacientes los mejores productos en tiempo, cantidad y calidad hemoterápica.

1.1. Concentrado de plaquetas

Uno de los componentes básicos de la sangre son las plaquetas, y su uso en medicina transfusional constituye hoy en día una opción insustituible a la hora de abordar el manejo de determinados pacientes tales como pacientes oncológicos y onco-hematológicos, hepatópatas, receptores de trasplantes de órgano sólido o politraumatizados entre otros. En los últimos años su consumo se ha ido incrementando progresivamente y de hecho la disponibilidad de concentrados de plaquetas en un banco de sangre es uno de los retos logísticos más relevantes a los que someterse cada día, dado que además su corta caducidad (7 días como máximo) obliga a adecuar de manera muy precisa la producción, intentando ajustarla lo más probable al consumo (hecho este sumamente variable y de difícil predicción) [5].

En este sentido la normativa existente define perfectamente los componentes sanguíneos y sus características; en el caso de los concentrados de plaquetas se puede hablar de:

1. Concentrado de mezcla de plaquetas: suspensión de plaquetas obtenida mediante procesamiento de varias unidades de sangre total, y su mezcla durante o después de la separación. Esta debe tener un volumen superior a 40 ml de plasma por cada 0,6 x 10^{11} plaquetas, lo cual hace que se sitúe alrededor de 250-300 cm^3 y su contenido plaquetar mayor a 3 x 10^{11}.
2. Concentrado de plaquetas obtenido por aféresis: componente sanguíneo que contiene plaquetas suspendidas en plasma, obtenido a partir de donante único mediante un equipo de separación celular. Debe tener un volumen superior a 40 ml de plasma por cada 0,6 x 10^{11} plaquetas, lo cual hace que se sitúe alrededor de 250-300 cm^3 y su contenido plaquetar mayor a 3 x 10^{11}.

En el caso de las plaquetas de aféresis hay que destacar que su obtención es directa, ya que en el propio acto de la donación son separadas del resto de componentes y transferidas a su correspondiente bolsa de almacenamiento. En la obtención de plaquetas a partir de sangre total existen varios condicionantes, que se detallan a continuación:

1. *Obtención:* la sangre del donante es recogida en una bolsa primaria que tiene unidas mediante tubulares, una, dos o tres bolsas satélites. Este procedimiento permite la separación dentro de un sistema cerrado sin que al pasar distintas fracciones a una u otra bolsa se rompa la integridad estéril del sistema. Los centros de transfusión cuentan también con dispositivos de conexión estéril que permiten la unión a través de los tubulares de bolsas que inicialmente están separadas, sin que se comprometa la esterilidad interior, es decir, manteniendo todo el circuito cerrado. Esto posibilita la modificación de los componentes que se separan primariamente.
2. *Separación*: para la preparación de componentes sanguíneos se aprovechan las diferencias de densidad de los distintos componentes de la sangre y por ello se somete la sangre total a centrifugaciones adecuadas al tipo de componente que se quiere obtener.

La centrifugación es el método por el cual se pueden separar los componentes de la sangre según su densidad. La centrifugadora, imprime un movimiento rotatorio con una fuerza de mayor intensidad que la gravedad provocando la sedimentación de los diferentes componentes. Para la separación de componentes sanguíneos se utilizan centrifugadoras refrigeradas con el objetivo de evitar el sobrecalentamiento de las bolsas de sangre debido a la fricción. Se recomienda utilizar centrifugadoras con cubetas basculantes porque producen líneas de separación células-líquido más nítidas que las cubetas de ángulo fijo para separar la máxima cantidad de plasma.

Otros factores que influyen en la sedimentación son el tamaño, la viscosidad del medio y la flexibilidad de las células. El tamaño, velocidad y tiempo de giro son las variables fundamentales en la preparación de componentes sanguíneos por centrifugación.

Si se utiliza una centrifugación inicial a baja velocidad, se consigue concentrado de hematíes y plasma rico en plaquetas que posteriormente se someterá a una segunda centrifugación fuerte para obtener concentrado de plaquetas y plasma pobre en células.

Si por el contrario se utiliza una centrifugación inicial a alta velocidad se consigue separar plasma pobre en plaquetas, plaquetas concentradas en la capa leucoplaquetaria o *buffy-coat* y concentrado de hematíes. Estas plaquetas son transferidas a una bolsa de transferencia específica denominada IPU (unidad inicial de plaquetas). Este último es el sistema que se utiliza en el Banco de Sangre objeto del presente trabajo.

3. *Selección de los IPU y obtención definitiva*: una vez separadas todas las unidades y habiendo sido analizadas conforme a la legislación vigente se procede a seleccionar las unidades que puedan dar lugar a un mejor aprovechamiento de las mismas, considerando tanto el grupo ABO y Rh como la riqueza celular (contenido plaquetario). El objetivo es conseguir el mayor número de unidades con recuentos de plaquetas mayor a 3×10^{11}, desechando el menor número de IPU para, de ese modo, obtener el mayor rendimiento a cada una de las colectas de sangre efectuadas.

2. Bin packing problem y bin covering problem

El *bin packing problem* y el *bin covering problem* (BCP) en sus diferentes variantes [6], son problemas muy estudiados dentro de la disciplina de la optimización combinatoria. En su forma más básica, el *bin packing problem* consiste en distribuir una lista de números reales en (0,1), entre un número mínimo de contenedores sin que los números asignados a cada contenedor sumen más de 1. Por su parte, el *bin covering problem* consiste en distribuir una lista de números reales en (0,1), entre un número máximo de contenedores, de tal forma que la suma de los números asignados a cada contenedor superen o igualen el valor 1.

Estos problemas son extremadamente importantes en la práctica y encuentran numerosas aplicaciones en problemas de programación, enrutamiento y asignación de recursos. Teóricamente los problemas, que alcanzan diferentes formas en función de la aplicación requerida, tienen conexiones ricas con la teoría de discrepancias, los métodos iterativos, el redondeo de entropía y han llevado al desarrollo de muy diversas técnicas algorítmicas [7]–[12].

3. Modelo matemático para la formación de concentrados de plaquetas

Sea un conjunto de IPUs, $I=\{x_1,x_2,...,x_n\}$. Cada IPU x_i, se caracteriza por su contenido plaquetar q_i. La suma de contenido plaquetar del conjunto I se define como la suma de los contenidos plaquetares de sus elementos, es decir:

$$SCP = \sum_{i=1}^{n} q_i \qquad (1)$$

Igualmente, se considera un conjunto indefinido de contenedores $P=\{P_1,P_2,...,P_m\}$. Cada contenedor p_j, se caracteriza por su capacidad c_j. En este modelo, el valor de la capacidad verifica $c_j \in C=\{3,3.1,3.2,...,4.5\}$
La pretensión del modelo para la formación de concentrados de plaquetas es la distribución de los IPU del conjunto I en un conjunto de contenedores del conjunto P. Desde un punto de vista físico, cuando como consecuencia de esta distribución, un conjunto de IPU de I $\{x_{j,1},x_{j,2},...,x_{j,nj}\}$, se asignan a un contenedor p_j, se dice que constituyen un concentrado de plaquetas[1]. Este concentrado de plaquetas se caracteriza por su recuento de plaquetas, denotado por RP, que se define como la suma del contenido plaquetar de los IPU que la forman. Si se denota por n_j el número de IPU que componen el concentrado p_j, se tiene:

$$RP_j = \sum_{i=1}^{n_j} q_{j,i} \qquad (2)$$

Los IPU que intervienen en cada instancia permiten establecer diferentes conjuntos de concentrados. No obstante, en el modelo que se propone, solo son de interés aquellos cuyo valor de recuento de plaquetas se incluye entre las capacidades de los contenedores, es decir aquellos que verifican $RP \subset C$. Y entre ellos, el modelo propone determinar el conjunto de concentrados formados a partir de I, que verifica el criterio de optimalidad con dos objetivos jerarquizados de forma lexicográfica definido por:

1. Maximizar el número de concentrados.
2. Maximizar el recuento de plaquetas de los concentrados.

4. Algoritmo para la formación de concentrados de plaquetas

El algoritmo que se presenta es un procedimiento exacto para la resolución de instancias del modelo para la formación de concentrados de plaquetas. Una instancia de este modelo queda determinada por el conjunto I de IPU, ya que el resto de elementos del modelo son constantes en todas las instancias. Fijada una instancia, uno de los elementos fundamentales para determinar la solución de la misma es la denominada tabla de recuentos objetivo.

3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4.3	4.4	4.5
10,53	10,19	9,88	9,58	9,29	9.03	8.78	8.54	8.32	8.10	7,9	7.71	7,52	7,35	7,18	7,02

Tabla 1. Tabla de recuentos objetivo

En ella se determina el número máximo de concentrados que se pueden formar al considerar la suma del contenido plaquetar del conjunto I. La determinación de estos valores se realiza mediante la expresión:

$$RO_i = \frac{SCP}{c_i} \qquad (3)$$

donde i recorre todos los valores del conjunto de capacidades C. Con estos datos se determina el llamado recuento objetivo, denotado por RO, que será el que se pretende que alcance el concentrado a construir en cada iteración del algoritmo. Así, en la tabla 1 se presenta la tabla de recuentos objetivos correspondientes a una

1 En lo que sigue, por simplicidad, y siempre y cuando no haya lugar a confusión, se hablará de «concentrado».

instancia de 56 IPU, cuya suma de contenido plaquetar es 31,6. En la primera fila de esta tabla aparecen los valores del conjunto de recuentos plaquetarios admitidos en un concentrado. En la segunda fila aparece el número máximo de concentrados (RO_i) que se podrían conseguir en función de la suma del contenido plaquetar de *I*. En la tabla 1 se puede apreciar cómo el número máximo de concentrados a conseguir es 10, si se considera un recuento plaquetario con valores 3,0 o 3,1. Siguiendo el criterio de optimalidad biobjetivo establecido en el modelo, el recuento plaquetario objetivo en este punto de resolución de la instancia correspondería al máximo de estos valores, es decir, a un recuento plaquetario de 3,1. Formalmente se tiene:

$$RO = max\left\{c_j : \left|\frac{SCP}{c_j}\right| = \left|\frac{SCP}{c_1}\right|\right\} \quad (4)$$

En la figura 1 se presenta una aproximación al seudocódigo del algoritmo que proporciona la solución de este modelo. Obsérvese cómo en la línea 06, los IPU que se asigna a un concentrado se eliminan del conjunto *I*. Conforme varía el conjunto I, lo hace la suma del contenido plaquetar, y en consecuencia puede hacerlo el valor *RO*. Esta circunstancia impone un cierto carácter dinámico a este modelo.

```
01: Inicio
02: While SCP ≥ 3
03:     Determinar RO;
04:     Formación del concentrado de con recuento RO;
05:         If Concentrado then
06:             Eliminar IPUs empleados de I;
07:             Determinar tabla de recuentos objetivos;
08:             Determinar RO;
09:         Else
10:             Eliminar RO de recuentos posibles;
11:         End if
12: End While
13: Fin
```

Figura 1. Seudocódigo del algoritmo solución.

5. Caso de estudio

Para la validación del modelo y de los resultados que arroja el algoritmo de resolución, se presenta el siguiente caso de estudio, aplicado a las donaciones recogidas (843 IPU) en el Banco de Sangre y Tejidos de Aragón durante el periodo comprendido entre el 4 y el 9 de junio de 2018 (a.i.). En la tabla 2 se muestra la distribución de estos según su contenido plaquetar (histograma en figura 2):

Contenido	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
Frecuencia	5	42	74	164	166	100	78	99	70	23	8	14
% Acumulado	0,48	5,46	14,25	33,73	53,44	65,32	74,58	86,34	94,66	97,39	98,34	100

Tabla 2. Contenido plaquetar de los IPU empleados en la experiencia computacional

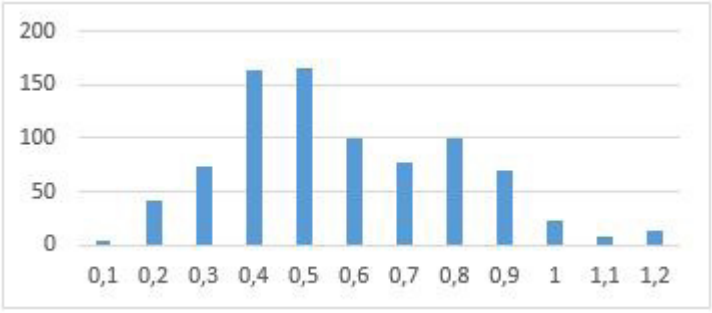


Figura 2. Histograma del contenido plaquetar de los IPU.

Esto supone la resolución de 48 instancias, ya que cada grupo AB0 y factor Rh se trata de forma diferenciada y constituye una instancia. De las potenciales 48 instancias, 5 resultan fallidas por no haberse recogido ningún IPU durante la donación, resultando, por tanto, 43 a resolver. La distribución de las instancias, según la dimensión de las mismas (número de IPU, denotado por *N*) y su suma de contenido plaquetar se puede apreciar en las tablas 3 y 4 respectivamente.

N	$N < 10$	$10 \leq N < 20$	$20 \leq N < 30$	$30 \leq N < 40$	$40 \leq N < 50$	$50 \leq N < 60$	$60 \leq N < 70$	$70 \leq N < 80$
Frecuencia	23	8	2	1	0	5	2	2

Tabla 3. Dimensión de las instancias

Concentración	$SCP < 3$	$3 \leq SCP < 6$	$6 \leq SCP < 10$	$10 \leq SCP < 20$	$20 \leq SCP < 30$	$30 \leq SCP < 40$	$40 \leq SCP < 50$
Frecuencia	15	8	7	3	2	4	4

Tabla 4. Suma de contenido plaquetar de las instancias

Con esta distribución se aprecia como de las 43 instancias disponibles, en 15 de ellas la suma de contenido plaquetar de los IPU disponibles es inferior a 3. Por ello no se tienen en cuenta en los resultados siguientes. Tras esta reducción de instancias, el número de las que se han resuelto es 28. De estas, 24 se han resuelto de forma óptima en todos los aspectos: máximo de concentrados, recuento plaquetar máximo y empleo de la totalidad de los IPU disponibles. La solución encontrada para las 4 instancias restantes ha sido la siguiente:

1. Instancia correspondiente a las donaciones del grupo 0- de la colecta del día 6: se dispone de 8 IPU, cuya suma de contenido plaquetar es 5,5. En consecuencia, el número máximo de concentrados es 1, que se consigue. Su recuento plaquetario es 4,3. Inicialmente cabría suponer que se puede mejorar hasta el umbral de 4,5. Sin embargo, al constatar que el contenido plaquetar de los IPU empleados en la formación de este concentrado son {0,7, 0,7, 0,7, 0,7, 0,7, 0,8} y que el correspondiente a los IPU no empleados son {0,6, 0,6}, se sigue que no es posible mejorar este recuento, por lo que cabe afirmar que, también en este caso, se ha alcanzado la solución óptima.
2. Instancia correspondiente a las donaciones del grupo B+ de la colecta del día 7: se dispone de 11 IPU, cuya suma de contenido plaquetar es 5,9, por lo tanto el número máximo de concentrados es 1. El recuento plaquetario del concentrado solución de la instancia es 4,5 y, por lo tanto, no es posible mejorarlo. Se trata, pues, de la solución óptima de la instancia.
3. Instancia correspondiente a las donaciones del grupo 0- de la colecta del día 7: se dispone de 9 IPU, con suma de contenido plaquetar 5,5. En consecuencia, el número máximo de concentrados a formar es 1. El recuento plaquetario del concentrado solución que se obtiene es 4,5 y, por lo tanto, no es susceptible de mejora. Se trata de la solución óptima.
4. Instancia correspondiente a las donaciones del grupo 0+ de la colecta del día 8: se dispone de 69 IPU, con suma de contenido plaquetar 41,7. El número máximo de concentrados a conseguir es 13, con recuento de plaquetas 3,2. La solución obtenida es la formación de 13 concentrados, de los que 12 presentan un recuento plaquetar de 3,2, mientras que el último tiene un recuento de 3,1. Todo ello empleando 68 de los IPU disponibles, desechando uno de contenido 0,2. En esta instancia, si bien se ha conseguido el número máximo de concentrados, no se puede hablar de solución óptima, ya que la agregación de este IPU a cualquiera de los concentrados (en todos ellos es posible hacerlo sin superar el umbral máximo) habría mejorado el recuento del mismo. Sin embargo, y debido a la complejidad que supone, este proceso debe independizarse de la fase de optimización y constituir una etapa de postoptimización incorporada al algoritmo[2].

En resumen, se ha obtenido la solución óptima en 27 de las 28 instancias resueltas.

Desde el punto de vista de la complejidad computacional, los tiempos precisos para la resolución de estas instancias no son relevantes, sobre todo si tenemos en cuenta los plazos de trabajo del propio Banco de Sangre. En concreto, la instancia que ha requerido mayor tiempo ha precisado de 14 segundos para su resolución.

2 Punto 1 de la sección 7. Investigaciones futuras.

6. Conclusiones

En esta ponencia se ha propuesto un algoritmo cuyo objetivo es determinar la solución óptima del modelo matemático de formación de concentrados de plaquetas. El caso de estudio desarrollado ha presentado un desempeño excelente, determianando la solución óptima en 27 de las 28 instancias empleadas. La número 28 ha puesto de manifiesto la conveniencia de extender este algoritmo con un fase de post-optimización. Esta fase, tras el estudio realizado, se encuentra bien caracterizada y forma parte de las investigaciones futuras detalladas en la próxima sección.

El modelo presenta características propias de los clásicos problemas de optimización combinatoria *bin packing problem* y *bin covering problem*, aunque podría conformar una nueva variante de este tipo de problemas.

7. Investigaciones futuras

El modelo presentado en esta ponencia es un primer paso de un modelo general de gestión de un banco de sangre. En su forma más básica, esta gestión tiene tres componentes principales: adquisición, conservación y suministro de componentes sanguíneos.

De estos tres elementos, el primero de ellos tiene un componente estocástico muy marcado. En el tercero, suministro, aparecen tanto necesidades programadas como no programadas. Igualmente, estas últimas poseen un fuerte carácter estocástico. Por su parte, la fase de conservación se caracteriza por ser determinista. En este contexto, en un futuro próximo se tiene previsto ampliar este trabajo en los aspectos siguientes:

1. Añadir al algoritmo una fase de postoptimización, cuya necesidad ha quedado patente en la experiencia computacional desarrollada.
2. Incorporar funciones de utilidad de los concentrados de plaquetas en función del recuento de plaquetas de los mismos.
3. Adecuar el número de concentrados formados a las solicitudes previstas y estimadas.
4. Plantear una restricción en cuanto al número de IPU que pueden conformar un concentrado de plaquetas.
5. Adaptar los resultados obtenidos a las características propias de la sanidad militar en general y a la sanidad de campaña en particular.

Referencias

1. *A. F. Osorio, S. C. Brailsford, and H. K. Smith, «A structured review of quantitative models in the blood supply chain: A taxonomic framework for decision-making,» Int. J. Prod. Res., vol. 53, no. 24, pp. 7191–7212, 2015.*
2. *E. Reynolds, C. Wickenden, and A. Oliver, «The impact of improved safety on maintaining a sufficient blood supply,» Transfus. Clin. Biol., vol. 8, no. 3, pp. 235–239, 2001.*
3. *W. Pierskalla, «Supply chain management of blood banks,» Oper. Res. Heal. care, 2005.*
4. *J. Beliën and H. Forcé, «Supply chain management of blood products: A literature review,» Eur. J. Oper. Res., vol. 217, no. 1, pp. 1–16, 2012.*
5. *M. Eskandari-Khanghahi, R. Tavakkoli-Moghaddam, A. A. Taleizadeh, and S. H. Amin, «Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty,» Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 71, no. June 2017, pp. 236–250, 2018.*
6. *A. S. Fukunaga and R. E. Korf, «Bin completion algorithms for multicontainer packing, knapsack, and covering problems,» J. Artif. Intell. Res., 2007.*
7. *H. L. Ong, M. J. Magazine, and T. S. Wee, «Probabilistic Analysis of Bin Packing Heuristics,» Oper. Res., 1984.*

8. *E. C. Jr, M. R. Garey, and D. Johnson, «Approximation algorithms for bin packing: A survey,» Approx. algorithms ..., 1996.*
9. *J. Csirik and G. J. Woeginger, «On-line packing and covering problems,» Springer, Berlin, Heidelberg, 1998, pp. 147–177.*
10. *C. Chekuri and S. Khanna, «On Multidimensional Packing Problems,» SIAM J. Comput., 2004.*
11. *R. Panigrahy, K. Talwar, L. Uyeda, and U. Wieder, «Heuristics for Vector Bin Packing,» Res. Microsoft, 2011.*
12. *J. Balogh, J. Békési, G. Dósa, L. Epstein, and A. Levin, «A new and improved algorithm for online bin packing,» in Leibniz International Proceedings in Informatics, LIPIcs, 2018, vol. 112.*

Efecto de la experiencia, equipamiento especial operativo y acciones de fuego en la respuesta psicofisiológica y memoria de soldados en operaciones subterráneas

José Francisco Tornero-Aguilera[1,2]; Vicente Javier Clemente-Suárez[1,2,3]

[1] Centro de Estudios de Combate Aplicado (CESCA). Toledo. Spain.

[2] Universidad Europea de Madrid. Facultad de Ciencias del Deporte.

[3] Grupo de Investigación en Cultura, Educación y Sociedad. Universidad de la Costa. Barranquilla. Colombia.

José Francisco Tornero-Aguilera; Facultad de Ciencias del Deporte. Calle Tajo s/n, 28670 Villaviciosa de Odón, Madrid, España e-mail: joseaguilera9@hotmail.com

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo analizar el efecto de las operaciones subterráneas en la respuesta psicofisiológica y de memoria en soldados teniendo en cuenta la experiencia, el uso de sistemas de visión nocturna y acciones de combate previas sobre la respuesta psicofisiológica. Se reclutaron setenta soldados y se dividieron en cuatro grupos, tres experimentales con diferentes condiciones experimentales, SSDV (soldados sin disparo visión), SDV (soldados disparo visión nocturna), SSDSV (soldados sin disparo sin visión), y un grupo de control, CSDSV (control sin disparo visión nocturna). Analizamos modificaciones en respuesta psicofisiológica y de memoria, antes y después de una operación subterránea. La operación subterránea produjo un aumento significativo ($p < 0,05$) en el lactato sanguíneo, la saturación de oxígeno en la sangre, el esfuerzo percibido, la frecuencia cardíaca, la ansiedad cognitiva y somática, así como un aumento en la modulación simpática en todos los grupos. Los grupos con valores de estrés más altos anotaron mayor número de ítems incorrectos en el cuestionario post-misión. La mayor activación psicofisiológica se correlacionó positivamente con deterioro cognitivo y menores índices de memoria. Concluimos que una operación subterránea produjo un aumento en la activación psicofisiológica y un efecto negativo en la memoria, siendo modulada por el entrenamiento previo y la experiencia. La falta de equipamiento especial operativo como sistemas de visión nocturna en operaciones subterráneas indujo una respuesta de estrés similar a las acciones de combate previas, disminuyendo la consciencia del tiempo.

Palabras clave

Estrés, experiencia, entrenamiento, excitación cortical, sistema nervioso autónomo, soldado.

1. Introducción

Los actuales teatros de operaciones militares se caracterizan por la combinación de dos tipos de combate, simétrico (área estructurada y enemigo definido) y asimétrico (desestructurado e indefinido en constante evolución con la presencia de civiles) [1]. Ambos escenarios presentan un elevado nivel de incertidumbre que causa un estado de ansiedad en los soldados debido a la sobre estimulación sensorial [2]. Sin embargo, los actuales escenarios de combate están evolucionando, así como la capacidad técnico-táctica de los insurgentes, destacando el uso de ataques sorpresa, ocultos, suicidas y nuevos campos de batalla como operaciones subterráneas, lo que obliga a los soldados a replantear la forma de enfrentar estas amenazas y nuevos escenarios [3]. Los investigadores centrados en estudios militares no han contemplado hasta ahora este nuevo escenario claustrofóbico, las operaciones subterráneas [4], a pesar de que se ha destacado el estrés inducido adicional de trabajar en lugares angostos, oscuros y claustrofóbicos como lo sería un alcantarillado, una trinchera, cueva o lugar cerrado [5].

La respuesta orgánica en estos entornos estresantes, como los saltos en paracaídas de combate o tácticos, se ha estudiado anteriormente mostrando aumentos en el sistema nervioso autónomo simpático, concentraciones de lactato en sangre, respuesta cardiovascular y muscular, regulación de la activación cortical y alteraciones en los procesos psicológicos que producen alteraciones en desregulación de la percepción y la memoria [6,7,8]. El uso de la tecnología en el Ejército está muy extendido, y se ha postulado que el uso de equipamiento especial parece tener un impacto positivo en la respuesta al estrés y la eficacia de la misión (9), mostrando el sistema de visión nocturna como uno de los elementos más efectivos y útiles para mejorar la confianza, seguridad y eficiencia del soldado [10].

Otros investigadores se han centrado en la importancia de la experiencia y el entrenamiento en la respuesta psicofisiológica del soldado, añadiendo que los soldados de élite presentan mayor activación metabólica, fuerza muscular y activación cortical que los soldados que no son de élite [11]. La experiencia y el entrenamiento parecen ser una pieza clave en otras profesiones de alto estrés como policías, bomberos [12], psicólogos [13] y atletas [14], ya que la experiencia y el entrenamiento modulan la respuesta psicofisiológica y la respuesta al estrés y tiene una fuerte influencia en la percepción de la acción [11,15].

Por lo tanto, realizamos el presente estudio para analizar, i. el efecto de las operaciones subterráneas en la respuesta psicofisiológica y de memoria de los soldados, ii. el efecto de la experiencia en la respuesta psicofisiológica en operaciones subterráneas, iii. el efecto de los sistemas de visión nocturna en la respuesta psicofisiológica en operaciones subterráneas y iv, el efecto de acciones de combate previas sobre la respuesta psicofisiológica en operaciones subterráneas. Planteamos la hipótesis de que las operaciones subterráneas aumentarían la respuesta psicofisiológica que afecta negativamente a las funciones de la memoria, que los soldados experimentados presentarían una respuesta psicofisiológica más alta y que la falta de sistemas de visión nocturna afectaría negativamente el conocimiento del tiempo y la memoria. Finalmente, hipotetizamos que las acciones de combate previas a la simulación aumentarían la respuesta psicofisiológica de los soldados.

2. Desarrollo

2.1. Participantes

Se reclutó una muestra de 70 soldados. Cincuenta y cuatro de ellos eran soldados profesionales del Ejército español (edad media de 30,60 ± 4,6 años, estatura 175,8 ± 8,2 cm, masa corporal de 82 ± 13,4 kg, 8,85 ± 4,1 años de experiencia profesional en su unidad, 3,33 ± 3,8 años en el ámbito internacional) y 16 eran civiles (edad media 26 ± 3 años, altura 174,2 ± 2,9 cm, masa corporal 77,0 ± 9,0 kg, sin experiencia militar).

La muestra se dividió en los siguientes grupos experimentales: soldados experimentados sin acción de fuego real anterior a la maniobra subterránea realizada con un sistema de visión nocturna; (soldados sin disparo visión nocturna - SSDV: n = 16; edad media 30,81 ± 5 años, altura 174,1 ± 8 cm, masa corporal 80,3 ± 11,8 kg, 11,63 ± 4,8 años de experiencia profesional, 4,94 ± 5,03 años en misiones internacionales); soldados experimentados con acción de fuego real anterior a la maniobra subterránea realizada con un sistema de visión nocturna (soldados disparo visión nocturna - SDV: n = 16; edad media 30,81 ± 5,3 años, altura 177,2 ± 10 cm, masa corporal 83,6 ± 18,3 kg, 9,38 ± 1,7 años de experiencia profesional, 4,25 ± 3,7 años en misiones internacionales); soldados experimentados sin acción de fuego previa que llevaron a cabo la maniobra subterránea sin sistema de visión nocturna (soldados sin disparo sin visión nocturna- SSDSV, n = 16; edad media 30,26 ± 4 años, altura 175,6 ± 7,2 cm, masa corporal 82,0 ± 10,6 kg, 6,57 ± 3,4 años de experiencia profesional, 1,57 ± 1,9 años en misiones internacionales); no soldados (civiles), sin experiencia militar que realizaron la maniobra subterránea con sistema de visión nocturna (control sin disparo visión nocturna - CSDV: n = 16, edad media 26 ± 3 años, altura 174,2 ± 2,9 cm, masa corporal 77,0 ± 9,0 kg).

Todos los participantes fueron equipados con botas, carga táctica, armadura, fusil HK G36 simulado, cuchillos simulados, grilletes y una mochila con 12 kg para simular el peso equivalente al equipamiento de combate en este tipo de operaciones, el peso total para cada participante fue de 23,6 kg, a excepción del grupo CNFV que llevó a cabo la simulación sin rifle HK G36, por lo tanto, llevaron 20 kg. Esta investigación cumplió con los principios de la Declaración de Helsinki. El consentimiento informado se obtuvo de cada participante y los procedimientos fueron aprobados por la Sede de la Unidad.

2.2. Procedimientos

Se utilizó un diseño pre-post de sección transversal para minimizar las diferencias individuales de los participantes como en estudios previos en este tipo de población [6; 7; 8; 11]. La variable independiente era la maniobra subterránea y contenía dos momentos de evaluación: antes y después. La simulación se realizó de acuerdo con las acciones reales ocurridas en los teatros de operaciones. La simulación consistió en una acción de combate real llevada a cabo en unidades de 4 soldados. Los soldados tuvieron que lidiar con enemigos terroristas armados que dispararon un convoy de fuerzas aliadas, huyendo de inmediato a una alcantarilla. La unidad recibió órdenes de capturar al terrorista evitando una posible emboscada. Las unidades deben correr hacia la alcantarilla llevando a cabo acciones de cuerpo a cuerpo y de rodilla a tierra simulando el funcionamiento persecutorio (usado como calentamiento de activación para evitar lesiones en la maniobra). Luego, fueron a la alcantarilla para tratar de capturar a los terroristas, donde deben lidiar con un número incierto de enemigos terroristas armados con fusiles Kalashnikov, cuchillos ocultos, artefactos explosivos improvisados (IED) y espacios estrechos.

Las siguientes variables dependientes se analizaron antes e inmediatamente después de la simulación:

- Escala de esfuerzo percibido (RPE), escala Borg 6-20.
- FC y la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) medida durante toda la maniobra por un monitor Polar V800 HR (Kempele, Finlandia).
- La concentración de lactato en sangre. Usamos el sistema Lactate Pro 2 (Lactate Pro Arkay, Inc. (Kyoto, Japón) siguiendo el procedimiento de investigaciones previas [11].

- Fuerza isométrica, presión manual con dinamómetro TKK. 5402 (Takei Scientific Instruments CO. LTD).
- Estimulación con medida por el umbral de fusión crítica Flicker (CFFT) según investigadores previos [6, 11].
- La temperatura corporal (T) se midió con un termómetro infrarrojo digital (Temp Touch, Xilas Medical, San Antonio, TX).
- Saturación de oxígeno sanguíneo (SO) y frecuencia cardíaca (FC) mediante un pulsioxímetro (PO 30 Beurer Medical).
- Ansiedad cognitiva (CA), autoconfianza (SC) y ansiedad somática (SA), se evalúan 17 ítems, (CA) 5 ítems, (SA) 7 ítems y (SC) 5 ítems respectivamente. La respuesta evaluó la intensidad de cada síntoma en una escala de 1 (nada) a 4 (mucho). Los puntajes más altos en las subescalas de ansiedad cognitiva y somática indicaron un mayor nivel de ansiedad, mientras que las puntuaciones más altas en la subescala de autoconfianza indicaron un mayor nivel de confianza en sí mismos.
- Estado ansiedad fue evaluada utilizando cuestionario STAI.
- La atención y la memoria se evaluaron mediante un cuestionario post-misión.

2.3. Resultados

Las variables de lactato sanguíneo, SO, FC y RPE presentaron aumentos significativos en todos los grupos después de la maniobra. SSDV, SDV y SSDSV mostraron un aumento significativo en la fuerza isométrica de mano, la temperatura corporal y la ansiedad somática. Además, el grupo de SDV presentó una disminución significativa en los valores de CFFT. Además, los aumentos significativos en CA y STAI-AE también se mostraron en el grupo SSDV.

Los grupos SSDV, SDV y SSDSV presentaron una línea de base RMSSD más baja en comparación con el grupo de control (CSDV). SDV y CSDV mostraron un aumento significativo en LF durante la operación subterránea en comparación con los momentos iniciales y de activación.

El cuestionario posterior a la misión mostró cómo el grupo SDV presentaba el puntaje incorrecto más alto de todos los grupos de soldados (SSDV, SDV y SSDSV). SSDV presentó la proporción más alta de respuesta correcta. CSDV mostró el puntaje incorrecto más alto de todos los grupos, mientras que el SSDSV mostró la mayor pérdida de conocimiento del tiempo.

El análisis de correlaciones mostró correlaciones positivas entre post HF vs respuesta correcta, CA y SA vs respuesta incorrecta, lactato post vs FC post y consciencia temporal, fuerza de mano post vs consciencia temporal. Finalmente, se encontró una correlación negativa entre los valores LF post vs respuesta correcta y fuerza de mano.

3. Discusión

El presente estudio tuvo como objetivo analizar el efecto del sistema de visión nocturna y las acciones de combate previas sobre la respuesta psicofisiológica y de memoria en una operación subterránea en soldados y civiles con diferente experiencia. Las hipótesis iniciales se cumplieron parcialmente ya que la operación subterránea tuvo un efecto negativo en la memoria, los grupos experimentados no presentaron la activación psicofisiológica más alta y la falta de visión nocturna produjo una disminución significativa de la conciencia del tiempo. Finalmente, la acción de combate previa aumentó la respuesta psicofisiológica.

Los valores de concentración de lactato fueron más altos después de la operación subterránea, alcanzando valores por encima del umbral anaeróbico [11] en todos los grupos, alcanzando valores similares a los corredores de élite profesionales de 400 m [7]. El lactato sanguíneo es uno de los parámetros más utilizados para delimitar la intensidad de la actividad física y presenta una correlación con RPE [14]. Sin embargo, se encontró un fallo en la interpretación de la RPE por parte de los soldados en todos los grupos estudiados cuando se comparó con los valores de lactato. Este hecho podría estar relacionado con el

efecto negativo del aumento de la activación simpática en las estructuras corticales, como el hipocampo y las áreas cerebrales relacionadas con el procesamiento de la información [14]. Este hecho, demuestra que los sujetos no eran plenamente conscientes de la inmensa carga de trabajo de la operación subterránea. Se encontraron resultados similares en los soldados que realizaron simulaciones de combate urbano [6-8]. Sin embargo, los estudios antes mencionados no consideraron el efecto de la acción de combate previa y el sistema de visión nocturna. Como tal, las acciones de combate previas dieron como resultado una respuesta fisiológica más alta, reportando SDV mayor y SSDSV los menores valores de lactato. Mientras SSDSV, debido a la imposibilidad de poder discernir el terreno y las posibles amenazas debido a la falta de visión nocturna en el alcantarillado, resultó en un trabajo realizado a menor intensidad, por ende presentando valores de lactato más bajos que el resto de los grupos que sí usaron sistemas de visión nocturna.

Estudios previos reportaron aumentos en la modulación simpática debida al estrés de combate, así como en saltos en paracaídas a gran altitud, ambos mostrando una activación del reflejo innato «lucha y huida» así como un aumento en la producción de fuerza [8]. En este sentido, el grupo SDV presentó el mayor aumento de fuerza significativo, hecho atribuido a la mayor activación psicofisiológica debido a la acción de fuego real llevada a cabo antes de la simulación de combate. Finalmente, el mantenimiento de los valores de fuerza en CSDV podría explicarse por la menor activación psicofisiológica y la falta de estrés de combate. La reminiscencia de la activación simpática también se pudo observar en los incrementos de FC en todos los grupos de estudio. Los altos valores de FC no se correspondían con el esfuerzo físico desarrollado en la operación subterránea ya que la simulación se realizó caminando y con varias paradas, resultado similar al de los estudios de combate asimétrico [1, 7]. Los incrementos significativos en la FC en todos los grupos fueron de acuerdo con la literatura anterior en simulaciones de combate, simétricos y asimétricos, así como saltos tácticos de altura en paracaídas [7]. Sin embargo, la FC basal del SDSV, SDV y SSDSV fue significativamente menor que el CSDV, lo que representa una mejor condición cardiovascular, resultados similares a los de los atletas entrenados [6]. La FC también fue menor después de la operación subterránea en SDNV, SDV y SSDSV, mostrando una mejor adaptación cardiovascular por el entrenamiento de combate específico continuo de estos grupos. La respuesta de FC del CSDV se atribuye a la respuesta de ansiedad anticipada [14]. Finalmente, las acciones de combate previas a la simulación de combate aumentaron la respuesta de la FC ya que SDV presentó el mayor incremento cardiovascular de todos los grupos con experiencia.

El análisis de VFC mostró una mayor actividad simpática, ya que los valores de LF aumentaron significativamente desde la línea basal a la operación subterránea de combate. Este aumento está relacionado con la imposibilidad de controlar todas las posibles amenazas de vida ocurridas en este contexto [8], siendo similares a las evaluadas en simulaciones de combate urbano y cuerpo a cuerpo [1]. La modulación simpática más alta del SDV durante la operación subterránea podría explicarse por las acciones de disparos previos que aumentaron la respuesta al estrés. Además, la línea de base RMSS presentó valores significativamente más bajos en SDNV, SDV y SSDSV que el grupo de control civil (CSDV), un hecho posiblemente explicado por la respuesta de ansiedad anticipatoria y la alta activación del sistema nervioso simpático de la población de soldados debido a la exposición continua al estrés, hecho relacionado con psicopatologías como síndrome postraumático [15].

El contexto de estrés de la operación subterránea produjo en todos los grupos una respuesta psicológica ansiogénica como el aumento significativo en SA mostró. El CSDV presentó los mayores valores pre STAI-AE y SA, así como en paracaidistas sin experiencia, judokas y tenistas [6] antes de la competición. El grupo SSDSV presentó aumentos significativos en los valores SA, SC, CA y STAI-AE, probablemente debido a la falta de sistema de visión nocturna, en este sentido, autores habían reportado que trabajar en condiciones claustrofóbicas, de oscuridad y estrechez tiene un efecto negativo sobre los marcadores de estrés psicológico. SFV presentó la SA más alta de todos los grupos experimentales. La exposición al estrés también ha producido deterioro cognitivo [14], hecho evaluado en CSDV que presentó el mayor número de respuestas incorrectas en el cuestionario post misión. Se evaluó una respuesta similar en SDV que presentó significativamente el mayor número de respuestas incorrectas de todos los grupos

experimentales, hecho probablemente atribuido al estrés inducido de la acción de combate anterior que afectó negativamente la memoria de trabajo y el procesamiento de la información. Finalmente, el estrés también disminuye la conciencia del tiempo, efectos que se incrementan en espacios estrechos claustrofóbicos [14], que es consecuente con nuestros datos ya que el SDNV pérdida de la conciencia de tiempo de todos los grupos.

En cuanto al análisis de correlación, la mayor activación psicofisiológica se correlacionó con el deterioro cognitivo y el menor rendimiento de la memoria. Esta información nos lleva a pensar que la operación subterránea produjo una mayor activación psicofisiológica y produjo un efecto negativo en la memoria.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos nos permiten mejorar el conocimiento sobre las respuestas psicofisiológicas en situaciones de alto estrés, así como de los nuevos escenarios de combate, tales como operaciones subterráneas. La capacitación y entrenamiento en espacios de simulación mejoraría la respuesta psicofisiológica, ya que con estas intervenciones la respuesta orgánica sería menor y más adaptable a las situaciones, permitiendo mejorar las tácticas y maniobras de los nuevos escenarios subterráneos. Además, podría proponerse una readaptación de la escala RPE para población militar. En conclusión, una operación subterránea produjo un aumento en la activación psicofisiológica y un efecto negativo en la memoria, siendo modulada por el entrenamiento previo y la experiencia. La falta de equipo especial como sistemas de visión nocturna en operaciones subterráneas indujo una respuesta de estrés similar a las acciones de combate previas, disminuyendo la concisión del tiempo.

Referencias

1. *Clemente-Suárez, V.J., Robles-Pérez, J.J. (2012a). Organic response in a combat simulation. Sanidad Militar, 68(2), 97-100.*
2. *Martens, R., Vealey, R. S., & Burton, D. (1990). Competitive anxiety in sport. Human kinetics.*
3. *Mirror (2016) Inside ISIS terror tunnels: Iraqi army stunned to find secret underground military base. Retrieved at : http://www.mirror.co.uk/news/world-news/inside-isis-terror-tunnels-iraqi-8075560*
4. *Daily Mail (2016). Inside the tunnels where jihadis fought to the DEATH: Peshmerga forces discover10ft-deep secret labyrinth used by ISIS fighters to hide out before detonating suicide bombs to avoidcapture. Retrieved at : http://www.dailymail.co.uk/news/article-3626120/Hidden-network-ISIS-tunnelsjihadis-live-weeks-underground-avoid-caught Peshmerga-forces.html#ixzz4iHFOiRW3*
5. *Wada, Y., & Sakugawa, H. (1990). Psychological effects of working underground. Tunnelling and Underground Space Technology, 5(1-2), 33-37.*
6. *Clemente-Suárez VJ, Robles-Pérez JJ (2012b). Analysis of physiological markers, cortical activation and strength manifestations in a simulated combat. Archivos de Medicina del Deporte. 2012; (149): 594-600.*
7. *Clemente-Suárez, V. J. (2017e). The application of cortical arousal assessment to control neuromuscular fatigue during strength training. Journal of motor behavior, 49(4), 429-434.*
8. *Clemente-Suárez, V.J., Robles-Pérez, J.J. (2013a). Psycho-physiological response of soldiers in urban combat. Annals of Psychology, 29(2), 598-603.*
9. *Brill, J. C., Gilson, R. D., Mouloua, M., Hancock, P. A., & Terrence, P. I. (2005). Increasing situation awareness of dismounted soldiers via directional cueing. Human Performance, Situation Awareness, and Automation: Current Research and Trends, 1, 130-132.*
10. *Ghazal, T., Morley, R., Terry, E., & Klingaman, R. (2003, April). Soldier tactical mission system combat effectiveness. In Systems and Information Engineering Design Symposium, 2003 IEEE (pp. 153-156). IEEE.*

11. *Tornero-Aguilera JF, Clemente-Suárez, V. and Robles-Pérez, J. (2017). Effect of combat stress in the psychophysiological response of elite and non-elite soldiers. The Journal of Medical Systems. Jun;41(6):100. doi: 10.1007/s10916-017-0748-x.*
12. *Pecena, Y., Keye, D., Conzelmann, K., et al., 2013. Predictive validity of a selection procedure for air traffic controller trainees. Aviaton Physiology Applied Human Factors 3, 19–27.*
13. *Beltrán-Velasco, A. I., Bellido-Esteban, A., Ruisoto-Palomera, P., & Clemente-Suárez, V. J. (2018). Use of Portable Digital Devices to Analyze Autonomic Stress Response in Psychology Objective Structured Clinical Examination. Journal of medical systems, 42(2), 35.*
14. *Tornero-Aguilera, J. F., & Clemente-Suarez, V. J. (2018). Effect of experience, equipment and fire actions in psychophysiological response and memory of soldiers in actual underground operations. International journal of psychophysiology, 128, 40-46.*
15. *Tornero-Aguilera, J. F., Robles-Pérez, J. J., & Clemente-Suárez, V. J. (2018). Use of psychophysiological portable devices to analyse stress response in different experienced soldiers. Journal of medical systems, 42(4), 75.*

Análisis metrológico de los efectos biomecánicos y fisiológicos en la valoración de chalecos antibala

Bernal Guerrero, Manuel[1], Alonso Díaz, Sagrario[1], de Lucas Veguilla, Javier[1]

[1] Laboratorio de Factores Humanos y Laboratorio de Temperatura y Humedad del Centro de Metrología y Calibración del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas», INTA.

* Email: bernalgm@inta.es: MBG.

Resumen

Se presentan los resultados de un análisis metrológico en el área de los factores humanos de los efectos biomecánicos y fisiológicos que se aprecian sobre los sujetos que visten un chaleco antibala. Se han analizado tres modelos de chaleco de protección antibala de los utilizados por los cuerpos de seguridad del estado, apreciándose en el estudio que el hecho de vestir una de estas prendas de protección personal, puede alterar en los sujetos que los portan algunas de sus variables fisiológicas, además de limitar sus movimientos habituales.

La componente del factor humano en la operatividad de los chalecos antibala puede resultar casi tan importante como la componente técnica, ya que el usuario final será un sujeto del cual habrá que valorar los efectos fisiológicos o limitaciones biomecánicas como consecuencia de su uso, bien sea de cada chaleco usado de forma individual, o valorando los efectos sobre el sujeto del chaleco en conjunto con el resto de equipación de forma conjunta.

El estudio de laboratorio que se presenta, ha sido realizado por participantes que han valorado tres modelos de chaleco, y los ensayos han consistido en una prueba de esfuerzo con la medida de ciertas variables fisiológicas de cada participante, y una prueba biomecánica con medida de la limitación de movimientos de cada modelo de chaleco. El tipo de análisis que se efectúa consiste en comparar los datos obtenidos en la situación del participante con chaleco, frente al mismo participante sin chaleco, registrándose los incrementos o decrementos de dichas variables. Las variables medidas en laboratorio han sido la frecuencia cardiaca, frecuencia respiratoria, temperatura corporal superficial y limitaciones de ángulos.

A partir de los resultados de laboratorio, se obtienen conclusiones sobre los cambios que se producen en ciertas variables fisiológicas y biomecánicas, por el hecho de que el participante se equipe con un chaleco antibala.

Palabras clave

Factores humanos, biomecánica, fisiología, temperatura, metrología.

1. Introducción

Desde la antigüedad, el ser humano ha tenido la necesidad de proteger su cuerpo de los agentes externos como son el clima, el entorno, animales, o agresiones de otros seres humanos. Al principio empleó pieles para cubrirse, luego con la evolución confeccionó prendas de vestir más elaboradas con tejidos de origen animal o vegetal, permitiéndole una mayor adaptación de esta vestimenta a su cuerpo, además de seleccionar aquellos materiales que le proporcionaban mayor confort. De alguna forma estaba consiguiendo con esta selección y adaptación, situar al sujeto en el centro del proceso, estaba teniendo en cuenta el factor humano, ya que buscaba optimizar con los materiales que disponía en su entorno la relación entre el sujeto y el medio, y el sujeto y su equipamiento. Si tomamos como ejemplo el equipamiento típico de las legiones romanas entre el siglo I-III, descrito por Renato Flavio Vegecio en su trabajo *Compendio de Técnica Militar* [1], indica que aparte de las armas que portaba cada legionario, este se protegía con una armadura ya fuera la *lórica segmentada* (metálica) o la *lórica hamata* (cuero), un escudo y un casco. El mismo Renato Flavio también recomienda que cada soldado cargue con un peso máximo durante las marchas equivalente a 19,6 kilogramos, y que sea capaz de recorrer 32 km en 5 horas, estableciendo con ello unos criterios de capacidad de esfuerzo exigido a cada soldado, medidos en unidades, se estaba aplicando por tanto la metrología. A partir de estos textos y de autores posteriores se muestra la existencia de una relación directa entre la adecuada equipación del sujeto y el rendimiento que puede ofrecer este en el desempeño de una tarea, estableciendo con ello unas exigencias estudiadas en función de la capacidad natural del sujeto y del entorno, valorándose cuantitativamente la carga que este puede portar, distancias a recorrer, alimentación que debe de ingerir. En definitiva se comienzan a aplicar criterios metrológicos, al tratarse de unidades de medida como son el peso, longitud, tiempo, etc., siendo los criterios aplicados entonces, la base de lo que conocemos en la actualidad por factores humanos.

En la actualidad el ser humano sigue buscando optimizar la relación existente entre el sujeto y el medio, y el sujeto y su equipamiento, apoyándose para ello en la tecnología actual que permite la medida de variables fisiológicas que anteriormente no era posible medir, como son la frecuencia cardiaca, frecuencia respiratoria, temperaturas corporales; además de medidas biomecánicas de ángulos abarcados o permitidos en los movimientos, tiempos de reacción, etc...

2. Desarrollo

Aplicando las tecnologías actuales se planteó un ensayo en el Laboratorio de Factores Humanos del INTA, para comprobar si por el hecho de que un profesional perteneciente a los cuerpos y fuerzas de seguridad del estado incorpore en su uniforme de trabajo habitual un chaleco de protección balística, modifica y tiene efecto en alguna de sus variables fisiológicas, además de afectar en la libertad de movimientos de sus extremidades superiores. Previo a establecer los ensayos a realizar y seleccionar las variables a medir en laboratorio sobre una muestra de sujetos voluntarios, se realizaron dos investigaciones:

1. Una *investigación exploratoria* recopilando toda la información relativa al ensayo a realizar, y más concretamente en las posibles variables fisiológicas y biomecánicas a medir en laboratorio [2, 3], para posteriormente determinar y proponer los equipos de medida que se utilizarán, así como la secuencia de pruebas a realizar.
2. Una *investigación confirmatoria.* Para ello se ha tomado una muestra de dos sujetos experimentales y se ha realizado una prueba de esfuerzo y otra biomecánica, monitorizando algunas de sus variables fisiológicas y midiendo los ángulos limitantes de movimientos, para comparar posteriormente los resultados obtenidos con y sin chaleco antibala, con el fin de confirmar que la incorporación de un chaleco antibala a la uniformidad habitual puede afectar en la respuesta fisiológica y biomecánica del sujeto.

2.1. El ensayo de laboratorio

Para analizar los posibles efectos fisiológicos o limitaciones en los movimientos del tronco superior, por el hecho de vestir un chaleco de protección balística un profesional de los cuerpos de seguridad del estado, se planteó un ensayo de laboratorio sobre una muestra de dos sujetos a los cuales se les midieron variables fisiológicas, y ángulos máximos abarcados por movimientos del tronco superior. Se tomaron como base para el estudio tres modelos de chalecos de protección balística y fueron necesarias 4 sesiones de laboratorio, de aproximadamente 5 horas cada una. Con este ensayo además se ha perseguido incorporar la metrología como ciencia al proceso de evaluación. Cuantificando por medio de la medida de variables fisiológicas con sensores y ángulos de movimientos predefinidos, la respuesta humana ante la incorporación sobre la vestimenta habitual de chalecos antibala.

2.1.1. Los sujetos voluntarios para realizar el ensayo

El ensayo fue realizado por dos sujetos voluntarios que denominaremos a efectos de este estudio como «sujeto 1» y «sujeto 2», ambos pertenecientes a las fuerzas de seguridad del estado, cuyas edades son 23 y 22 años respectivamente, en perfecto estado físico y habituados a la utilización de chalecos de protección balística. En cuanto al número de sujetos de la muestra, resultan ser los suficientes pues se trata de comprobar si existen variaciones significativas en las variables fisiológicas y biomecánicas que se les han medido. Si tras analizar los resultados, se comprueba que existen tales variaciones entre la condición SIN CHALECO frente a CON CHALECO, se propondría la realización de este ensayo como base para estudios más completos sobre muestras de 30 sujetos.

2.1.2. Chalecos utilizados en el ensayo

Para realizar el ensayo de laboratorio, se seleccionaron tres chalecos de protección balística de los utilizados por los cuerpos de seguridad del estado denominándose:

a) Chaleco 1: chaleco modelo 2007 (figura 1).

Figura 1. Chaleco 1.

b) Chaleco 2: chaleco interno modelo 2015 (figura 2).

Figura 2. Chaleco 2.

c) Chaleco 3: chaleco modelo 2017 (figura 3).

Figura 3. Chaleco 3.

Los ensayos se realizaron con los chalecos sin placas de protección cerámicas adicionales.

Se eligieron tres modelos de chaleco fabricados dentro de un intervalo de 10 años, con el fin de estudiar también si se había producido alguna evolución en su diseño, en cuanto a sus efectos sobre mayor facilidad de movimientos, o menor esfuerzo físico requerido al sujeto que lo viste.

2.1.3. Ensayo fisiológico

Se quería comprobar en primer lugar si un sujeto sometido a un esfuerzo físico vistiendo un chaleco de protección balística sobre su uniforme habitual, modificaba alguna de sus variables fisiológicas con respecto al mismo esfuerzo físico, pero sin vestir el chaleco de protección. Además se planteó el ensayo utilizando tres modelos de chaleco diferentes para comprobar si la respuesta era similar o también dependía del modelo de chaleco utilizado. Las variables fisiológicas que se midieron en cada sujeto fueron:

- Temperatura superficial en el pecho del sujeto.
- Frecuencia cardiaca.
- Frecuencia respiratoria.

A continuación se describe el ensayo realizado donde se miden en primer lugar las variables fisiológicas del sujeto realizando una prueba de esfuerzo SIN CHALECO. Posteriormente tras un periodo de descanso de ½ hora, se repite la misma prueba de esfuerzo CON CHALECO, evaluando sucesivamente cada uno de los modelos de chaleco, siempre dejando un periodo de descanso entre ensayo de ½ hora.

a) Medida de variables fisiológicas basales:

La secuencia del ensayo comienza con el primer sujeto experimental monitorizado con sensores y vestido con su uniforme reglamentario SIN CHALECO. El equipo utilizado para monitorizar las variables fisiológicas es el MP-150 de la casa comercial BIOPAC, el cual dispone de sensores inalámbricos que son colocados sobre diferentes partes del cuerpo del sujeto, para medir temperatura corporal (figura 4),

frecuencia respiratoria (figura 5) y frecuencia cardiaca (figura 6). Para medir las constantes fisiológicas basales de cada sujeto se realizó el siguiente ensayo de laboratorio:

- 2 minutos sentado en reposo;
- 3 minutos andando en cinta de correr a una velocidad de 5,5 km/h;
- 9 minutos corriendo en cinta de correr a una velocidad de 9 km/h;
- 2 minutos sentado en reposo.

Figura 4. Medida de temperatura.

Figura 5. Medida de frecuencia respiratoria.

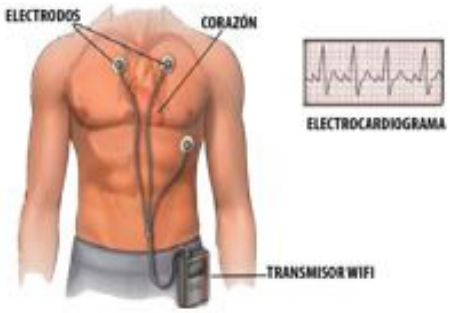


Figura 6. Medida de frecuencia cardiaca.

Se muestra a modo de ejemplo en la figura 7 a un sujeto monitorizado sobre cinta de correr SIN CHALECO.

Figura 7. Medida de constantes fisiológicas sin chaleco.

El ensayo comienza con el «sujeto 1», el cual una vez terminada la captura de datos fisiológicos, se le desconectan los sensores y comienza un periodo de descanso. A continuación se monitoriza al «sujeto 2» repitiendo la misma prueba sobre cinta de correr que el «sujeto 1».

b) Medida de variables fisiológicas con chaleco 1, chaleco 2 y chaleco 3:

Seguidamente, una vez terminada la captura de datos del «sujeto 2» en la condición SIN CHALECO, se vuelve a monitorizar al «sujeto 1» pero en la condición de CON CHALECO. Para ello se instalan de nuevo los sensores de captura de variables fisiológicas, y se viste con el uniforme reglamentario, además de incorporar el «chaleco 1» (Figura 8), repitiendo la siguiente secuencia:

- 2 minutos sentado en reposo;
- 3 minutos andando en cinta de correr a una velocidad de 5,5 km/h;
- 9 minutos corriendo en cinta de correr a una velocidad de 9 km/h;
- 2 minutos sentado en reposo.

Figura 8. Medida de constantes fisiológicas con chaleco.

- Una vez terminada la captura de datos del «sujeto 1», se le desconectan los sensores y comienza un periodo de descanso. A continuación se monitoriza al «sujeto 2» que repite la misma prueba sobre cinta de correr que el «sujeto 1». Esta secuencia se repite hasta completar el ensayo con «chaleco 2» y «chaleco 3».

2.1.4. Ensayo biomecánico

El ensayo biomecánico consiste en la medida de los ángulos máximos abarcados por el sujeto experimental cuando realiza cada uno de los 7 movimientos predefinidos del tronco superior realizando el ensayo en la condición SIN CHALECO, frente a la condición CON CHALECO. En la figura 9, se muestra un esquema de desarrollo del «movimiento 2» a modo de ejemplo.

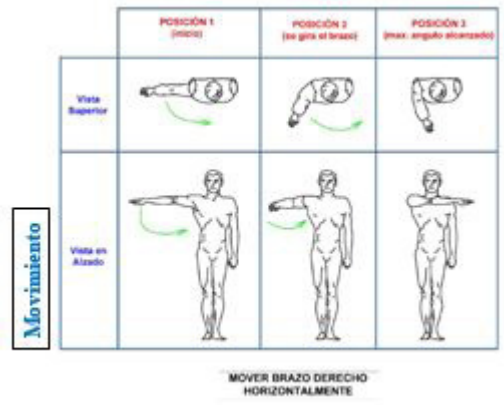


Figura 9. Descripción gráfica del movimiento 2.

El objetivo del ensayo es comprobar, si el hecho de vestir un chaleco de protección balística limita en ángulo alguno de los 7 movimientos realizados, y cuantificar la diferencia. Para realizar dicho ensayo se ha utilizado un equipo de captura de movimientos en 3D, llamado comercialmente como Kinescan y fabricado por el Instituto de Biomecánica de Valencia, del cual el Laboratorio de Factores Humanos dispone de una unidad con 6 cámaras para captura del movimiento. La forma de realizar la medida de los ángulos de cada movimiento predefinido consiste en la utilización de marcadores, los cuales se posicionan sobre puntos de articulaciones del sujeto y cuya posición capturan las 6 cámaras en 3D al reflectar los marcadores radiaciones emitidas por las cámaras en el infrarrojo cercano, de forma que se construya posteriormente, tras la captura del movimiento, un equivalente de un modelo de barras en 3D. A partir de este modelo de barras se pueden medir los ángulos de proyección sobre los planos XY, XZ o YZ por medio de aplicación informática. En la figura 10, se muestra un ejemplo de captura de movimiento de

uno de los sujetos experimentales, en la condición SIN CHALECO, y en la figura 11 el mismo sujeto en la condición CON CHALECO.

Figura 10. Medida de ángulos sin chaleco.

Figura 11. Medida de ángulos con chaleco.

Los 7 movimientos que se han realizado para estudiar la limitación en ángulo que ofrece cada modelo de chaleco, han sido definidos por el Laboratorio de Factores Humanos, como movimientos base para el estudio de cualquier chaleco antibala, siendo estos movimientos los siguientes:

- **Movimiento 1.-** Levantar los dos brazos hacia delante y hacia arriba del cuerpo al mismo tiempo, con las palmas de las manos hacia detrás, intentando abarcar el máximo ángulo posible sin doblar la espalda.
- **Movimiento 2.-** Con el brazo derecho extendido lateralmente, sin flexionar, y la palma de la mano situada hacia abajo, moverlo en el plano horizontal hacia la izquierda, intentando abarcar el máximo ángulo posible sin girar el tronco ni flexionar el brazo.
- **Movimiento 3.-** Inclinar el tronco hacia el lado derecho, intentando alcanzar el ángulo máximo y manteniendo las rodillas rectas.
- **Movimiento 4.-** Con los brazos en cruz extendidos lateral y horizontalmente y con las palmas de las manos hacia arriba, levantar los dos brazos lateralmente y extendidos al mismo tiempo, intentando abarcar el máximo ángulo posible sin doblar los brazos. Se medirá en este movimiento solo el ángulo del brazo derecho.
- **Movimiento 5.-** Inclinar la cabeza con casco hacia atrás.
- **Movimiento 6.-** Inclinar la cabeza con casco hacia delante.
- **Movimiento 7.-** Girar la cabeza con casco hacia la derecha.

El sujeto experimental, cuando realiza el ensayo repite cada uno de los 7 movimientos 6 veces, de forma que posteriormente se pueda realizar un cálculo de la media acotada del valor medido en ángulo de los 6 movimientos, y se obtenga un solo valor medio calculado de cada movimiento. Este valor medio calculado servirá de base para obtener la diferencia en ángulo de cada movimiento entre la condición SIN CHALECO, frente a la condición CON CHALECO.

3. Resultados y discusión

Una vez realizados los ensayos fisiológicos y biomecánicos se han obtenido los siguientes resultados:

3.1 Resultados del ensayo fisiológico

Se pone de manifiesto que el hecho de vestir un chaleco antibala sobre el uniforme habitual y realizar una prueba de esfuerzo por un sujeto, produce un aumento en las variables fisiológicas de temperatura corporal, frecuencia respiratoria y frecuencia cardiaca en los dos sujetos que han realizado el ensayo,

se muestra en la figura 12, la gráfica de respuesta del «sujeto 2» donde se aprecia tal aumento. Además se observa que los tres chalecos ofrecen respuestas fisiológicas muy similares en frecuencia cardíaca y respiratoria, pero no así en temperatura corporal donde el «chaleco 2», tal vez por estar formado por dos prendas interiores, ofrece como respuesta un mayor aumento en temperatura que el «chaleco 1» y el «chaleco 3», lo que implica mayor sudoración en el sujeto que lo viste. De este ensayo fisiológico se obtiene como conclusión final que es adecuado realizar valoraciones previas en laboratorio y también operativas de campo sobre este tipo de equipamiento para comprobar los efectos que tiene el hecho de vestir un chaleco antibala sobre una muestra de sujetos experimentales, y poder establecer a posteriori criterios de calificación de cada modelo de chaleco, además de conocer aquellas variables fisiológicas que más alteran en un sujeto.

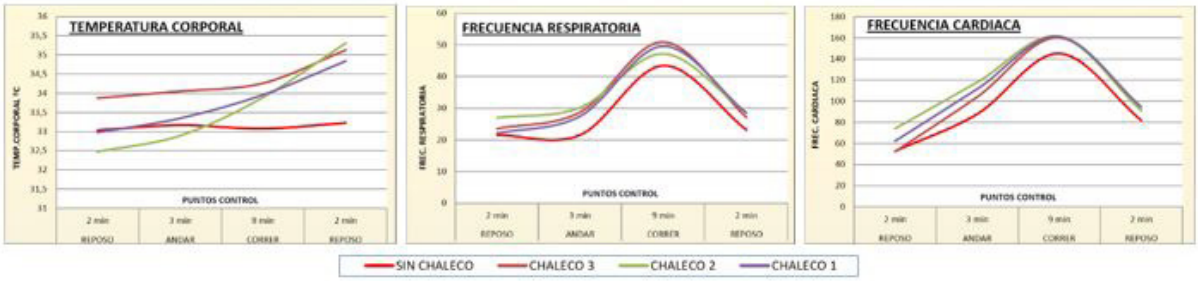


Figura 12. Gráficas de respuestas fisiológicas del sujeto 2.

3.2 Resultados del ensayo biomecánico

Se ha comprobado con este ensayo de laboratorio que el incorporar un chaleco antibala sobre el uniforme habitual, limita movimientos habituales del tronco superior del sujeto. En la tabla 1, se muestran los ángulos abarcados en cada uno de los 7 movimientos propuestos, tras el ensayo realizado por el «sujeto 2» en la condición CON CHALECO, frente a la condición SIN CHALECO. En todos los casos CON CHALECO existe limitación en el ángulo abarcado en los 7 movimientos frente a la condición SIN CHALECO. De este ensayo biomecánico se obtiene como conclusión que es muy importante el estudio de las limitaciones en ángulo que ofrece este tipo de equipamiento al sujeto que lo viste, ya que puede limitar la operatividad propia del sujeto en la realización de sus movimientos habituales, como puede ser apuntar un arma, levantar los brazos, o mover la cabeza.

	ÁNGULOS ABARCADOS EN GRADOS POR CADA MOVIMIENTO			
SUJETO 1	**SIN CHALECO**	**CHALECO 1**	**CHALECO 2**	**CHALECO 3**
MOVIMIENTO 1	162,5	160,1	150,8	156,1
MOVIMIENTO 2	117,7	96,8	80,1	74
MOVIMIENTO 3	37,8	19,3	20	21
MOVIMIENTO 4	95,2	79,2	80	69,3
MOVIMIENTO 5	58,5	54	45,1	44,9
MOVIMIENTO 6	68,6	63,9	56,9	59,4
MOVIMIENTO 7	56,3	54,3	42	40,3

Tabla 1. Resumen de ángulos abarcados por el sujeto 2

4. Conclusiones

Tras la realización del ensayo fisiológico y biomecánico sobre una muestra de tres modelos de chaleco antibala, se llega a la conclusión que el hecho de vestir este tipo de equipamiento por un sujeto perteneciente a las fuerzas de seguridad del estado afecta tanto en la respuesta fisiológica, como en su capacidad para la realización de determinados movimientos. Se aconseja por ello realizar estos ensayos ya sea

previamente a la adquisición de este tipo de equipación o sobre aquella equipación que se encuentre en uso. Habría que valorar y cuantificar, aplicando un análisis metrológico, los posibles efectos fisiológicos y limitaciones biomecánicas sobre el sujeto que lo viste.

Agradecimientos

Este ensayo de laboratorio no podría haberse realizado sin la estimable participación voluntaria de dos alféreces alumnos de la Guardia Civil, los cuales mostraron siempre un gran interés en la realización de los ensayos de laboratorio. También queríamos dar las gracias a la Academia de Oficiales de la Guardia Civil por permitir la asistencia a nuestras instalaciones del INTA situadas en el Campus de La Marañosa, de ambos alféreces alumnos.

Referencias

1. *Flavio Vegecio, R. Compendio de Técnica Militar. Madrid: Ediciones Cátedra; 2006.*
2. *Cruz Gómez, J.; Garnica Gaitán, G.; Ergonomía Aplicada. Bogotá: Ecoe Ediciones; 2010.*
3. *Rodríguez Mondelo, P.; Gregori Torada, E.; Blasco de Busquets, J.; Barrau, P. Ergonomía 3: Diseño de Puestos de Trabajo. Barcelona: Ediciones UPC; 2001.*

Respuesta psicofisiológica en un equipo de protección de movilidad aérea (ampt) en una simulación de accidente aéreo

Alberto J. Hormeño-Holgado[1,2]; Miguel Ángel Pérez-Martínez[2]; Vicente J. Clemente-Suárez[1, 2, 3]

1. Universidad Europea de Madrid. Universidad de Ciencias del Deporte
2. Centro de Estudios de Combate Aplicado (CESCA). Toledo. Spain.
3. Grupo de Investigación en Cultura, Educación y Sociedad. Universidad de la Costa. Barranquilla. Colombia e-mail: vctxente@yahoo.es

Resumen

Introducción: diferentes contextos en ambientes extremos causan una respuesta de estrés en el cuerpo humano, específicamente en combate donde fue monitorizado un incremento del sistema nerviosos simpático y produce un efecto directo en la respuesta orgánica. Este estudio analizó la respuesta psicofisiológica en un equipo de protección de movilidad aérea en un accidente aéreo simulado en zona hostil y su evasión al punto de extracción seguro. **Método:** 13 soldados (32,4±8,0 años) de una unidad de seguridad aérea del Ejército del Aire español se dividieron en tres equipos para llevar a cabo la maniobra. Se analizó antes y después de la maniobra la escala de bienestar, escala de visión personal, cuestionario de recuperación y estrés (RESTQ-52), variabilidad de la frecuencia cardíaca, la escala análoga visual, la escala de percepción de esfuerzo, espirometría, hidratación y fuerza de mano se analizaron durante los cuatro días de la maniobra. **Resultados:** la maniobra produjo un incremento significativo ($p<0,05$) en la modulación simpática, fuerza de mano, estado de deshidratación, estrés general y específico del RESTQ-52. **Discusión:** con estos resultados se concluye que una simulación de un accidente aéreo durante tres noches y cuatro días produce en un equipo de protección de movilidad aérea una alta modulación del sistema nervioso simpático, un incremento de la fuerza de mano y estrés y en estado de deshidratación.

Palabras clave

Estrés, combate, privación de sueño, ultra-resistencia, militar.

1. Introducción

Los límites del cuerpo humano se pueden alcanzar en varios contextos extremos, como eventos de ultra-resistencia [1,2], paracaidismo [3,4,5], o en diversas situaciones de combate militar [6,7]. Estas situaciones desencadenan una respuesta de estrés, y especialmente en situaciones de combate, produce un incremento del sistema nervioso simpático. Esta activación afecta directamente en la respuesta orgánica, incrementando la respuesta metabólica, muscular y cardiovascular, disminuyendo la activación cortical, causando una interpretación errónea del índice de percepción de esfuerzo (RPE) así como un deterioro de procesos cognitivos superiores como la memoria [6,8,9].

Los teatros de operaciones actuales requieren unidades especiales para llevar a cabo las diferentes misiones. Diversos autores mostraron que la activación del sistema nervioso simpático de los saltadores, independientemente de su experiencia [10], produciendo niveles elevados de activación [11] y de cortisol, y bajos de testosterona [12], aumento del ritmo cardiaco, lactato en sangre, fuerza del tren inferior y disminución de la saturación de oxígeno en sangre, habilidades motoras y ansiedad somática [3,4,5]. Además, el entrenamiento y la experiencia de estas unidades son diferentes de unidades regulares, mostrando como la experiencia es un factor importante para explicar la influencia del estrés psicológico en la respuesta hormonal. Estos estudios demostraron en saltadores noveles mayor ritmo cardiaco y una disminución en la activación [13], y una mayor respuesta psicofisiológica que los paracaidistas expertos, sin afectar las habilidades motoras ni la estructura muscular tras el salto [14,15].

Esta alta respuesta de estrés coincide con otros contextos estresantes como pruebas de ultra-resistencia, donde los estudios previos encontraron una amplia respuesta ansiosa anticipatoria, un incremento en la modulación simpática, consumo de grasa corporal y RPE, sin afectar la activación cortical [16,17], y mejorando los factores cardiopulmonares [2]. Dentro de las unidades de operaciones especiales se han incluido paracaidistas y fuerzas de seguridad aérea, unidades que protegen la aeronave y vuelan en zonas de operaciones. Una de las situaciones a las que están expuestos es el derribo de la aeronave el cual protegen y la consecuente evasión, supervivencia, orientación y defensa en un área hostil. El presente artículo pretende estudiar la respuesta psicofisiológica de una fuerza de seguridad aérea en un escenario de accidente aéreo en una zona hostil y su ulterior evasión a zona segura.

2. Métodos

Se analizaron 12 hombres y 1 mujer militares pertenecientes a una unidad de seguridad aérea del Ejército del Aire español (32,4±8,0 años). Todos los sujetos contaban con 7,2±4,8 años de experiencia profesional en sus unidades y tenían experiencia en zona de operaciones de conflictos como Afganistán, Iraq, el Chad, Djibouti, Mali, Turquía, Túnez, Senegal y la República Centro Africana. Los militares estaban equipados con uniforme y botas standard de campana, armamento táctico y chaleco antibalas del ejército. Antes de su participación, se explicó el proceso experimental a todos los participantes, los cuales dieron su consentimiento informado acorde a la declaración de Helsinki, y se obtuvo la aprobación de la jefatura de la unidad.

2.1. Descripción de la maniobra

Para esta maniobra los militares se dividieron en dos equipos llamados *air mobile protection teams* (AMPT) compuestos de 4 militares cada uno y un AMPT de 5. Los AMPT tenían la siguiente misión: el avión en el que estaban desplegados tenía que realizar un aterrizaje de emergencia debido a un fallo mecánico o un ataque hostil. Los AMPT tendrían que proteger a todo el personal de vuelo y llevarlos al punto de extracción seguro. Cada equipo se situó en una zona diferente de características hostiles y todos debían alcanzar el mismo punto de extracción. Para ello tenían que avanzar durante la noche y ocultarse en un refugio durante la luz del día. Durante la maniobra, sufrieron emboscadas y ataques enemigos. Las bajas causadas tuvieron que ser trasladadas en camilla por el AMPT. El ejercicio se desarrolló en tres noches y cuatro días.

2.2. Procedimiento

Las variables de la escala de bienestar de Ryff (PWB), escala de personalidad resistente (EPRM) y el *recovery-Stress Questionnaire* para atletas (RESTQ-52 Sport) fueron evaluadas antes y después del ejercicio. Variables como la escala visual análoga (VAS), la variabilidad de la frecuencia cardiaca (HRV) y la escala subjetiva de operatividad (RPE) fueron analizadas durante los cuatro días del ejercicio. En el día uno, se analizaron por la mañana: VAS, y durante la noche: HRV. En día dos se analizaron de mañana: VAS, HRV y RPE, y durante la noche: VAS, HRV, espirometría, hidratación y fuerza de mano. El día tres por la mañana: VAS, HRV, RPE, espirometría, hidratación y fuerza de mano y durante la noche: VAS, HRV, espirometría, hidratación y fuerza de mano. En el día cuatro por la mañana: VAS, RPE, espirometría, hidratación y fuerza de mano y durante la noche: espirometría, hidratación y fuerza de mano.

2.3. Variables del estudio

Las siguientes variables se usaron mediante protocolos usados en ambiente militar en previos estudios [18,19,20].

Variabilidad de la frecuencia cardiaca (HRV) fue recogida con un monitor V800 HR con función de medida RR (Polar, Finland), y posteriormente analizada con el *software* Kubios HRV (University of Kuopio, Kuopio, Finland).

Escala visual análoga (VAS) para medir el vigor y afecto global (GV, GA) con el fin de detectar cambios en el estado de ánimo y de activación subjetiva [21] entre 0 a 100.

La versión adaptada de la escala de personalidad resistente (EPRM) [22]. Esta escala consiste en 30 ítems que evalúa las tres dimensiones de resistencia: compromiso, control y desafío. Cada subescala tiene 10 ítems que se puntúan en una escala tipo Likert de 4 puntos.

Percepción subjetiva de esfuerzo (RPE) con la escala de 1 (nada) a 100 (mucho).

La escala española adaptada del bienestar psicológico de Ryff (PWB) [23] se utilizó para evaluar el componente psicológico de bienestar.

La versión española del *recovery-Stress Ques*tionnaire para atletas (RESTQ-52 Sport) [24] compuesta de 19 puntos agrupados en cuatro grandes grupos: estrés general, recuperación de la actividad general, estrés de actividad específica y actividad de recuperación de activada específica.

Fuerza isométrica de prensión de mano con dinamómetro (Takei Kiki Koyo, Japan).

Estado de hidratación mediante test de color de orina.

Espirometría, usando un espirómetro para medir las variaciones en la respiración durante el ejercicio.

2.4. Análisis estadístico

Los datos se analizaron usando SPSS Statistics de Windows (versión 22; SPSS Inc., Chicago, III., USA). La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk se usó para evaluar la homogeneidad de cada variable, y la prueba Wilcoxon se llevó a cabo para comprobar las diferencias entre las variables de diferentes muestras. El nivel de significación fue $p<0,05$.

3. Resultados y discusión

Los militares anduvieron un total de 7h 46min 52s la primera noche, 3h 22min 38s la segunda y 3h 11min 37s la tercera noche. Completaron 16,2 km, 6,1 km y 10,7 km respectivamente. La temperatura de las tres noches fue 10±1°C, altitud máxima de 623±119,41mts y mínima de 439±43,49.

Tabla 1. Datos de la variabilidad de la frecuencia cardiaca

	Día 1	Día 2		Día 3			
	Noche M1	Mañana M2	Noche M3	Mañana M4	Noche M5	Chi^2	Comparación del momento de evaluación
LF (nu)	62,8±11,1	63,6±15,5	67,4±13,8	55,4±16,3	65,0±14,8	5.900	4 <3
HF (nu)	37,1±11,2	36,3±15,5	32,2±13,6	34,9±14,7	44,5±16,2	5.891	4 >3
LF / HF (nu)	2,1±1,6	2,4±1,9	2,9±2,1	1,7±1,6	2,3±1,3	5.891	4 <3
PNN50 (No.)	16,5±13,0	21,3±13,0	8,5±10,1	26,8±18,0	8,6±11,6	17.772	3 < 1; 3 < 2; 4 > 3; 5 < 4
RMSSD (ms)	39,4±24,6	43,8±20,8	27,1±18,4	47,6±20,5	27,7±15,7	14.691	3 < 2; 4 >3; 5 <4
SD1 (ms)	27,8±17,2	30,9±14,7	19,3±13,0	33,7±14,5	19,5±11,4	15.055	3 <2; 4 >3; 5 <4
SD2 (ms)	70,9±32,6	88,9±38,0	54,7±27,2	73,7±26,2	58,9±36,0	7.709	3 < 2; 4 >3

(M); momento de la muestra; (LF); banda de *the low-frequency band in normalised units*; (HF); *the high frequency band in normalised units*; (PNN50); *percentage of differences between normal adjacent R-R intervals greater than 50 ms*; (RMSSD); *the square root of the average of the sum of the differences squared between normal adjacent R-R intervals*; (SD1); *sensitivity of the short-term variability*; (SD2); *sensitivity of the long-term variability*

El análisis del HRV demostró una bajada significante en PNN50, RMMSD en la maniobra (tabla 1), mientras que las variables estrés general y estrés específico del RESTQ-52 aumentaron significativamente después de la maniobra (tabla 2). El valor del afecto global de la escala análoga visual descendió desde el principio de la maniobra, mostrando un aumento significativo a medida que acababa la maniobra. Fuerza de mano aumentó significativamente después de la maniobra mientras que los valores de orina disminuyeron significativamente (tabla 3).

Tabla 2. Escalas psicológicas antes y después de la maniobra

	PRE	**POST**	**z**	**p**
PWB				
Autoaceptación	-0,5±8,6	-2,2±7,5	-,507	,612
Relaciones positivas	-14,6±6,8	17,2±6,1	-1,538	,124
Propósito vital	16,2±7,9	14,1±5,5	-1,078	,281
Dominación entorno	-6,7±6,4	-6,0±7,3	-,153	,878
Crecimiento personal	0,8±14,1	-5,1±9,3	-1,914	,056
Autonomía	-13,8±9,4	17,1±7,3	-,512	,609
EPRM				
Control	22,2±3,7	19,5±2,5	-,716	,474
Compromiso	16,9±4,0	17,0±4,8	-,071	,944
Desafío	19,7±3,9	18,5±4,6	-,770	,441
RESTQ-52				
Estrés general	1,3±0,6	1,8±0,7	-2,769	,006
Recuperación general	3,7±0,7	3,2±0,7	-1,924	,054
Estrés específico	1,4±0,6	2,1±0,7	-3,062	,002
Recuperación específica	3,7±0,7	3,4±0,8	-1,155	,248

PWB: Escala de bienestar de Ryff; EPRM: escala de personalidad resistente; RESTQ-52: Cuestionario estrés y recuperación para atletas 52 ítems

Tabla 3. Escala visual análoga, percepción de esfuerzo y datos fisiológicos durante la maniobra

	Día 1	Día 2		Día 3		Día 4			
	Mañana M1	Noche M1	Mañana M2	Noche M1	Mañana M2	Noche M1	Mañana M2	Chi^2	Comparación momento evaluación
VAS									
-GV	69,5±3,6	68,0±6,7	65,6±3,9	66,0±5,8	68,6±4,5	67,3±4,2		9.515	3<1
-GA	59,0±5,1	51,5±5,0	49,9±6,1	53,6±5,9	55,8±5,3	54,1±4,9		14.447	2<1; 3<1; 4<1; 5>2; 5>3
RPE		53,6±22,5		61,8±13,3		61,4±9,5		1.676	
Espirometría			520,9±93,1	523,8±99,7	532,7±101,8	562,3±83,6	540,5±75,2	5.116	
Fuerzavmano			48,8±11,4	49,1±8,6	54,1±8,6	56,8±11,0	54,6±11,1	17.772	3>1; 4>1; 4>2; 4>3; 5<4
Orina			6,6±0,8	7,0±1,6	6,0±1,7	5,3±1,4	5,1±1,4	15.123	4<1; 5<1; 4<2; 5<2; 5<3

(M); momento de la muestra; (VAS); escala visual análoga; (GV); global vigor; (GA); global afecto; (PSP); Percepción subjectiva de esfuerzo

La maniobra analizó una afectación en la modulación autonómica de los soldados produciendo un incremento de la activad ya que pNN50 y RMMSD disminuyeron, hecho relacionado con periodos de actividad física elevada o estrés psicológico [17,25]. Esta respuesta elevada en la actividad es similar a otros contextos estresantes militares como saltos paracaidistas tácticos [3-5], simulación de combate urbano [26], o incluso como síntoma de atletas sobreentrenados [27,28]. Dicho incremento en la modulación simpática se relacionó con anterioridad a una incapacidad cognitiva y malinterpretación de la percepción subjetiva de esfuerzo (RPE) [20]. Este hecho también podría afectar la percepción de hidratación durante la maniobra ya que la prueba de orina mostró estado de deshidratación. Esta deshidratación, relacionada con la percepción, se puede deber a la baja ingesta de líquido y a un incremento del sudor por la demanda del ejercicio, teniendo un efecto negativo en mantener la función fisiológica y empeorando el desempeño [29]. El incremento de la fuerza de mano evaluado estaba en la línea de previos estudios dentro de maniobras militares, donde los soldados incrementaron su fuerza de piernas [30]. Este hecho se relacionó con un incremento del sistema nervioso autónomo que incrementó la actividad de las fibras musculares de contracción rápidas [6,8], resultado también encontrado en este estudio. Este incremento de valores de fuerza podría estar explicado también por la activación del sistema lucha-huida el cual modula la respuesta orgánica en situaciones estresantes en las cuales la integridad física del individuo está en peligro [31,32]. Esto causa una producción aumentada de adrenalina y noradrenalina por las glándulas adrenales y la liberación de estas hormonas causa numerosas modificaciones fisiológicas como el incremento de activación muscular [7,33].

En cuanto a la respuesta de estrés, los resultados del RESTQ-52, mostró un incremento en el estrés general y específico que podría estar relacionado con el aspecto innato de supervivencia y de enfrentamiento a obstáculos. El incremento en el estado de estrés y la variación del afecto global durante el ejercicio, referida a la respuesta afectiva y psicofisiológica de la experiencia ansiosa derivada de la situación de combate [5]. En esta línea, el incremento del estrés corrobora la hiperactividad del sistema nervioso simpático y un estado emocional transitorio caracterizado por sentimientos de tensión y aprehensión observados en otros ambientes militares [8,19,26,34]. Debería tenerse en cuenta que la respuesta al estrés no adaptativo en combate podría afectar negativamente los resultados de los soldados, suponiendo un riesgo para ellos [19]. Estos resultados apoyan la importancia de la preparación psicológica en estas unidades como ya ha sido estudiado previamente [7].

EPRM y RPE no se modificaron significativamente, probablemente debido a que los AMPT pertenecían a una unidad de operaciones especiales en la cual se requiere una excelente capacidad física y mental.

4. Conclusión

Los resultados en la respuesta psicofisiológica de los soldados realzan la importancia del entrenamiento en simulación y como ello junto con la experiencia afecta su rendimiento. La activación cortical, HRV y su repercusión orgánica nos lleva a pensar en la importancia del entrenamiento psicológico en la habilidad de manejar el estrés y en la implementación de métodos de entrenamiento que mejoren la respuesta autonómica en estos ambientes altamente estresantes. Finalmente, con los datos obtenidos en este estudio podemos concluir que una maniobra de un accidente aéreo y su evasión provoca en el equipo de protección aéreo una incrementada modulación del sistema nervioso simpático, aumenta la fuerza muscular, el estrés y el estado de deshidratación.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su gratitud al oficial al mando de la unidad de apoyo al despliegue aéreo (EADA) del Ejército del Aire español y a todo su personal por su excelente profesionalismo y apoyo.

Referencias

1. *Clemente-Suárez VJ, Muñoz Fernández Arroyo VE, Ramos Campo DJ, Navarro Valdivieso F, González Ravé JM, Juárez Santos-García D. Analysis of selected physiological performance determinants and muscle damage in a 24-hour ultra-endurance relay race. Int Sport J. 2011; 12(4):179–86.*
2. *Clemente-Suarez VJ. Changes in biochemical, strength, flexibility, and aerobic capacity parameters after a 1700 km ultraendurance cycling race. Biomed Res Int. 2014.*
3. *Clemente-suárez VJ, Delgado-Moreno R, Gonzalez-Gómez B, Robles-Pérez JJ. Respuesta psicofisiológica en un salto táctico paracaidista HAHO: caso de Estudio. Sanid Mil. 2015;71(3):179–82.*
4. *Clemente-Suárez VJ, Robles-Pérez JJ, Montañez-Toledo P. Respuesta psicofisiológica en un salto táctico paracaidista a gran altitud. A propósito de un caso. Arch med Deporte. 2015;71(3):179–82.*
5. *Sánchez-Molina J, Robles-Pérez JJ, Clemente-Suárez VJ. Effect of Parachute Jump in the Psychophysiological Response of Soldiers in Urban Combat. J Med Syst. 2017; 41(6).*
6. *Clemente-Suárez VJ, Robles-Pérez JJ. Mechanical, physical, and physiological analysis of symmetrical and asymmetrical combat. J Strength Cond Res. 2013; 27(9):2420–6.*
7. *Clemente-Suarez VJ, Robles-Perez JJ. Psycho-physiological response of soldiers in urban combat. An Psicol. 2013; 29(2):598–603.*
8. *Delgado-Moreno R, Robles-Pérez JJ, Clemente-Suárez VJ. Combat Stress Decreases Memory of Warfighters in Action. J Med Syst. 2017;41(8):1–7.*
9. *Suárez VJC, Pérez JJR. Análisis de los marcadores fisiológicos, activación cortical y manifestaciones de la fuerza en una situación simulada de combate. Arch Med del Deporte. 2012;29(149):680–6.*
10. *Allison AL, Peres JC, Boettger C, Leonbacher U, Hastings PD, Shirtcliff EA. Fight, flight, or fall: Autonomic nervous system reactivity during skydiving. Pers Individ Dif. 2012; 53(3):218–23.*
11. *Hetland A, Vittersa J. The Feelings of Extreme Risk : Exploring Emotional Quality and Variability in Skydiving and BASE Jumping. J Sport Behav. 2012; 35(2):154–80.*
12. *Chatterton RT, Vogelsong KM, Lu YC, Hudgens GA. Hormonal responses to psychological stress in men preparing for skydiving. J Clin Endocrinol Metab. 1997; 82(8):2503–9.*
13. *Kowalczyk E, Kura M. An influence of mental stress, related to parachute jumping, on ACTH and cortisol hormones concentration in blood serum. Psychiatr Pol. 2012; 46(5):731–42.*
14. *Clemente-Suárez VJ, de la Vega R, Robles-Pérez JJ, Lautenschlaeger M, Fernández-Lucas J. Experience modulates the psychophysiological response of airborne warfighters during a tactical combat parachute jump. Int J Psychophysiol. 2016; 110:212–6.*

15. *Clemente-Suárez VJ, Robles-Pérez JJ, Fernández-Lucas J. Psychophysiological response in parachute jumps, the effect of experience and type of jump. Physiol Behav. 2017; 179:178–83.*
16. *Belinchon-deMiguel P, Clemente-Suárez VJ. Psychophysiological, Body Composition, Biomechanical and Autonomic Modulation Analysis Procedures in an Ultraendurance Mountain Race. J Med Syst. 2018; 42(2).*
17. *Clemente-Suárez VJ. Psychophysiological response and energy balance during a 14-h ultraendurance mountain running event. Appl Physiol Nutr Metab. 2015;40(3):269–73.*
18. *Diaz-Manzano M, Robles-Pérez JJ, Herrera-Mendoza K, Herrera-Tapias B, Fernández-Lucas J, Aznar-Lain S, et al. Effectiveness of Psycho-Physiological Portable Devices to Analyse Effect of Ergogenic Aids in Military Population. J Med Syst. 2018; 42(5).*
19. *Sánchez-Molina J, Robles-Pérez JJ, Clemente-Suárez VJ. Assessment of Psychophysiological Response and Specific Fine Motor Skills in Combat Units. J Med Syst. 2018; 42(4).*
20. *Tornero-Aguilera JF, Robles-Pérez JJ, Clemente-Suárez VJ. Use of Psychophysiological Portable Devices to Analyse Stress Response in Different Experienced Soldiers. J Med Syst. 2018; 42(4).*
21. *Monk TH. A visual analogue scale technique to measure global vigour and affect. Psychiatry Res. 1989; 27(1):89–99.*
22. *de la Vega R, Ruiz R, Gómez J, Rivera O. Hardiness in Professional Spanish Firefighters. Percept Mot Skills. 2013; 117(2):608–14.*
23. *Díaz D, Rodríguez-Carvajal R, Blanco A, Moreno-Jiménez B, Gallardo I, Valle C, et al. Adaptación española de las escalas de bienestar psicológico de Ryff. Psicothema. 2006; 18(3):572–7.*
24. *González-boto R, Salguero A, Tuero C, Márquez S. Cuestionario de recuperación-estrés. Rev Psicol del Deport. 2009; 18(1):53–72.*
25. *Bellido A, Ruisoto P, Beltran-Velasco A, Clemente-Suárez VJ. State of the Art on the Use of Portable Digital Devices to Assess Stress in Humans. J Med Syst. 2018; 42(6):100.*
26. *Clemente-Suarez VJ, Palomera PR, Robles-Pérez JJ. Psychophysiological response to acute-high-stress combat situations in professional soldiers. Stress Heal. 2018; 34(2):247–52.*
27. *Clemente-Suarez VJ. Periodized training archive better autonomic modulation and aerobic performance than non periodized training. J Sports Med Phys Fitness. 2017.*
28. *Clemente-Suárez VJ; Arroyo-Toledo JJ. The Use of Autonomic Modulation Device to Control Training Performance after High-Intensity Interval Training Program. J Med Syst. 2018; 25;42(3):47.*
29. *Murray B, Murray B. Hydration and Physical Performance Hydration and Physical Performance. 2017; 5724:542–8.*
30. *Delgado-Moreno R, Robles-Pérez JJ, Aznar S, Clemente-Suarez VJ. Inalambric Biofeedback Devices to Analyze Strength Manifestation in Military Population. J Med Syst. 2018; 42(4).*
31. *Sandín B. El estrés : un análisis basado en el papel de los factores sociales. IJCHP. 2003;3:141–57.*
32. *Suresh A, Latha SS, Nair P, Radhika N. Prediction of fight or flight response using artificial neural networks. Am J Appl Sci. 2014; 11(6):912–20.*
33. *Richter EA, Ruderman NB, Gavras H, Belur ER, Galbo H. Muscle glycogenolysis during exercise: dual control by epinephrine and contractions. Am J Physiol. 1982;242(1).*
34. *Tornero-Aguilera JF, Robles-Pérez JJ, Clemente-Suárez VJ. Effect of Combat Stress in the Psychophysiological Response of Elite and Non-Elite Soldiers. J Med Syst. 2017; 41(6).*

Nueva metodología de selección de terapias acústicas para tratar el acúfeno mediante el análisis de señales de EEG

Alonso Valerdi, Luz María[1*] Ibarra Zárate, David[1] y Rodríguez Bermúdez, Germán[2]

1 Tecnológico de Monterrey, Col. Ejidos de Huipulco, Tlalpan, México D.F. Correo electrónico: lm.aloval@itesm.mx (LMAV), david.ibarra@itesm.mx (DIZ).

2 Centro Universitario de la Defensa de San Javier, C\ Coronel López Peña s/n. Correo electrónico: german.rodriguez@cud.upct.es (GRB).

* Luz María Alonso Valerdi; correo electrónico: lm.aloval@itesm.mx (LMAV).

Resumen

A pesar de encontrarse en un ambiente silencioso, hay personas que perciben un sonido «fantasma», normalmente de unos 4-8 kHz, que no ha sido producido por ninguna fuente acústica externa. A esta sensación se le llama acúfeno. Habitualmente, está asociada con alguna causa reversible, tales como exposición a ruidos muy altos, fiebre, ototoxicidad o una perturbación transitoria del oído medio. Se estima que en un 5-15 % de la población, este pitido no desaparece. Entre la población militar, debido a que casi cada soldado, marinero, aviador o marino estará expuesto a niveles peligrosos de ruido en algún momento de su carrera militar, la prevalencia de la pérdida de audición y acúfeno es mayor que en el público en general. De hecho, estas fueron las dos discapacidades más frecuentes para los veteranos en los Estados Unidos en el año 2012.

Es habitual en el tratamiento del acúfeno emplear terapias acústicas. Sin embargo, no hay una forma de cuantificar los efectos de las mismas salvo los cuestionarios que contestan los pacientes. En este trabajo se presenta una metodología desarrollada en el Tecnológico de Monterrey en la que se emplea el análisis de las señales de electroencefalografía (EEG) como herramienta para evaluar el efecto a nivel cortical de las terapias acústicas que se aplican como método paliativo del acúfeno. Se basa en la premisa de que al ser estas terapias fundamentalmente estrategias para la habituación del paciente a los pitidos que escucha, cada terapia acústica debe producir cambios perceptuales y cognitivos en la corteza cerebral a lo largo de la terapia. Por lo tanto, una monitorización del EEG, podría indicar si se han producido cambios y la magnitud de los mismos. Esta metodología de evaluación, abre además la puerta, a poder seleccionar así las terapias más beneficiosas para cada paciente de acuerdo a su historial clínico.

Palabras clave

Acúfeno, electroencefalografía (EEG), terapias acústicas.

1. Introducción

La pérdida de audición inducida por ruido es una enfermedad prevenible importante. Puede ser causado por una exposición a largo plazo con niveles de presión sonora superiores a 75-85 dB, o por un pico intenso de sonido [1].

El ruido sigue siendo un gran problema de salud pública. Se estima que 1,3 billones de personas se ven afectadas por la pérdida de audición [1]. A la percepción de un sonido «fantasma», normalmente de unos 4-8 kHz, que no ha sido producido por ninguna fuente externa de sonido se le llama acúfeno. El acúfeno puede tener diferentes orígenes, siendo uno de ellos la sobreexposición a sonidos de alta intensidad [2].

Es evidente que la agudeza auditiva es un componente clave de la efectividad de un soldado en el campo de batalla y por lo tanto la presencia de acúfeno y la pérdida de audición puede afectar significativamente la capacidad de un soldado para escuchar sonidos o señales de comunicación de la unidad o del enemigo, y sin embargo, la prevalencia de estas dolencias en el Ejército es mayor que en la población en general. Las dos discapacidades relacionadas más frecuentes para los veteranos en los Estados Unidos al final del año fiscal el año 2012 fueron el acúfeno y la pérdida de audición, con acúfeno afectando a 115.638 veteranos (9,7 %) y la pérdida de audición afectando a 69.326 veteranos (5,8 %) [3].

Casi cada soldado, marinero, aviador o marino estará expuesto a niveles peligrosos de ruido en algún momento de su carrera [1]. En el Ejército de Tierra el disparo de munición, produce sonidos de alta intensidad. Por ejemplo: el uso de rifles con cartuchos 0,45-70 produce picos de presión sonora de 155,2 a 159,9 dB; el disparo de pistolas de calibre 5,5 mm, tiene picos de nivel de 151 dB; un lanzagranadas de mano llega a 158 dB; y un misil antitanque a 184 dB [1]. En La Armada los militares también pueden verse sometidos a altos niveles de ruido, especialmente en las salas de máquinas de los buques, en lanchas e incluso en las cubiertas de los barcos. Por último, en el Ejército del Aire es fácil encontrar ejemplos de entornos especialmente ruidosos. El ruido en un helicóptero Puma es de 100 dBA, en aviones de combate puede oscilar de 97 a 104 dBA y en aviones de transporte se producen ruidos de 88 a 101 dBA [1].

El Departamento de Trabajo de los Estados Unidos de América tiene definidos los niveles de ruido permisibles en función del tiempo que se soportan [4]. Ver tabla 1. Tal y como se observa, durante 8 horas de exposición el nivel permisible es de 90 dBA, a lo largo de 2 horas el nivel marcado es de 100 dBA, y durante 15 minutos se establece como límite 115 dBA. Superar estos límites sería perjudicial, por lo que es recomendable que todos los trabajadores que tengan que desarrollar su trabajo en zonas con niveles de ruido elevados, deben de usar las correspondientes medidas protectoras, tales como barreras físicas, adecuado mantenimiento de los equipos para disminuir las emisiones, la definición de distancias mínimas a las fuentes de ruido, etc… El objetivo de dichas medidas es evitar cualquier tipo de lesión o afección.

Una vez que el acúfeno hace aparición este debe ser tratado. Existen varios tipos de tratamiento, tales como los dispositivos auditivos enmascaradores, el asesoramiento psicológico, las terapias de reentrenamiento, la musicoterapia o la acupuntura [5]. En la actualidad, no hay desarrollado ningún tratamiento

farmacológico para el acúfeno, pero sí que se emplean medicamentos para tratar algunos de sus posibles efectos, como son el estrés, la ansiedad, y la depresión. Es por ello que es habitual emplear terapias acústicas siendo su objetivo la disminución del contraste percibido entre el fondo acústico del paciente y su acúfeno, ya sea por habituación o inhibición. La habituación actúa más sobre los sistemas límbico y autónomo, de tal modo que, aunque el paciente que percibe su acúfeno, es capaz de convivir con él, eliminando los perjuicios en su calidad de vida. La inhibición es la disminución o desaparición del acúfeno cuando cesa el estímulo.

Exposición a ruido permisible	
Tiempo en horas	**Nivel de presión sonora dBA**
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1,5	102
1	105
0,5	110
0,25	115

Tabla 1. Niveles de ruido permisible en función del tiempo de exposición según el Departamento de Trabajo de los Estados Unidos de América [4]

Sin embargo, no hay una forma de cuantificación de los efectos de las terapias acústicas, salvo los cuestionarios que contestan los pacientes. En este trabajo se presenta una metodología desarrollada en el Tecnológico de Monterrey en la que se emplea el análisis de las señales de electroencefalografía (EEG) como herramienta para evaluar el efecto a nivel cortical de las terapias acústicas que se aplican como método paliativo del acúfeno. Se basa en la premisa de que al ser estas terapias fundamentalmente estrategias para la habituación del paciente a los pitidos que escucha, cada terapia acústica debe producir cambios perceptuales y cognitivos en la corteza cerebral a lo largo de la terapia. Por lo tanto, una monitorización del EEG, podría indicar si se han producido cambios y la magnitud de los mismos. Esta metodología de evaluación, abre además la puerta, a poder seleccionar así las terapias más beneficiosas para cada paciente.

2. Diseño del experimento

Con el objetivo de establecer una metodología objetiva basada en la monitorización del efecto que tienen las terapias acústicas a nivel cortical, y cuyos objetivos son: (1) cuantificar la magnitud del daño sensorial y cognitivo provocado por el acúfeno en pacientes que no han recibido alguna terapia acústica; (2) evaluar el efecto de las terapias acústicas a corto y mediano plazo; y (3) determinar si el paciente se beneficia con la terapia o se cambia de estrategia. Se ha realizado el experimento que se describe a continuación.

Se han involucrado a 75 pacientes del Instituto Nacional de Rehabilitación (Ciudad de México) que sufren de acúfeno crónico, que habían recibido tratamientos alternativos sin efectos positivos. Tanto ellos como sus médicos están informados sobre el procedimiento experimental. Se han establecido de forma aleatoria 5 grupos de 15 pacientes que van a seguir 4 terapias acústicas distintas: terapia de reentrenamiento; terapia por discriminación auditiva; terapia por ambiente acústicamente enriquecido; y terapia binaural [6]. El quinto grupo actuará como grupo de control pues se les suministrará una terapia acústica placebo.

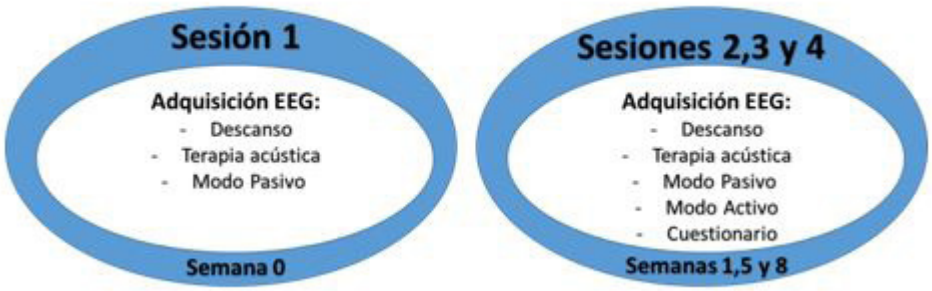


Figura 1. Esquema del protocolo de los experimentos.

Los pacientes aplican durante una hora diaria la terapia que les ha sido proporcionada y se les explica que pueden hacerlo en cualquier momento que tengan disponible sin que tenga que ser siempre en el mismo horario. A todos ellos se les realiza un seguimiento durante 8 semanas y durante este periodo se realizan 4 registros de EEG y tres cuestionarios.

Tal y como muestra la figura 1, el primer registro de EEG se toma al principio del estudio (semana 0), es decir, cuando aún no se ha recibido ninguna terapia acústica. Las otras tres grabaciones son respectivamente llevadas a cabo las semanas 1, 5 y 8 después de iniciar la terapia. La figura 1 muestra también las tareas a realizar en cada sesión, pues las señales de EEG se adquieren en cuatro diferentes condiciones:

- **Descanso**. El paciente se sienta cómodamente en una silla y en estado de relajación se captura las señales de EEG por 3 minutos con los ojos abiertos y 3 minutos con los ojos cerrados.
- **Terapia acústica**. El paciente realiza la terapia asignada en función del grupo a que pertenezca durante 3 minutos con los ojos cerrados.
- **Modo pasivo**. El paciente con los ojos cerrados escucha 50 estímulos de 1s de duración separados entre 2 y 2,5 s, con lo cual necesita un total de 2 minutos.
- **Modo activo**. Con los ojos cerrados, escucha ruido ambiente (un bar, una calle, etc…) y debe identificar 5 sonidos previamente predefinidos (un claxon de un coche, un cristal que se rompe, etc…).

El total de cada sesión dura alrededor de 60 minutos. Es importante aclarar que el grupo de control sigue las mismas normas que el resto de los grupos, solo que simplemente oye música relajante en la terapia acústica, estableciendo así un placebo.

Tal y como se puede ver en la figura 1, en la primera sesión no hay toma de EEG en modo activo y además en las sesiones 2, 3 y 4 los participantes rellenan un cuestionario sobre su percepción de la evolución del acúfeno.

Las sesiones se realizaron en un laboratorio del Tecnológico de Monterrey debidamente equipado situado en el campus de Ciudad de México (véase figura 2). La figura muestra a una participante realizando el experimento. En la cabeza porta una malla sobre el caso EEG para que los electrodos no sufrieran ningún desplazamiento a lo largo de la sesión de trabajo. Se utilizó un ancho de banda entre 0,1 y 100 Hz. El canal Cz se utilizó como referencia y el lóbulo izquierdo de la oreja como tierra. Los canales adquiridos siguiendo el sistema 10/20 fueron: Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, A1, T3, C3, C4, T4, A2, T5, Pz, T6, O1 y O2. Se utilizaron electros activos. Como *software* de adquisición se empleó OpenViBe que es un programa de libre distribución, que permite una programación gráfica de las tareas. Para generar las terapias acústicas se utilizaron MATLAB y Audacity. Es importante remarcar que las terapias acústicas están diseñadas a partir de la evaluación audiológica del paciente llevada a cabo por el Instituto Nacional de Rehabilitación (Ciudad de México).

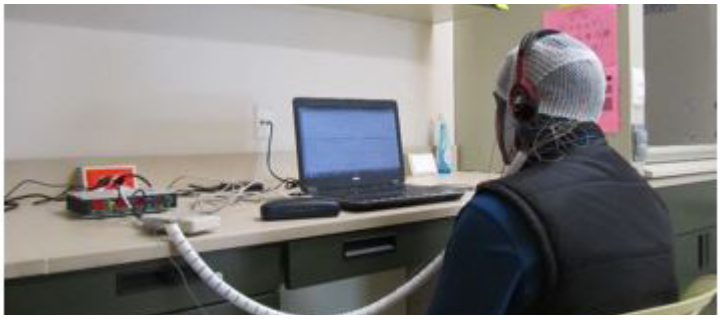


Figura 2. Monitorización de EEG del tratamiento del acúfeno crónico y refractario basado en terapias acústicas.

3. Análisis de las señales de EEG

La adquisición de EEG es una técnica fácilmente tolerada, no invasiva, que no necesita de fármacos y relativamente económica que mide la actividad eléctrica neuronal de los pacientes. Por norma general, la percepción, el estado cognitivo, y la actividad motora determinan la frecuencia de oscilación dominante de las redes neuronales [7]. Las técnicas de neuroimagen han sido utilizadas para observar asociaciones entre esta dolencia y alteraciones en diferentes áreas del cerebro, dedicando especial atención a la percepción, la memoria y las emociones.

Gran cantidad de investigaciones sobre el acúfeno, han centrado el análisis del EEG en estados de reposo. Un análisis habitual es comparar la actividad cerebral entre personas con acúfeno y sanas analizando la potencia espectral de las bandas cerebrales, especialmente alfa, beta y gamma [8]. Otros análisis empleado por los investigadores es la evaluación de las respuestas evocadas o potenciales relacionados a eventos. Estos son variaciones del EEG que se producen al someter al sujeto a estímulos. Algunos componentes del EEG típicos de los potenciales relacionados a eventos son P1, N1, P2 y N2, que se producen unos pocos milisegundos después del inicio del estímulo [9]. Los potenciales P1y P2 presentan picos de valores positivos mientras N1 y N2 tienen valores con picos de valores en tendencia opuesta. Se ha demostrado, que N1 se ve modificado en los pacientes con acúfeno severo, mostrando latencias y amplitudes menores que en personas sanas. Del mismo modo, se ha observado también, una disminución significativa en la amplitud del componente P3 en personas con acúfeno, pudiendo deberse a una deficiencia en el sistema central de procesamiento auditivo [10]. Finalmente, cabe destacar que el componente N1 ha sido muy utilizado para evaluar la función cerebral, siendo indicador de enfermedad cerebrovascular, esquizofrenia y acúfeno [9].

4. Resultados y discusión

Debido a que el proyecto no está finalizado y el análisis de las señales de EEG se encuentra aún en una fase preliminar, ya que se están terminado de seleccionar los algoritmos a aplicar y las componentes del EEG a estudiar, en este apartado, solo se pueden comentar los resultados preliminares de un sujeto que reportó mejora durante el tratamiento y de otro que no notó ninguna mejora. En particular, ambos sujetos pertenecen al grupo de terapia de reentrenamiento, tienen más de 40 años y las terapias fueron supervisadas en todo momento por su médico. Ambos sujetos usaron sus terapias una hora diaria durante dos meses.

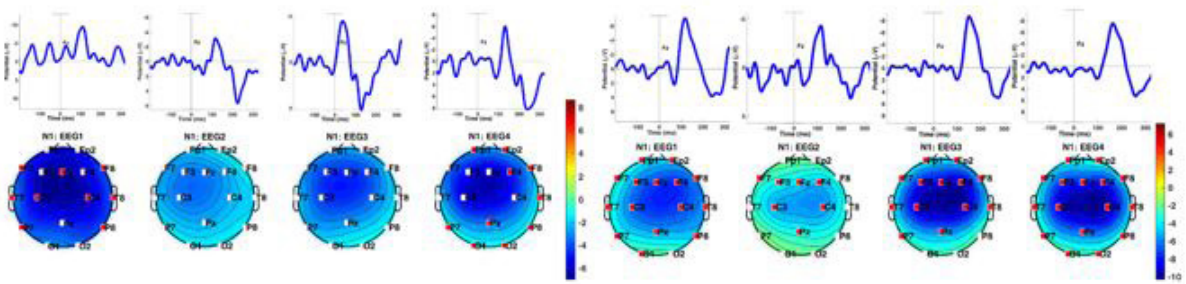


Figura 3. Evaluación subjetiva negativa del lado izquierdo (paciente 1), y evaluación subjetiva positiva del lado derecho (paciente 2) [11].

Las señales fueron preprocesadas con EEGLAB para aplicar un filtro paso alto a 0,1Hz (Butterworth de orden 4) y un paso bajo a 30 Hz (Butterworth de orden 4), posteriormente se eliminaron los artefactos por medio de análisis de componentes independientes. Se determinaron las componentes N1 en todos los canales y se calculó la coherencia de cada uno, descartando aquellos con baja coherencia ($p < 0,05$).

La figura 3 muestra la evaluación de las señales del canal Fz en las 4 sesiones realizadas de dos sujetos, siendo la primera gráfica de la izquierda la primera sesión del primer sujeto. Se han marcado en rojo los canales considerados coherentes. Los primeros análisis muestran que las N1 del paciente 2 (véase parte derecha de la figura 3), aumentaron en amplitud y latencia. Obsérvese que la escala vertical de potencia en las sesiones 3 y 4 llega hasta -8 µV mientras que en la sesión 1 llega a -6 µV. Con respecto al eje horizontal se puede ver cómo hay un desplazamiento de N1 hacia la derecha, lo que indica una mayor latencia. Sin embargo, las gráficas del paciente 1 no mostraron ninguna tendencia. Es importante destacar que los cuestionarios rellenados por el sujeto 1 indican que no experimentó ninguna mejoría en su acúfeno, mientras que en el sujeto 2 sí que reportan mejoría.

Teniendo en cuenta que tal y como se ha expuesto en el anterior apartado, los sujetos con acúfeno presentaban una menor amplitud y latencia en N1 en comparación con sujetos sanos, cabe deducir que el tratamiento implementado en este sujeto parece estar funcionando. De esta forma se está realizando una medida objetiva de la evolución de la dolencia. En próximas fechas se obtendrán los resultados del resto de participantes y de todos los grupos para poder obtener conclusiones sólidas.

5. Conclusiones

El acúfeno tiene una base perceptual y cognitiva que se refleja en el EEG. Por lo tanto, una monitorización del mismo, podría indicar si las terapias que reciben los pacientes han producido cambios y la magnitud de los mismos. Este trabajo describe la metodología que se está siguiendo en el Tecnológico de Monterrey, para poder realizar una selección óptima del tratamiento acústico más adecuado a personas que padecen acúfeno. Para ello se trata de observar tanto los efectos a nivel cortical como los que reportan los pacientes de manera subjetiva.

Los miembros de las Fuerzas Armadas pueden tener que desempeñar sus funciones en entornos con altos niveles de ruido. A pesar de las protecciones existentes, la prevalencia del acúfeno es más elevada que en la población en general. Esto tiene un coste personal y económico, que en el caso del Ejército de Estados Unidos llega a ser de mil millones de dólares pagados en compensaciones a los afectados [12]. Por ello, se necesita más investigación en este área para comprender claramente qué mecanismos biológicos dan lugar al acúfeno para poder desarrollar tratamientos efectivos para silenciar este fantasma percibido por los que lo padecen.

Agradecimientos

Se quiere agradecer al Tecnológico de Monterrey su apoyo para el desarrollo de este proyecto.

Referencias

1. *Jenica S.Y, De-Yung W. Impact of noise on hearing in the military. Military Medical research. 2015; 2(6).*
2. *Møller A. R, Pathology of the Auditory System that Can Cause Tinnitus. In: A. R. Møller, B. Langguth, D. DeRidder & T. Kleinjung, eds. Textbook of Tinnitus. New York: Springer Science & Business Media. 2010; 77-93.*
3. *Annual Benefits Report, Fiscal Year 2012. Department of Veteran Affairs. 2012.*
4. *Occupational Safety and Health Administration [Internet]. [2018 Septiembre 12]. Disponible de: https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.95*
5. *Hanley P.J, Davis P.B, Quinn S.A, y Bellekom S.R. Treatment of tinnitus with a customized, dynamic acoustic neural stimulus: clinical outcomes in general private practice. Annals of Otology, Rhinology & Laryngology. 2008; 117(11): 791-799.*

6. *Margaret M.J. Sound therapies for tinnitus management. Progress in Brain Research.2007; 166: 435-440.*
7. *DeMarre DA, Michaels D. Electroencephalographic measurements. Bioelectronic measurements. New York: Prentice Hall; 1983.*
8. *Meyer M, Luethi M.S, Neff P, Langer N, Büchi S. Disentangling tinnitus distress and tinnitus presence by means of EEG power analysis. Neural Plasticity. 2014; 468546: 1–13.*
9. *Delb W, Strauss D.J, Low Y.F, Seidler H, Rheinschimitt A, Wobrock T, D'Amelio R. Alterations in event related potentials (ERP) associated with tinnitus distress and attention. Applied Psychophysiology and Biofeedback. 2008; 33(4): 211–21.*
10. *Attias J, Urbach D, Gold S, Shemesh Z. Auditory event related potentials in chronic tinnitus patients with noise induced hearing loss. Hear Res. 1993;71(1):106–13.*
11. *Alonso-Valerdi L.M, Ibarra D. Evaluación de Terapias Acústicas para el Tratamiento del Tinnitus: Un protocolo de investigación basado en el análisis EEG. Memorias del Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica. 2017; 4(1): 174-177.*
12. *Yankaskas K. Prelude: Noise-induced tinnitus and hearing loss in the military. Hearing research. 2013; 295:3-8.*

La temperatura como indicador de confortabilidad en la valoración ergonómica de los casos de combate

Sagrario Alonso Díaz[(1)]*, Manuel Bernal Guerrero[(1)], Javier de Lucas Veguilla[(1)]

(1) Laboratorio de Factores Humanos y Laboratorio de Temperatura y Humedad, Centro de Metrología y Calibración, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

* Sagrario Alonso Díaz; alonsods@inta.es: (SAD).

Resumen

En los últimos años, el Ministerio de Defensa se ha planteado la gran importancia de la valoración del confort en la repercusión de la seguridad y la usabilidad de los elementos de protección individual. A la hora de afrontar un reto como establecer unos requisitos objetivos y replicables de confortabilidad que se puedan exigir a dichas protecciones, nos encontramos sistemáticamente con la posible dificultad del análisis de la subjetividad de la percepción humana, que no siempre es trivial mediante encuestas. Debido a esto, es trascendental encontrar indicadores biológicos claramente relacionados con la sensación de confort en los análisis y medidas que se realicen en todos nuestros equipos y, por qué no, vehículos o cualquier tipo de plataformas.

En este trabajo nos vamos a centrar en la relación entre la temperatura y la confortabilidad cuando estamos valorando cascos de combate que los soldados usan en sus tareas cotidianas, realizando en nuestro diseño actividades básicas representativas de aquellas tareas.

El hecho de que estas medidas puedan tomarse en un laboratorio, en condiciones controladas, replicables, con sensores de temperatura calibrados, confiere a estas medidas y a las relaciones encontradas, una validez difícilmente demostrada en otros ámbitos. Así, en un diseño elaborado para evaluar la confortabilidad de los cascos y que consta de medidas de laboratorio y de campo, se ha encontrado, entre otros resultados, una fuerte relación entre los incrementos de la temperatura tomada en la cabeza de los soldados, en el Laboratorio de Factores Humanos del INTA, y la atribución de confortabilidad que hacen los soldados a algunos de los elementos diseñados para mejorar la sensación de confort.

Palabras clave

Factores humanos, ergonomía, casco de combate, confort, temperatura, calibración.

1. Introducción

En los últimos años, el Ministerio de Defensa se ha planteado la gran importancia de la valoración del confort en la repercusión de la seguridad y la usabilidad de los elementos de protección individual. A la hora de afrontar un reto como establecer unos requisitos objetivos y replicables de confortabilidad que se puedan exigir a dichas protecciones, nos encontramos sistemáticamente con la posible dificultad del análisis de la subjetividad de la percepción humana, que no siempre es trivial mediante encuestas. Debido a esto, es trascendental encontrar indicadores biológicos claramente relacionados con la sensación de confort en los análisis y medidas que se realicen en todos nuestros equipos y, por qué no, vehículos o cualquier tipo de plataformas.

Las medidas tradicionalmente relacionadas con el confort han sido el peso y la talla. En el pasado, con la aparición de las armas de fuego, las protecciones evolucionaron incrementando su protección en peso de forma ostensible. Más tarde, la utilización de nuevos materiales ha contribuido a la disminución del peso. A su vez, ha habido que buscar un compromiso entre seguridad y comodidad, disminuyendo la superficie de cobertura para permitir ampliar el campo visual, así como elevar la zona trasera del casco de manera que se evite el contacto con el chaleco, permitiendo mayor movilidad.

En el procedimiento de valoración de cascos de combate elaborado por nuestro laboratorio, se han considerado parámetros como la temperatura, la inercia, la retención y atalajes, la estabilidad, la facilidad de colocación, el confort físico, la percepción subjetiva del centro de gravedad del casco con equipación añadida, el campo visual y la compatibilidad con otros elementos, como son el chaleco antifragmentos antibala, la mochila, sistemas de comunicación, armas, guantes, protecciones balísticas oculares, manejo de vehículos, visores y sistemas de bebida.

Algunos de los parámetros mencionados en el párrafo anterior se evalúan mediante encuesta, definidas de acuerdo con las necesidades de evaluación expresadas por el cliente. En este sentido, hay que resaltar que, desde hace unos años, tanto la Dirección General de Armamento y Material como el Ejército de Tierra han apostado por la evaluación ergonómica de sus materiales y equipos, especialmente sus equipos de protección individual. Que nuestros Ejércitos apuesten por un estudio científico e imparcial de sus equipos (lógicamente, no puede ser realizado por la empresa que desarrolla el propio material que pretende comercializar, sino que debería realizarse por un agente externo o perteneciente a la Administración Pública), significa que cada vez se ve con más claridad la necesidad de evaluación del confort y que se comprende el rigor científico de la ergonomía, como se puede comprender el de los estudios balísticos, con sus probabilidades e incertidumbres.

Una prueba representativa de que los factores humanos en general, y de que la evaluación de los mismos aplicada al casco de combate en particular, está en el punto de mira de los ejércitos más avanzados del mundo es que, recientemente, estos parámetros han sido recogidos en el STANAG 2902 de la OTAN, más algunos parámetros opcionales, complementando una valoración imprescindible de la ergonomía de este sistema de protección pasivo del combatiente.

Aunque en general el abordaje de la mayoría de las medidas relativas a la ergonomía se ha hecho tradicionalmente mediante encuesta, no hay que olvidar que se pueden obtener medidas calibradas y controladas en laboratorio que garanticen la obtención de resultados similares siguiendo los mismos métodos y que esas medidas se pueden poner en relación con la medida tradicional de la confortabilidad acotando el concepto debidamente. En el caso de la valoración de la ergonomía del casco de combate, uno de los factores más importantes para considerarlo confortable es la temperatura. Dado que se dispone de sensores de temperatura calibrados, y de las condiciones de temperatura ambiental constante ideales para hacerlo, la temperatura se convierte en un parámetro muy fiable. Una cuestión a tener en cuenta a la hora de evaluar la temperatura durante la realización de ejercicio físico, es cómo se comporta esta. Parece comprobado que, generalmente, la temperatura aumenta mientras hacemos ejercicio, pero puede seguir aumentando durante un tiempo mientras volvemos al reposo. Este matiz es importante a la hora de evaluar la confortabilidad y definir un procedimiento adecuado, que permita registrar la temperatura durante un periodo de tiempo posterior a la finalización de las actividades a realizar.

El estrés por calor es el disconfort y tensión fisiológica que se ocasiona por la exposición a ambientes calurosos, principalmente durante el trabajo físico [1] y es un factor importante en escenarios militares, así como en eventos deportivos y situaciones industriales [2]. Pero es complejo evidenciar la relación entre esta sensación de tensión fisiológica percibida y la sobrecarga fisiológica y psicológica. Además, hay que tener en cuenta otros factores que influyen en la percepción de la confortabilidad o desagrado de la persona, como son el género, la constitución corporal de la persona o la edad. En este sentido, cuanto menor es la edad o más pequeña es la persona, mejor adaptación tendrá a los incrementos de temperatura, dentro de unos márgenes. Las personas más corpulentas se adaptan mejor a las bajas temperaturas.

1.1. Objetivo

El objetivo es investigar la posible relación entre la temperatura periférica tomada en la cabeza bajo el casco de combate y la percepción de confort que tiene un soldado mientras realiza una tarea controlada en laboratorio, como indicador de estrés térmico. En este sentido, se considera que el casco contribuirá a incrementar la temperatura de la cabeza, al impedir el paso de la energía de esta hacia el medio ambiente. La percepción que las personas tenemos de la confortabilidad de los enseres que portamos, puede depender de muchas características de estos y de factores físicos y psicológicos propios. Además, se analizan las encuestas realizadas respecto de unas pruebas de campo con el mismo elemento de protección. Las encuestas elaboradas para la medición subjetiva del confort de los cascos de combate, recogen todas las características que se podrían estudiar de un casco y que podrían afectar a la confortabilidad, pero solo la utilización de los cascos y la investigación de una cantidad de datos representativa de la población de esos datos obtenidos a través de encuestas permitirá, con el tiempo, concluir la mayor o menor relevancia de dichas características en relación con el confort.

2. Desarrollo

2.1. Muestra

Se recoge información sobre la temperatura periférica en la cabeza, de 9 soldados realizando una serie de pruebas de laboratorio que forman parte del procedimiento «EM60004 de valoración de la ergonomía del casco de combate» del INTA y que se describe en siguientes apartados.

Además, se analizarán las encuestas realizadas por 30 soldados respecto de la confortabilidad del casco durante la realización de las pruebas de campo contempladas en el procedimiento mencionado. La edad está comprendida entre 20 y 33 años. Hay 4 mujeres y 26 hombres.

2.2. Materiales

Para medir la temperatura de los participantes se utilizó el sistema BIOPAC (Módulo MP-150), que es un sistema modular de registro de señales fisiológicas, y, entre otras, permite medir la temperatura

corporal, mediante un sensor que se coloca en la parte central y superior de la cabeza, como se muestra en la figura 1. Además, para realizar las pruebas que se describirán en el apartado del procedimiento, se utiliza una cinta de correr. Los soldados llevaban puesta su indumentaria reglamentaria y el casco de combate, según la correspondiente fase experimental.

Figura 1. Colocación de sensor de temperatura en la parte superior de la cabeza.

2.3. Procedimiento

El procedimiento general de «valoración de la ergonomía de los cascos de combate» -versión de 2016- consta de dos partes. La primera parte, son un conjunto de pruebas de laboratorio. Se valora la limitación de movimientos del casco en el uso conjunto con el chaleco realizando una serie de movimientos con el sistema de captura de movimientos kinescan. Además, se evalúa la limitación visual vertical del casco de combate con un patrón propio. En tercer lugar, se evalúa el incremento de temperatura que supone la realización de una tarea física, como es andar y correr en una cinta, al llevar el casco puesto, o sin él[1]. Por otra parte, hay un conjunto de pruebas de campo. Estas pruebas de campo consisten en la realización de una serie de actividades representativas de las actividades habituales de los soldados y con la equipación que han de usar, para poder valorar también la compatibilidad del casco de combate con el resto del equipo. Estas pruebas de campo se valoran mediante encuesta, que refleja la opinión subjetiva de los soldados respecto del uso de los cascos, aunque aquí se recogerán solamente algunos conceptos. La encuesta está subdividida en varias partes, que son A) ergonomía general, B) comodidad, C) atalaje - estabilidad, D) ajustes del casco y E) compatibilidad del casco con el equipamiento complementario. Además, se recogen datos de edad, peso, estatura y perímetro de cabeza. Cada una de estas partes consta de unas preguntas que el soldado ha de valorar de 1 a 5, según su grado de acuerdo con cada sentencia, siendo 1 el polo negativo y 5 el polo positivo de la escala. Aunque el análisis pregunta por pregunta sería muy interesante, en esta ocasión se va a exponer solo un resultado general.

Si bien es cierto que las pruebas de campo son más representativas de la realidad, por haber sido realizadas en condiciones naturales, a temperatura ambiente, todas ellas se llevaron a cabo en meses de primavera y verano, no teniéndose datos de las mismas pruebas en meses de frío invierno.

Las pruebas de laboratorio tienen la ventaja de haber sido realizadas en todos los casos bajo las mismas condiciones de temperatura, a una temperatura de 22 grados. Dado que la adaptabilidad a los cambios ambientales podría estar relacionada con la percepción que una persona tiene del confort en un momento dado, realizar las pruebas en un ambiente donde la temperatura sea constante puede garantizar mantener controlada esta adaptabilidad, que podría ser considerada una variable extraña a controlar del conjunto de las personas de la muestra. De todas las pruebas realizadas, nos hemos centrado en la temperatura

1 Las fases experimentales en esta parte del procedimiento son, por este orden, a) registro de la temperatura en la cabeza 3 minutos sentado y sin casco; b) registro de la temperatura en la cabeza 3 minutos sentado y con casco; c) registro de la temperatura en la cabeza 6 minutos andando a 5,5 km/h en cinta y con casco; d) registro de la temperatura en la cabeza 3 minutos corriendo a 8 km/h en cinta y con casco y e) registro de la temperatura en la cabeza 3 minutos sentado y con casco.

con el interés de conocer la posible relación entre algunos conceptos de la ergonomía y los incrementos de temperatura habidos en la cabeza, así como en tratar de estudiar otras características físicas y la valoración ergonómica del casco.

3. Resultados y discusión

3.1. Estudio de la relación entre la temperatura en la cabeza y el confort en las pruebas de laboratorio

Para los datos recogidos en el laboratorio, dado el escaso número de datos de los que se dispone, se ha optado por realizar una correlación no paramétrica denominada Thau-b de Kendall. Los resultados se exponen en las siguientes tablas, dado que la muestra no cumple los criterios de normalidad para poder aplicar un coeficiente de correlación de Pearson. Todos los análisis estadísticos han sido realizados con el paquete estadístico SPSS (versión 19).

Las variables que intervienen en las correlaciones realizadas son las siguientes: confort del casco, las temperaturas absolutas medidas en cada una de las fases experimentales (temperatura basal o reposo sin casco T_Rep_SC, temperatura en reposo con casco, T_Rep_CC, temperatura andando con casco, T_And_CC, temperatura corriendo con casco, T_Corr_CC, temperatura de recuperación una vez finalizado el ejercicio físico, T_Recup_CC, incremento de temperatura o diferencia entre la temperatura máxima alcanzada y la mínima, DIF_TEMP, incremento de temperatura o diferencia entre la temperatura máxima alcanzada durante la fase de realización del ejercicio físico y la mínima, DIF_TEMP_CORR. Además, se han recogido las opiniones mediante encuesta para realizar ciertos movimientos y adquirir ciertas posiciones, con el casco puesto, que se han correlacionado asimismo con los valores de temperatura. También se han incluido la edad, la estatura y el peso.

Los resultados se presentan separados por tablas para su mejor comprensión y son los siguientes:

1. El confort está relacionado con la edad. Se verá más adelante con el conjunto de datos de la encuesta cuál es el resultado de una correlación similar.

	Edad
Confort	ρ (Tau-b)= - 0.783
	p<=0.024

Tabla 1. Correlación entre edad y confort

2. La edad no está correlacionada con la temperatura basal recogida en condiciones de laboratorio.

Tau-b	DIF_TEMP	DIF_TEP_CORR
Confort	ρ (Rho)=0.650	ρ (Rho)=0.464
	p<=0.010 *	p<=0.049

Tabla 2. Correlación entre temperatura basal en la cabeza y edad

3. La percepción de confort no está correlacionada con valores absolutos de temperatura.
4. Cuanto mayor es la diferencia de temperatura entre la línea base en reposo sin casco y la temperatura que se alcanza corriendo, mejor es la opinión en cuanto a la confortabilidad. Cabría plantearse si la adaptabilidad a los cambios de temperatura está relacionada con una actitud más positiva para valorar la confortabilidad.

Tau-b	DIF_TEMP	DIF_TEP_CORR
Confort	ρ (Rho)=0.650	ρ (Rho)=0.464
	p<=0.010 *	p<=0.049

Tabla 3. Correlación entre confort e incremento de temperatura final y en fase de «correr»

3.2. Los resultados relativos a la encuesta realizada con las pruebas de campo muestran los siguientes resultados

En esta ocasión se utiliza la correlación de Pearson puesto que se pueden asumir los criterios de normalidad de la muestra, dado que se cuenta con 30 participantes.

Correlaciones								
	Edad	Estatura	Peso	Ergonomía	Confort	Atalaje-Estabilidad	Ajustes	Compatibilidad
Edad	1	-,451	-,315	-,445	-,323	-,427	-,174	,130
		,006	,045	,007	,041	,009	,179	,247
Estatura	-,451	1	,731	,477	,171	,484	,343	-,129
	,006		,000	,004	,183	,003	,032	,249
Peso	-,315	,731	1	,529	,240	,625	,535	,122
	,045	,000		,001	,101	,000	,001	,261
Parte_A	-,445	,477	,529	1	,606	,676	,685	,115
	,007	,004	,001		,000	,000	,000	,273
Parte_B	-,323	,171	,240	,606	1	,569	,496	,274
	,041	,183	,101	,000		,001	,003	,071
Parte_C	-,427	,484	,625	,676	,569	1	,857	,292
	,009	,003	,000	,000	,001		,000	,058
Parte_D	-,174	,343	,535	,685	,496	,857	1	,319
	,179	,032	,001	,000	,003	,000		,043
Parte_E	,130	-,129	,122	,115	,274	,292	,319	1
	,247	,249	,261	,273	,071	,058	,043	

Tabla 4. Correlaciones entre variables de la encuesta de pruebas de campo

Se han marcado en gris aquellas correlaciones que son significativas con una $p \leq 0,05$, aunque justo debajo de cada correlación aparece la probabilidad asociada. Por tanto están resaltadas aquellas correlaciones y sus probabilidades asociadas con $0,000 \leq p \leq 0,05$.

En estos resultados vuelve a aparecer la correlación significativa negativa entre la edad y la percepción de la confortabilidad. Por otra parte, correlacionan entre sí de forma significativa y positiva, la confortabilidad, la estabilidad del casco debida a los atalajes y el resto de ajustes (barbilla-occipital, ajuste vertical,…).

La compatibilidad del casco con el equipamiento complementario solo correlaciona positivamente con los ajustes del casco, cosa que es esperable, puesto que estos podrían entorpecer la colocación de algunos de ellos.

3.3. Resultados del ANOVA dividiendo la muestra en función del perímetro de cabeza

A la vista de los resultados anteriores, aunque la estatura de los participantes no correlaciona con el confort pero sí el peso, se plantea que, posiblemente, el perímetro de la cabeza, tenga alguna relación con la opinión que los evaluados dan sobre las características del casco. Para ello se divide la muestra en 3 grupos en función del perímetro de su cabeza y por lo tanto de la talla de casco que teóricamente necesitarían. Se realiza un ANOVA (tabla 5), del cual se muestran los resultados a continuación. Se han aplicado análisis post hoc de Bonferroni (tabla 6) para aquellas variables en las cuales se puede asumir la igualdad de varianzas de los 3 subgrupos y de Games-Howell (tabla7) cuando las varianzas no son iguales. Solo se muestran los resultados significativos ($p \leq 0,05$).

ANOVA						
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Edad	Inter-grupos	36,386	2	18,193	1,477	,246
	Intra-grupos	332,581	27	12,318		
	Total	368,967	29			
Estatura	Inter-grupos	425,649	2	212,825	3,384	,049
	Intra-grupos	1697,818	27	62,882		
	Total	2123,467	29			
Peso	Inter-grupos	1550,633	2	775,317	9,865	,001
	Intra-grupos	2122,033	27	78,594		
	Total	3672,667	29			
Parte_A	Inter-grupos	20,156	2	10,078	3,556	,043
	Intra-grupos	76,519	27	2,834		
	Total	96,675	29			
Parte_B	Inter-grupos	58,936	2	29,468	11,857	,000
	Intra-grupos	67,105	27	2,485		
	Total	126,042	29			
Parte_C	Inter-grupos	75,186	2	37,593	4,118	,027
	Intra-grupos	246,480	27	9,129		
	Total	321,667	29			
Parte_D	Inter-grupos	51,174	2	25,587	6,649	,004
	Intra-grupos	103,901	27	3,848		
	Total	155,075	29			
Parte_E	Inter-grupos	18,903	2	9,452	2,164	,134
	Intra-grupos	117,939	27	4,368		
	Total	136,842	29			

Tabla 5. Resultados del ANOVA

Comparaciones múltiples							
BONFERRONI: 0: TALLA PEQUEÑA, 1: TALLA MEDIANA; 2: TALLA GRANDE							
Variable dependiente	(I) TALLA_ ASCO	(J) TALLA_ ASCO	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Peso	0	2	-21,57	5,37	,001	-35,27	-7,86
	1	2	-16,17	4,15	,002	-26,76	-5,57
	2	0	21,57	5,37	,001	7,86	35,27
Ergonomía	0	2	-2,57	1,02	,053	-5,18	,027
Atalajes-Estabilidad	0	2	-5,25	1,83	,024	-9,92	-,58
Ajustes del casco	0	1	-2,84	,99	,023	-5,36	-,33
	0	2	-4,25	1,19	,004	-7,28	-1,22

Tabla 6. Análisis post hoc de Bonferroni

Comparaciones múltiples							
Games-Howell							
Variable dependiente	(I) TALLA_ ASCO	(J) TALLA_ ASCO	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Comodidad	0	1	-3,82	1,17	,052	-7,68	,049
	0	2	1,32	,35	,004	,42	2,21

Tabla 7. Análisis post hoc de Games-Howell

3.4. Discusión

Dado que la edad y la confortabilidad se relacionan negativamente (este resultado se encuentra en los dos análisis realizados), parecería necesario tratar de hacer una selección de la muestra que compense este efecto para que los resultados no aparezcan finalmente sesgados.

El confort no parece estar relacionado con los valores absolutos de temperatura de los soldados en ninguna de las condiciones de recogida de la temperatura en la cabeza, pero sí con la diferencia con respecto a la línea base, «cantidad de cambio» o «adaptabilidad» de las personas. Pero, dado que la adaptabilidad de las personas a los ambientes debido a los cambios de temperatura sí parece estar relacionada con la corpulencia de las personas, y que hemos obtenido que la opinión sobre la confortabilidad está claramente relacionada con esa versatilidad o capacidad de cambio que demuestra una persona en su temperatura corporal, sería muy importante recurrir a muestras al menos representativas de la población militar, poniéndose así de manifiesto la importancia de mantener al día las bases de datos de tallajes y medidas de nuestros soldados.

Por lo tanto vemos que la diferencia de temperatura, está relacionada significativamente con el confort. Pero si correlacionamos el confort con la estatura y el peso (que determinan la corpulencia) no se encuentra relación significativa entre la primera y el confort. Teniendo en cuenta que estatura y peso tienen entre sí una relación directamente proporcional, pero que el perímetro craneal depende de la forma de la cabeza además de la envergadura de la persona, se procede a dividir la muestra en tres grupos de perímetro y se encuentra que el comportamiento de la variable confort sitúa al grupo de la talla mediana en clara ventaja respecto a los otros dos respecto de esta variable. El hecho de encontrar diferencias significativas entre los tres grupos de perímetro de cabeza en cuatro de los cinco conceptos evaluados en la encuesta (ergonomía general, confortabilidad, atalajes-estabilidad y evaluación de los ajustes) nos lleva a pensar en que, en general, hay un grupo de personas más beneficiado (el de perímetro grande) y otro más perjudicado (el de perímetro pequeño), lo que puede observarse en la figura 2.

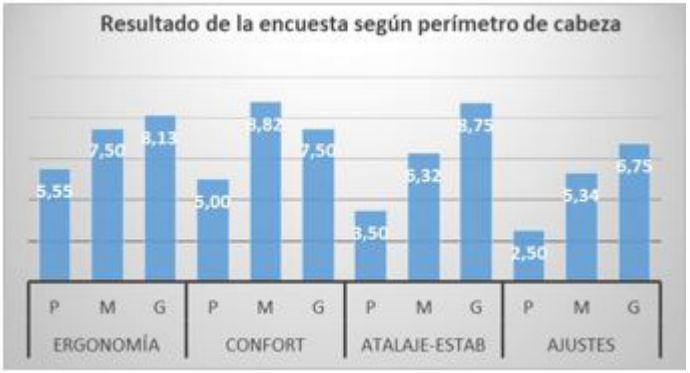


Figura 2. Las puntuaciones más bajas en la encuesta, en una escala de 1 a 10, son las de las personas con perímetro de cabeza más pequeño.

Respecto a los datos que se ofrecen en el análisis de la encuesta de las pruebas de campo, se obtiene una clara independencia del análisis que los soldados hacen mediante este análisis de la compatibilidad del casco con el resto de los elementos de la equipación y de la importancia de contrastar si los ajustes del casco o la propia calota entorpecen el uso de algún otro elemento.

4. Conclusiones

Los valores absolutos de la temperatura no se relacionan con la percepción de confortabilidad. Sin embargo, sí lo hace la diferencia entre la temperatura inicial y final experimental, lo que puede ser debido a la adaptabilidad de la persona. De la misma forma, la edad y la percepción de confortabilidad están relacionadas negativamente.

Todos los resultados hallados en cuanto a temperatura abundan en la necesidad de seleccionar la muestra a evaluar de forma correcta en cuanto a edad, estatura, peso, género (relacionado con los anteriores), así como revisar las bases de datos de tallajes y medidas de los soldados españoles.

Del estudio de la diferencia de temperaturas y su relación con la corpulencia de las personas se ha tratado de llegar a explicar los resultados encontrados, lo cual ha llevado a la conclusión de que existe la necesidad de estudiar profundamente los datos relativos a la existencia de un solo tamaño de calota, y, si bien esta composición pudiera ser aceptable para las personas con perímetro correspondiente a una talla mediana o grande, en ninguno de los conceptos analizados las personas con perímetro menor se ven beneficiadas y, por ende, las menos corpulentas, de menos peso y quizá de menor estatura.

Referencias

1. *Piñeiro, N., Martínez, J.L. Alemparte, Rodríguez J.C. Golpe de calor. Emergencias. 2004; 16, 116-125.*
2. *Epstein, Y. y Moran., D.S. Thermal Comfort and the Heat Stress Indices. Industrial Health. 2006; 44(3):388-398.*

4C. Telemedicina

Plataforma de monitorización biomédica para la monitorización de actividades subacuáticas

Izquierdo, David[1,2]*, Lázaro, Arturo[2], Hernando, Alberto[1,2,4], Altabás, José Antonio[2], Clemente, Jesús[2], Peláez-Coca, María Dolores[1,2,4], Lozano, María Teresa[1,2], López-Jurado, María Isabel[3] y Gil, Eduardo[2,4]

[1] Centro Universitario de la Defensa (CUD), Academia General Militar (AGM), ctra. Huesca s.n., 50090, Zaragoza, España.

[2] Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza, c/ Mariano Esquillor, Edificio I+D+i, 50018, Zaragoza, España.

[3] Hospital General de la Defensa, Vía Ibérica 1, 50009, Zaragoza, España.

[4] Centro de Investigación Biomédica en Red de Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Madrid, España.

Email:

* Autor principal y responsable del trabajo: d.izquierdo@unizar.es

Resumen

La monitorización del estado y rendimiento del personal responsable de realizar actividades de gran exigencia física o actividades de riesgo, es crucial para el adecuado desempeño de sus funciones. Entre las actividades más estresantes y peligrosas, por el entorno donde se realizan, están las actividades subacuáticas de rescate o exploración. En este tipo de actividades es crucial la monitorización y control de las condiciones del personal para la prevención de posibles accidentes. Entre los accidentes más peligrosos están los resultantes por un inadecuado proceso de descompresión, al no respetarse los tiempos de ascenso de la inmersión, o los resultantes de acumulación de gases en los tejidos en cantidades superiores a lo normal que pueden causar una intoxicación por CO_2, por N_2 (narcosis de las profundidades), o por O_2 (crisis hiperóxica o efecto Paul Bertlos).

Para esta monitorización en tiempo real, se presenta una plataforma de registro, no invasivo, de la señal biomédica plestimográfica (PPG) para su futuro uso en actividades subacuáticas de rescate o exploración. Esta plataforma realiza el registro y procesado en tiempo real de la señal plestimográfica para la detección de posibles estados inadecuados para la realización de actividades de riesgo como el buceo a la vez que retransmite dicha información a un servidor central de control. Además del registro de la PPG, la plataforma desarrollada incorpora un sensor de temperatura corporal, un sensor de presión y un acelerómetro para detectar artefactos en la señal PPG que sean producidos por el movimiento del sujeto y mejorar las correlaciones con las señales registradas y la profundidad de la inmersión.

Palabras clave

Biomedicina, PPG, buceo, *hardware.*

1. Introducción

La monitorización del estado y rendimiento del personal responsable de realizar actividades de gran exigencia física o actividades de riesgo es crucial para el adecuado desempeño de sus funciones. Por ello, dentro de la estructura de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID) de 2015, destaca la meta tecnológica MT 4.2.1 Rendimiento efectivo en operaciones la cual tiene como objetivo el desarrollo de tecnologías y/o herramientas que permitan mantener el rendimiento operativo del combatiente en unos niveles óptimos. La plataforma de monitorización biomédica desarrollada se enmarca en esta meta tecnológica y tiene como objetivo a largo plazo la evaluación del estado del personal a través de la medida del sistema nervioso autónomo (ANS) que es el encargado de mantener la homeostasis o equilibrio interno del organismo [1].

Entre las actividades más estresantes y peligrosas, por el entorno donde se realizan, están las actividades subacuáticas de rescate o exploración que realizan los buzos. En este tipo de actividades es crucial la monitorización y control de las condiciones de los buzos para la prevención de posibles accidentes. Entre los accidentes más peligrosos están los resultantes por un inadecuado proceso de descompresión, al no respetarse los tiempos de ascenso de la inmersión, y que representan el 88 % de los accidentes en submarinismo [2]. Otros accidentes a destacar son los resultantes por la acumulación de gases en los tejidos en cantidades superiores a lo normal que pueden causar una intoxicación por CO_2, por N_2 (narcosis de las profundidades), o por O_2 (crisis hiperóxica o efecto Paul Bertlos).

Para esta futura monitorización en tiempo real en actividades subacuáticas de rescate o exploración, se ha desarrollado una plataforma de registro, no invasivo, de la señal biomédica plestimográfica (PPG). Esta plataforma realiza el registro y procesado básico en tiempo real de la PPG para la detección de posibles estados inadecuados para la realización de actividades de riesgo como el buceo a la vez que retransmite la señal original a un servidor central para su almacenamiento y procesado más exhaustivo. Además, la plataforma desarrollada incorpora sensores adicionales para detectar artefactos en la señal PPG ya sean producidos por el movimiento del sujeto o por cambios en la luz ambiente, así como un sensor de presión para correlar las señales registradas y la profundidad de la inmersión.

2. Monitorización no invasiva en entornos hiperbáricos

La respuesta del ANS ante los cambios fisiológicos en entornos hiperbáricos ha sido estudiada en varios trabajos a partir de la variabilidad del ritmo cardíaco (HRV), tanto en el dominio temporal [3-4] como en el frecuencial [5-6]. En todos ellos se obtenía la HRV a partir del registro del electrocardiograma (ECG) y se realizaba un análisis estacionario de las señales. La condición de estacionariedad y la adquisición del ECG en entornos subacuáticos e hiperbáricos presentan importantes restricciones, mientras que la fotopletismografía aparece como una excelente alternativa en estos entornos. La señal plestimográfica (PPG), cuya componente alterna está asociada al pulso arterial y es causada por los latidos cardiacos,

ya se ha demostrado que puede ser un sustituto del ECG para la evaluación del ANS, incluso en condiciones no estacionarias [7], a partir de la variación del pulso cardiaco (PRV) como sustituto de la HRV.

La fotopletismografía es una técnica óptica no invasiva muy usada por pulsioxímetros comerciales. Esta técnica se basa en la medida de la interacción entre la luz y la hemoglobina presente en el torrente sanguíneo durante la perfusión de la sangre en la dermis y el tejido subcutáneo. Este flujo sanguíneo dérmico también es modificado a la vez por otros múltiples sistemas fisiológicos, por lo que la PPG no solo puede ser usada para medir el ritmo cardiaco, si no para monitorizar la respiración, la hipovolemia y otros fenómenos circulatorios [8].

La PPG puede obtenerse a partir de la absorción de la luz en trasmisión (como en la punta de un dedo) o de la reflexión de la misma (como en la frente). Esta señal tiene tres componentes principales: arterial, venosa y resto de tejido [9]. De estas tres componentes, la sangre arterial es la componente más importante para la determinación del PRV, ya que los vasos sanguíneos arteriales se deforman como consecuencia de la presión que ejerce el bombeo del corazón, haciendo variar la PPG a este ritmo de bombeo.

Por otro lado, a partir de la PPG también se puede extraer información del nivel de saturación de oxígeno en sangre. Para ello, se hace uso de la distinta absorción y reflexión que presenta la hemoglobina en presencia o ausencia de oxígeno. Así, la hemoglobina en presencia de oxígeno (HbO_2) presenta una menor absorción en la banda del color rojo (en torno a 650nm) pero apenas presenta diferencia de absorción en las bandas de 550nm (verde) y 850nm (infrarrojo cercano). A partir de esta diferencia de absorción de la hemoglobina en función del oxígeno que transporta se puede obtener la saturación de oxígeno en capilares periféricos (SpO_2), definida como la relación entre la oxihemoglobina respecto al total de hemoglobina presente en el torrente sanguíneo [10].

Aunque la mayoría de los pulsioxímetros comerciales realizan la medida en transmisión, cada vez es mayor el número de dispositivos que realizan la medida en reflexión ya que puede usarse sobre prácticamente cualquier superficie del cuerpo humano y no solo en las extremidades. Este tipo de medida presenta menor relación señal a ruido, por lo que su correcta detección y procesado es fundamental para conseguir buenos resultados. Además, es clave elegir adecuadamente la zona de cuerpo humano sobre la que registrar la PPG, no solo para mejorar la calidad de la señal registrada, sino porque en ambientes de estrés y situaciones de shock o de hipotermia, el cuerpo humano regula su temperatura interior y puede reducir el flujo sanguíneo generando artefactos [11].

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto y ante la necesidad de la monitorización del estado de los buzos, es imprescindible contar con un detector de la PPG compatible con las actividades subacuáticas. Este detector debe ser portable, de pequeño tamaño, que no interfiera con los movimientos o la seguridad del buceador y que realice la detección en tiempo real. Por ello, hemos desarrollado una plataforma de registro, no invasivo, de la señal biomédica plestimográfica (PPG) para su futuro uso en actividades subacuáticas de rescate o exploración.

3. Diseño de la plataforma

La plataforma de monitorización consta de dos elementos como se muestra en la figura 1. El primer elemento desarrollado es un pulsioxímetro que incorpora además del sensor de PPG un acelerómetro y tres sensores adicionales: temperatura corporal, luz ambiente y presión. Este dispositivo se conecta con el siguiente elemento que es un *software* de control y adquisición implementado en una Raspberry Pi 3. Dicho *software* no solo se encarga de configurar todos los sensores del pulsioxímetro, así como de la adquisición de los datos de cada uno de ellos, sino que representa la información por pantalla y realiza un pre-procesado *on-line* que permite una valoración pre-eliminar de los resultados más destacados de la señal PPG y retransmite las señales a un servidor central donde se almacena y procesan *off-line* con algoritmos más complejos.

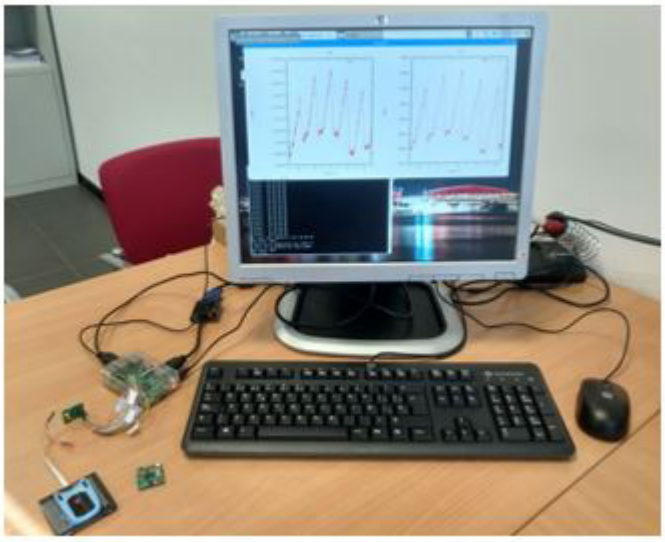


Figura 1. Fotografía de la plataforma de monitorización desarrollada.

a. Pulsioxímetro

En el pulsioxímetro desarrollado (figura 2) se ha integrado un sensor de PPG comercial de tres LED y un fotodiodo junto con un controlador para su interrogación. El uso de un sensor con tres LED permite no solo detectar el ritmo cardíaco, sino también la saturación de oxígeno gracias al ratio entre dos de dichos LED (rojo e infrarrojo). Por su parte, el controlador es el encargado de realizar la secuencia de encendido y apagado de los LED así como de la amplificación y digitalización (a 500 muestras por segundo) de la señal captada por el fotodiodo integrado en el mismo sensor. Esta señal digitalizada se transmite a la Raspberry PI 3 de control a través del bus de comunicaciones SPI.

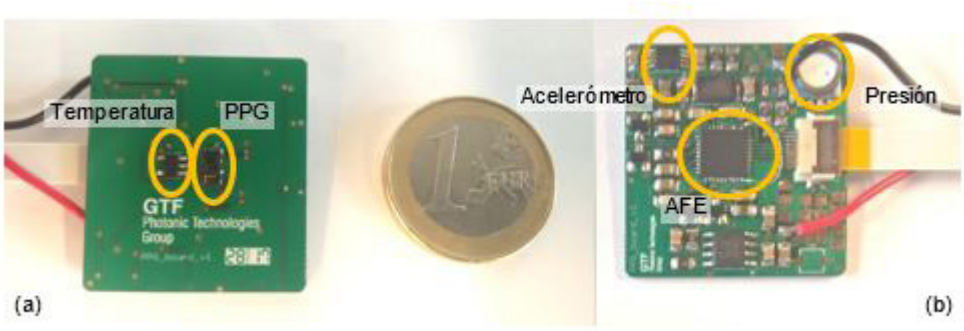


Figura 2. Fotografías del pulsioxímetro desarrollado: (a) cara inferior, y (b) cara superior.

Además, en el mismo pulsioxímetro, se han integrado un sensor digital de temperatura corporal junto al sensor de PPG y en contacto con la dermis del sujeto, un sensor de presión y un acelerómetro. Estos tres sensores son digitales y se captura sus datos a 100 muestras por segundo. Esta tasa es menor que la de la señal de PPG para evitar una saturación del bus I2C que se usa para la comunicación con el *software* de control y que comparten los tres sensores.

b. Software de control

Tanto el *firmware* de control y adquisición como el *software* de procesado se han implementado en la plataforma comercial Raspberry Pi 3. El *firmware* de control y adquisición es el encargado de configurar todos los sensores del pulsioxímetro así como de la adquisición de los datos de cada uno de ellos a las tasas antes comentadas. Estos datos los almacena en un *buffer* doble de tipo ping-pong para garantizar la integridad de los datos y que no se pierda ninguna muestra captura por los sensores. Los datos almacena-

dos en este doble *buffer*, se vuelcan en disco de donde se alimenta el *software* de pre-procesado de bajo coste computacional a la vez que se transmiten vía *Wifi* a un servidor central para su almacenamiento y posterior procesado *off-line*.

Realizar una detección robusta de los instantes de ocurrencia de los pulsos de la PPG no es una tarea fácil y la mayoría de los algoritmos son pesados y requieren elevadas prestaciones de procesamiento para ser robustos. En nuestro caso, se ha optado por implementar un *software* de procesado mucho más básico y sencillo en la Raspberry Pi 3 para que pudiera ser una monitorización *on-line* y dejar el procesado robusto y más exhaustivo en un servidor de mayor capacidad computacional.

4. Evaluación de la plataforma desarrollada

Para la validación de la plataforma desarrollada se ha realizado el registro simultáneo de la señal PPG utilizando el prototipo y un dispositivo comercial. En este registro simultáneo han participado 12 voluntarios a los que se registró durante 5 minutos la señal PPG en estado de reposo en el dedo índice de ambas manos con la plataforma desarrollada y con el dispositivo comercial Nautilus, como se ilustra en la figura 3.

Figura 3. Fotografía de un sujeto durante el registro de la base de datos.

Las señales registradas por ambas plataformas se preprocesaron para reducir el nivel de ruido mediante un filtrado paso banda que elimina el ruido de alta frecuencia y las variaciones de la línea de base de la señal. A continuación se realizó la detección de los pulsos mediante un algoritmo basado en un filtro diferenciador paso bajo que realza las zonas de fuerte pendiente asociadas a la parte de la onda PPG correspondiente a la sístole [12].

Tomando como referencia las detecciones de los pulsos se determinaron los puntos fiduciales de cada latido cardiaco en la señal PPG de ambos dispositivos y se procedió a su sincronización. Para ello, se calcularon las series PP (pulso a pulso) y se determinó el alineamiento de las mismas a nivel de latido mediante un análisis de correlación cruzada de ambas series PP y un análisis visual de dichas series.

La validación final se realizó mediante la estimación del ritmo cardíaco a partir de los pulsos detectados en la señal registrada por la plataforma y la registrada por el dispositivo comercial. Para ello se calculó el número de latidos en una ventana de 1 minuto, que se fue desplazando cada 10 segundos, de forma que se obtiene una estimación del ritmo cardiaco del sujeto cada 10 segundos. El error relativo de la estimación se calcula mediante

$$Error\ relativo = \frac{ritmo\ cardiaco\ de\ la\ señal\ a\ testear - ritmo\ cardiaco\ de\ la\ señal\ referencia}{ritmo\ cardiaco\ de\ la\ señal\ referencia} \quad (1)$$

Además, se comparó el tiempo en que ambas señales presentaban artefactos mediante un detector de artefactos basado en los parámetros Hjorth y la supervisión manual de las señales, determinando así el porcentaje del tiempo en el que no se pueden estimar los pulsos debido a los artefactos.

$$\%\ tiempo\ artefactado = \frac{tiempo\ (s) con\ artefactos}{tiempo\ total\ (60\ s)} * 100 \quad (2)$$

La tabla 1 muestra los resultados de validación, incluyendo el error relativo en la estimación del ritmo cardiaco y el porcentaje de tiempo con artefactos del dispositivo comercial (Nautilus) y la plataforma desarrollada (BioDiving).

Tabla 2. Resultados de la validación de la plataforma

Sujeto	Error relativo	% t artefactos Nautilus	% t artefactos BioDiving
# 1	0,0065 ± 0,0078	0,28 ± 0,00	0,88 ± 0,95
# 2	0,0124 ± 0,0151	0,28 ± 0,00	3,45 ± 2,70
# 3	0,0108 ± 0,0102	0,28 ± 0,00	0,33 ± 0,11
# 4	0,0260 ± 0,0326	0,28 ± 0,00	1,09 ± 1,58
# 5	0,1039 ± 0,1199	0,28 ± 0,00	6,66 ± 3,28
# 6	0,0189 ± 0,0237	0,28 ± 0,00	0,55 ± 0,00
# 7	0,0520 ± 0,0408	0,28 ± 0,00	4,01 ± 3,12
# 8	0,0250 ± 0,0311	0,30 ± 0,11	0,96 ± 1,26
# 9	0,0093 ± 0,0111	0,28 ± 0,00	1,76 ± 2,24
# 10	0,0191 ± 0,0144	0,35 ± 0,24	0,77 ± 0,67
# 11	0,0613 ± 0,0747	0,31 ± 0,17	0,44 ± 0,14
# 12	0,0179 ± 0,0482	0,30 ± 0,11	0,60 ± 0,38
Total	0,0303 ± 0,0286	0,29 ± 0,02	1,79 ± 1,94

Como conclusión, se observa a partir de los resultados que aunque la nueva plataforma es más sensible a los artefactos el error cometido en el ritmo cardiaco es muy pequeño. Se debe recalcar de nuevo que la estimación de los pulsos de cada señal se ha realizado solo en aquellas zonas donde no había artefactos en ambas señales.

Además, de esta comparativa también podemos extraer los siguiente pasos a realizar de cara a mejorar la plataforma. En primer lugar está la sensibilidad a los artefactos ya que esta problemática es propia del registro de la señal PPG en cuanto a artefactos de movimiento, no obstante durante el registro de la base de datos se observó que la calidad de las señales se degradaba en algunos sujetos.

Otros aspectos a tener en cuenta son la adaptación del sensor al tamaño de dedo del sujeto, la reducción de la luz ambiente que capta el sensor e incrementar la fiabilidad de las medidas. También se ha detectado un problema relativo al sincronismo de las señales que puede ser debido al proceso de conversión analógico digital o a la exactitud del reloj utilizado para el muestreo de la señal que deberá ser analizado en trabajos posteriores.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado una plataforma de registro, no invasivo, de la señal biomédica plestimográfica (PPG) para la futura monitorización en tiempo real en actividades subacuáticas de rescate o exploración. Esta plataforma realiza el registro y procesado básico en tiempo real de la PPG para la detección de posibles estados inadecuados para la realización de actividades de riesgo. Además, la plataforma desarrollada incorpora sensores adicionales para detectar artefactos en la señal PPG ya sean producidos por el mo-

vimiento del sujeto o por cambios en la luz ambiente. Por último, la plataforma también cuenta con un sensor de presión para su registro y búsqueda de correlaciones con las señales registradas y la profundidad de la inmersión.

En la actualidad, la plataforma de registro está siendo evaluada para su posterior homologación para su uso en el interior de cámaras hiperbáricas. Una vez sea homologada, se usará para la monitorización en tiempo real de sujetos sometidos a terapias hiperbáricas para el tratamiento de distintas enfermedades o patologías.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Centro Universitario de la Defensa a través del proyecto CUD2017-10, por la Universidad de Zaragoza a través de los proyectos UZCUD2017-TEC-04 y UZCUD2018-TEC-07.

Referencias

1. *Guyton A., Hall J. Textbook of Medical Physiology. Elsevier: 2006.*
2. *Salas E, García-Cubillana JM, Samalea F. Manual de medicina subacuática e hiperbárica. Servicio de Medicina Subacuática e Hiperbárica, Hospital General de la Defensa de San Carlos, Cádiz, Spain, 2007.*
3. *Al-Haddad H, Laursen PB, Chollet D, Lemaitre F, Ahmaidi S, Bucheit M. Effect of cold or thermoneutral water immersion on post-exercise heart rate recovery and heart rate variability indices. Auton Neurosci, 2010; 156(1): 111-16.*
4. *Schipke JD, Pelzer M. Effect of immersion, submersion, and scuba diving on heart rate variability. Br J Sports Med, 2001; 35: 174-80.*
5. *Becker BE, Hildenbrand K, Whitcomb RK, Sanders JP. Biophysiologic Effects of Warm Water Immersion. International Journal of Aquatic Research and Education. 2009; 3: 24-37.*
6. *Mourot 2008 – Mourot L, Bouhaddi M, Gandelin E, Cappelle S, Dumoulin G, Wolf JP, Regnard J. Cardiovascular autonomic control during short-term thermoneutral and cool head-out immersion. Aviation, Space, And Environmental Medicine. 2008; 79(1): 14-20.*
7. *Gil E, Orini M, Bailón R, Vergara JM, Mainardi L, Laguna P. Photoplethysmography pulse rate variability as a surrogate measurement of heart rate variability during non-stationary conditions. Physiol. Meas. 2001, 31: 1271-1290.*
8. *Reisner AT, Shaltis PA, McCombie D, Asada HH. Utility of the Photoplethysmogram in Circulatory Monitoring. Anesthesiology. 2008; 108: 950-958.*
9. *Klabunde R. Cardiovascular Physiology Concepts (2nd ed.). Lippincott, Williams & Wilkins; 2011.*
10. *Mendelson Y, Ochs BD. Noninvasive pulse oximetry utilizing skin reflectance photoplethysmography. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1988; 35: 798-805.*
11. *Hernando A, Sánchez A, Lázaro J, Gil E, Izquierdo D, Lozano MT, Aiger M, Peláez-Coca MD. Estudio de la localización más efectiva del sensor de PPG para su registro durante la realización de actividades de alta movilidad. IV Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, 2016.*
12. *Hernando A, Peláez-Coca MD, Lozano MT, Aiger M, Izquierdo D, Sánchez A, López-Jurado MI, Moura I, Fidalgo J, Lázaro J, Gil E. Autonomic Nervous System Measurement in Hyperbaric Environments using ECG and PPG signals, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. 2017. doi: 10.1109/JBHI.2018.2797982.*

Área V - NBQRe

5A. Lucha contra IED

Proyecto IEDDSE (*IED Detection Systems Effectiveness*) para la evaluación global de la eficacia de detección de IED

Piñeiro García de León, Juan J.[1], Martín Romero, Enrique[2] y Mingote, José Luis[3].

[1] E&Q Engineering. Plaza del 11 de Marzo, Alcala de Henares 28807, Madrid. Correo electrónico: j.pineiro@eqeng.com

[2] E&Q Engineering. Correo electrónico: e.martin@eqeng.com

[3] C-IED COE. Correo electrónico: jmingote@ciedcoe.org

Resumen

Uno de los aspectos clave en el marco de la lucha C-IED ha sido desde hace décadas la búsqueda (IED *search*) y detección (IED *detection*) de estos artefactos. Asimismo, se han desarrollado diversos sistemas de detección para facilitar dichas actividades. Sin embargo, se carece de procedimientos y estándares aceptados multinacionalmente, que permitan evaluar la eficacia global de los sistemas de detección de IED en su empleo y aplicación táctica.

El Centro de Excelencia aliado C-IED y la empresa española E&Q, han realizado este proyecto de investigación sobre un modelo de evaluación de la eficacia de los sistemas de detección IED (IEDDSE), desarrollando una metodología y un marco de referencia para la evaluación y comparación de las tácticas, técnicas y procedimientos relacionados con la detección de IED en escenarios operativos representativos y utilizando una arquitectura jerárquica de medidas de eficacia y rendimiento diseñada con enfoque general, sin focalizarse en tecnologías concretas. Por estos fundamentos, IEDDSE es aplicable a cualquier sistema de detección o, incluso, a un conjunto de sistemas de detección de tecnologías diferentes y que actúen conjuntamente en el mismo escenario, zona de amenaza o área de detección.

El modelo IEDDSE es genérico y permite evaluar la eficacia en la detección de IED en cualquier escenario, habiendo contemplado en el proyecto dos de gran interés (Afganistán, Mali) con viñetas y esquemas de situaciones tácticas representativas. La evaluación se realiza desde el punto de vista del usuario, unidades y mandos responsables de la formación, adiestramiento y empleo de los sistemas de detección de IED, englobando múltiples aspectos asociados con su empleo, tanto técnicos como operativos o de la propia amenaza.

Palabras clave

IED (artefactos explosivos improvisados); IED *search*; IED *detection*; eficacia; evaluación.

1. Introducción

1.1. Alcance

El ámbito del proyecto IEDDSE se enmarca dentro del pilar de la lucha contra el artefacto (*Defeat-the-Device –DtD-*) y está relacionado con las etapas de detección, neutralización y mitigación, pero fundamentalmente con la de detección.

En IEDDSE, el fin principal es la evaluación y comparación de sistemas de detección IED en escenarios realistas e independientemente del tipo de tecnología empleado. Dado que los niveles de madurez de tecnologías (TRL) por debajo de 6 no incluyen demostraciones en un entorno operativo relevante e IEDDSE considera la evaluación en entornos militares realistas (frente a un entorno de laboratorio), el foco del proyecto incide en TRL mayores que 6.

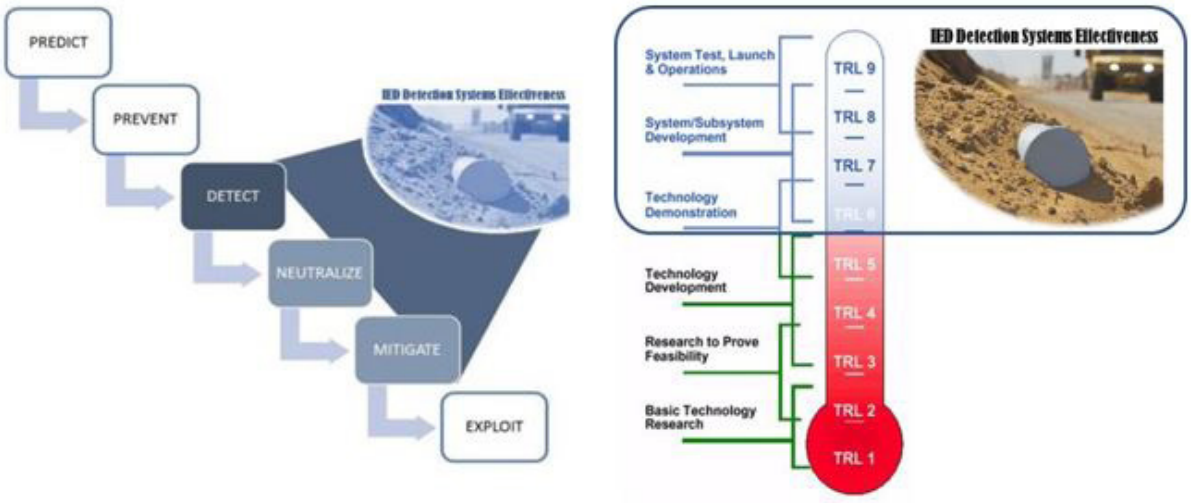


Figura 1. Izda. Alcance del proyecto IEDDSE dentro de la línea temporal de la lucha C-IED. Dcha. Niveles de madurez tecnológicos (TRL) e IEDDSE.

El proyecto se ha desarrollado con una visión holística y su metodología permite considerar, no solo amenazas de artefactos explosivos estáticos (como los IED enterrados), sino también dinámicas como los PBIED y SVBIED (terroristas suicidas a pie –*Person-Borne* IED– o en vehículos –*Suicide Vehicle-Borne* IED–) o amenazas emergentes como los IED embarcados en vehículos aéreos no tripulados (UAV-*borne* IED).

1.2. Metodología

La metodología IEDDSE consiste en un marco de referencia para realizar la evaluación de cualquier sistema de detección IED. En la siguiente figura se incluye un diagrama de alto nivel de dicha metodología que consiste en un proceso de nueve etapas o bloques.

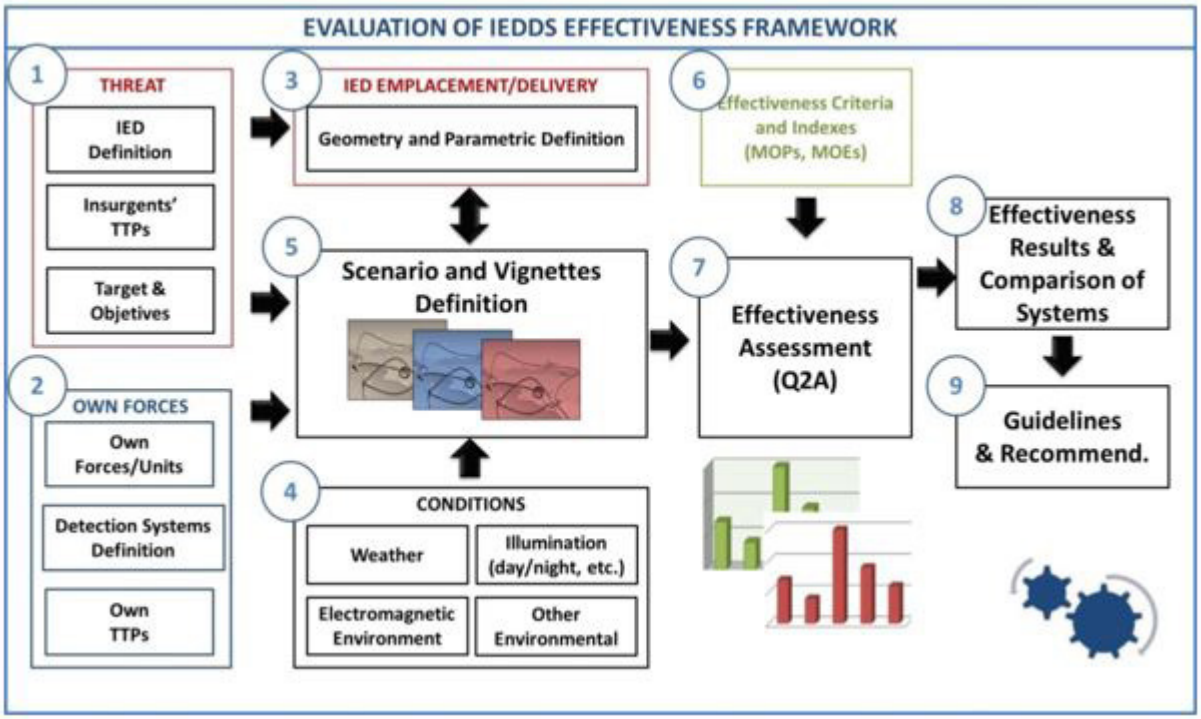


Figura 2. Marco conceptual y metodología IEDDSE. Elaboración: E&Q Engineering.

Dichos bloques se describen someramente a continuación:

1. El bloque 1 corresponde a la amenaza IED e incluye su definición, las tácticas, técnicas y procedimientos (TTPs) de los insurgentes y su blanco y objetivos.
2. El bloque 2 (fuerzas propias) comprende la definición y descripción de la Unidad (ej. pelotón, patrulla a pie) y de todo su personal, los vehículos tripulados y no tripulados y otros materiales y sistemas empleados en la misión; los sistemas de detección de IED empleados y las TTP propias.
3. El bloque 3 refiere el emplazamiento, proyección del IED o traslado por un portador (*delivery*).
4. El bloque 4 está relacionado con las condiciones atmosféricas (viento, lluvia, niebla, humedad, etc.) y otras condiciones ambientales que podrían afectar a la misión (luz, polvo, entorno electromagnético…). Este bloque también contempla otras restricciones que el escenario y la viñeta pudieran imponer a la operación de detección utilizando un tipo de sistema/tecnología. Por ejemplo, si el sistema de detección es portado por un UGV, la presencia de obstáculos; si es portado por un UAV, la existencia o no de línea de visión directa, etc.
5. El bloque (definición del escenario y las viñetas), incluye la definición de un escenario representativo junto con las viñetas correspondientes para describir la evolución temporal.

   Una vez definidos los escenarios y sus viñetas, se definen los esquemas de ensayos junto con un conjunto de simulantes o réplicas de IED (*IED surrogate* en terminología anglosajona).
6. El bloque 6 (criterios de eficacia) incluye la definición de las medidas de mérito a emplear en la evaluación (*Measures of Performance* –MOP–, *Measures of Effectiveness* –MOE–).
7. El bloque 7 comprende la evaluación cuantitativa y cualitativa basada en los MOP y MOE definidos.

8. El bloque 8 contiene los resultados de la evaluación y un ranking de alternativas para la comparación en la que se utilizan técnicas de decisión multi-criterio.
9. Por último, el bloque 9 se ha incluido para proporcionar directrices y recomendaciones derivadas del proceso y también para la elaboración de estándares (ej. STANAG).

2. Escenarios y viñetas

Los principales escenarios considerados en el proyecto IEDDSE son representativos respecto a la amenaza IED (ej. número de incidentes IED, ataques efectivos y bajas). Cada escenario está dividido en viñetas y tareas militares relacionadas con la detección IED. Las viñetas representan un área reducida dentro del escenario y en un periodo limitado de tiempo y contienen IED y potenciales objetivos de los insurgentes.

Dos escenarios representativos han sido contemplados en el proyecto: Afganistán y Mali. Todas las viñetas de estos escenarios fueron definidas para un entorno terrestre. La extensión a un entorno marítimo podría hacerse definiendo las correspondientes viñetas.

Por ejemplo, las siguientes viñetas fueron consideradas para el escenario de Afganistán:

1. Ruta de un convoy.
2. Patrulla a pie en un escenario rural.
3. Patrulla a pie en un entorno urbano poblado.

3. Esquemas de ensayo y simulantes de IED

Los esquemas de ensayo especifican el entorno, el simulante de IED y todos los parámetros relevantes para la viñeta y el tipo de IED (parametrización de la escena). Estos parámetros incluyen las coordenadas de todos los elementos (se asume que las coordenadas absolutas son registradas por medio de equipos de medida precisa como RTK-GPS).

Un ejemplo de un esquema de ensayo se muestra en la siguiente figura.

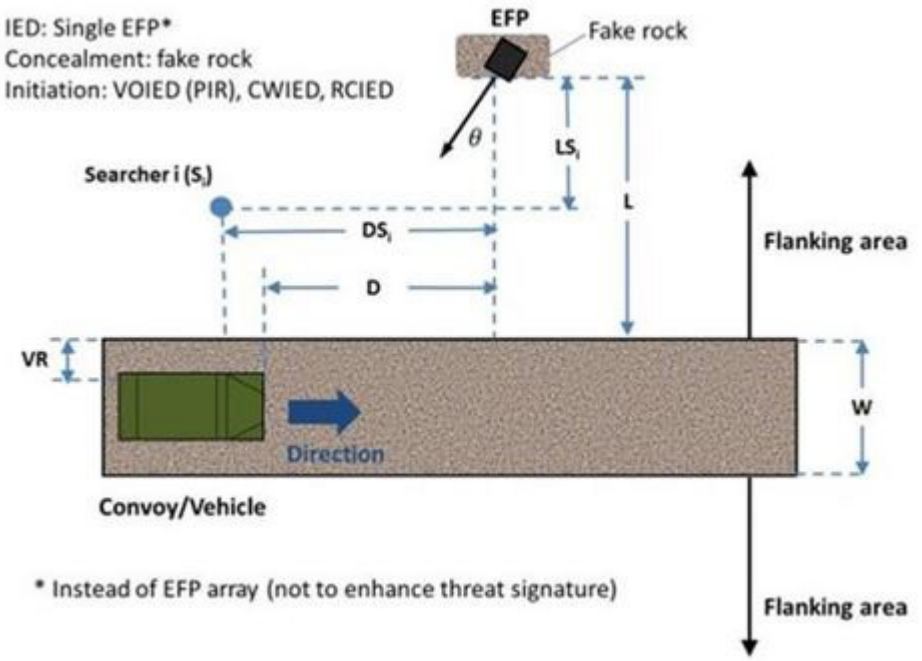


Figura 3. Esquema de Ensayo de IEDDSE para EFP al margen del camino (off-route).

Los requisitos principales para el diseño y desarrollo de los simulantes de IED son los siguientes:

1. Deben ser dispositivos reales modificados y adaptados convenientemente o réplicas que representan el IED en el escenario y la viñeta (contienen explosivos) .

2. Deben ser seguros y fiables.
3. Deben disponer de funcionalidad, con un sistema de aviso para indicar si el IED hubiera detonado durante la misión en un escenario real y, además, registrar el instante de la hipotética explosión.
4. La firma del IED que se simula no debe modificarse sustancialmente para no alterar el proceso de detección.

En la siguiente figura se muestra la forma geométrica de un simulante de EFP (*Explosively Formed Projectile* o proyectil conformado por explosión).

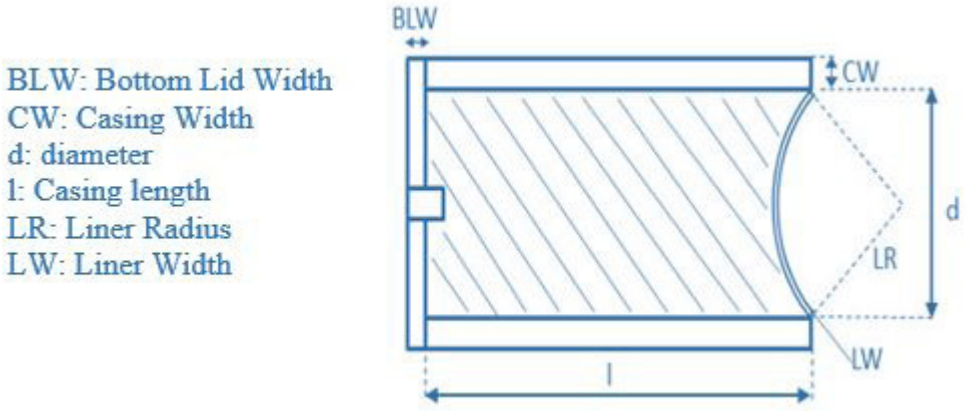


Figura 4. Forma geométrica de un simulante de proyectil conformado por explosión o EFP.

4. Medidas de mérito (MOP, MOE)

Las MOP (*Measures of Performance*) y MOE (*Measures of Effectiveness*) son un conjunto de medidas de mérito o indicadores definidos y empleados para la evaluación y comparación de sistemas de detección de IED. Estas medidas se centran en el lado operativo (punto de vista del usuario) y no en el sistema de detección (fabricante o vendedor) y han sido definidas como adimensionales y con valores normalizados (entre 0 y 1).

El conjunto de MOP y MOE definidos, constituye una jerarquía cuyo nivel más alto refiere el éxito global de la misión, que consiste en un balance entre la eficacia de la detección y los riesgos en los que se incurre.

La rama de eficacia está relacionada con el propio proceso de detección, mientras que la de riesgos tiene en cuenta peligros de diferente naturaleza y sus potenciales consecuencias, como la probabilidad de la detonación del IED y su daño potencial o la exposición a otras amenazas como emboscadas por parte de insurgentes.

Dada la extensión del presente artículo, no es posible entrar en la descripción y complejidad de esta jerarquía, ni abordar cada una de sus medidas de mérito, que implican infinidad de aspectos como el porcentaje de IED detectados, la precisión en la localización, la confirmación, la distancia de detección, el tiempo requerido, la conciencia situacional de la unidad militar, la letalidad del artefacto y sus potenciales consecuencias para el personal militar y sus medios (vulnerabilidad) y el personal civil presente (no combatientes).

5. Evaluación y comparación de sistemas de detección IED

El proceso completo de detección se ha descompuesto en una jerarquía de MOP y MOE y las alternativas son los sistemas de detección a evaluar. A partir de esta jerarquía, para la evaluación y comparación de sistemas, pueden emplearse técnicas de decisión multicriterio como la comparación por pares derivada del clásico proceso de jerarquía analítica (AHP).

Los criterios empleados para la evaluación (determinación de pesos), requieren la contribución de militares con experiencia en misiones que impliquen la detección de IED en el contexto concreto del escenario y la viñeta (ej. Afganistán y ruta de un convoy).

6. Verificación y validación de IEDDSE

En septiembre de 2017, se realizaron pruebas de IEDDSE con la inestimable participación de unidades de la Brigada Guadarrama XII (Tres Cantos, Madrid). Diversos simulantes de IED fueron desarrollados y emplazados por expertos del C-IED COE con experiencia en misiones, incluyendo diseños con EFP (RCIED, CWIED), proyectiles de diferentes calibres, contenedores plásticos (explosivo casero) con placas de presión de bajo contenido metálico y minas contra-vehículo y contra-personal.

Los resultados de las pruebas posibilitaron la verificación y validación preliminar de IEDDSE.

Figura 5. Izda. Unidad realizando las pruebas. Dcha. simulante de IED con un contenedor con explosivo casero y una placa de presión con bajo contenido de metal.

7. Conclusiones

Los resultados del proyecto IEDDSE están ligados con los 8 pilares OTAN de DOTMLPF-I (*Doctrine, Organization, Training, Material, Leadership, Personnel, Facilities and Interoperability*) –equivalente a MIRADO en España–, pero especialmente con los siguientes:

- *Training* (adiestramiento).
- *Material* (material).
- *Facilities* (infraestructura).

La evaluación y comparación de sistemas de detección de IED con criterios operativos (visión militar) es muy diferente a la visión del fabricante o vendedor y a las hojas de especificaciones técnicas y ensayos realizados en laboratorio. IEDDSE permite esta evaluación por medio del uso de una jerarquía de medidas de mérito (MOP y MOE) y con criterios proporcionados por usuarios con experiencia en la detección de IED en escenarios y misiones concretos del teatro de operaciones.

Es importante señalar que IEDDSE también permite evaluar y comparar como opciones uno o varios sistemas de detección. Por ejemplo, puede compararse una unidad con un conjunto de sistemas de detección (ej. detectores manuales de sensor dual –detector de metales y radar de penetración terrestre– y un vehículo no tripulado terrestre –UGV–) y la misma unidad con otros sistemas (ej. perros de detección y micro-UAV).

Un análisis más detallado de la evaluación y comparación de los sistemas de detección, permite además extraer información acerca de las brechas de capacidad (*capability gaps*) desde el punto de vista operativo, para posteriormente trasladarlas a la industria con el fin de mejorar dichos sistemas (desarrollo de capacidades –*Capability Development*–).

Un paradigma que ilustra estas consideraciones y la finalidad del propio proyecto, es el de un sistema de detección que proporcione unos buenos resultados en cuanto a detección pero que, sin embargo, impli-

que riesgos elevados durante las misiones, lo que podría resultar, en un número elevado de bajas propias y de civiles (no combatientes) al desplegarlo en zona de operaciones.

Una aplicación adicional relevante de IEDDSE, es su uso para adiestramiento de unidades en detección de IED en entornos operativos relevantes, posibilitando además, la mejora continua de las TTP por medio de la evaluación y comparación de los resultados obtenidos en un conjunto de ensayos.

Por último, hay que señalar la necesidad de realizar campañas de ensayos adicionales, en diferentes escenarios y con diversos sistemas de detección, para un refinamiento de la metodología y una mayor verificación y validación de IEDDSE.

Agradecimientos

Este trabajo se encuentra financiado por el Centro de Excelencia Contra Dispositivos Explosivos Improvisados (C-IED COE) y la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN). Además, se ha contado con la colaboración de la Brigada Guadarrama XII (El Goloso, Madrid) para la realización del ejercicio de validación del modelo desarrollado. Las opiniones vertidas por los autores no tienen por qué representar la opinión oficial de las instituciones involucradas.

Referencias

1. *STANAG 2294 C-IED (Edition 1) – Counter Improvised Explosive Device (ClED) Training Standard. 11 March 2009.*
2. *NATO AJP-3.15(B). Allied Joint Doctrine for Countering Improvised Explosive Device (C-IED). May 2012.*
3. *NATO Commanders' and Staff Handbook for Countering Improvised Explosive Devices (C-IED). November 14, 2011*
4. *All-Agency Compendium of basic Counter-Improvised Explosive Device Terminology. C-IED Centre of Excellence. Version 2. 7 December 2014.*
5. *The Afghanistan War's Most Lasting Legacy: The IED By Kevin Maurer. Background Quality Report. Improvised Explosive Device (IED) events involving UK personnel on Op HERRICK in Helmand Province, Afghanistan, 1 April 2009 to 30 November 2014. UK MoD, 25 August 2015.*
6. *Afghanistan Ordnance Identification Guide. Naval Explosive Ordnance Disposal Technology Division. 18th August 2004.*
7. *Suicide attacks: strategic perspective and Afghan war. ISPI. Analysis No. 283, March 2015.*

Polímeros sensores

Cerrato Moreno, Sandra[1*], García Pérez, José Miguel[2] y Trigo López, Miriam[3]

[1*] Dña. Sandra Cerrato Moreno, inspectora en prácticas del Cuerpo Nacional de Policía, con CP 129.656 y DNI: 71282186 B, dirección en Burgos Cn Doña Constanza n.º1 2.ºA, CP. 09007 Tlf. 617848161. Email: sandracm84@gmail:com

[2] D. José Miguel García Pérez, catedrático de Química Orgánica Grupo de Polímeros, Facultad de Ciencias Universidad de Burgos; Plaza de Misael Bañuelos s/n. 09001 Burgos. Tlf: 947258085. Fax: 947258831. Email: jmiguel@ubu.es

[3] Dra. Miriam Trigo López; investigadora postdoctoral –Grupo de Polímeros –Departamento de Química –Facultad de Ciencias –Universidad de Burgos Plaza Misael Bañuelos s/n , 09001 Burgos. Teléfono: 665134915. Email: mtrigo@ubu.es

Resumen

En este artículo se han diseñado materiales funcionales con aplicaciones en protección y seguridad. Concretamente se han elaborado sensores químicos poliméricos cromogénicos y fluorogénicos de explosivos (TNT), los cuales son de gran utilidad en el mundo de la seguridad y defensa ya que se podrían incluir como una etiqueta sensora en el chaleco antibalas. Posteriormente se ha investigado en la detección de TATP, explosivo de fabricación casera muy utilizado en la actualidad por los yihadistas. Se ha desarrollado un poliacrilato funcionalizado de perilendiimida fluorogénica capaz de generar cambios de color y fluorescencia en presencia de triperóxido de triacetona, TATP, bajo condiciones de estado sólido y libre de solventes. El material trabaja acumulando el TATP volátil hasta que alcanza un umbral, desencadenando así respuestas colorimétricas y fluorescentes.

Palabras clave

Protección balística, perilendiimida, sensores químicos, TNT y TATP.

1. Introducción

El trabajo que conforma este artículo se ha desarrollado durante la elaboración del trabajo fin de máster de la inspectora en prácticas junto con el trabajo de investigación del grupo de polímeros de la Universidad de Burgos. Debido a que en la actualidad se están sufriendo ataques terroristas cada vez con mayor frecuencia y llevados a cabo con artefactos de fabricación casera, los cuales no levantan sospechas a la hora de adquirir sus precursores, y son altamente dañinos, camuflándose con facilidad; con este trabajo se ha tratado de avanzar en la investigación de los sistemas de protección, tratando de aportar todo lo posible para intentar impedir este tipo de actos. Por ello se ha tratado de enfocar este trabajo en el desarrollo de tejidos inteligentes utilizando para ello polímeros sensores; se desarrolla un tejido inteligente a partir de recubrimientos de telas de algodón con polímero sensor capaz de detectar TNT en estado vapor y líquido y por último se trabaja en la detección off-on sin disolvente del explosivo improvisado TATP.

2. Metodología

2.1. Sustratos sólidos y fibras inteligentes para la detección visual selectiva de TNT tanto en medios acuosos como en vapor

Se desarrolla un tejido inteligente a partir de recubrimientos de telas de algodón con polímero sensor. El diseño de sustratos poliméricos sensoriales sólidos con grupos de aminas químicamente anclados como motivos sensoriales de TNT se ha llevado a cabo siguiendo un enfoque simple, sencillo y eficaz para producir películas o membranas utilizables junto con fibras de algodón recubiertas como telas inteligentes para la detección visual sensible y selectiva de TNT tanto en solución como en vapor. El cambio visual de los materiales de incoloro o blanco (fibras) a rojo permitió la detección a simple vista del explosivo, y las fotografías digitales tomadas de los materiales permitirían la cuantificación mediante la construcción de curvas de valoración utilizando la definición digital de color, es decir, los parámetros RGB, de los materiales tras haber estado en contacto con diversas concentraciones de TNT. Aunque la detección del vapor de TNT es difícil, debido a su baja presión de vapor, se prevé que el aire forzado a penetrar a través de las membranas o fibras podría servir como un futuro sistema de concentración las moléculas de TNT dentro de los materiales, donde la interacción con el motivo sensorial provoca cambios de color, posiblemente abriendo los sistemas a futuras aplicaciones de seguridad.

Por lo que se eligió como sistema de detección la formación de complejos coloreados entre compuestos polinitroaromáticos y bases de Lewis, en nuestro caso TNT y aminas, llamados homónimamente complejos de Meisenheimer y descritos por primera vez en 1902.

2.1.1. Se preparan las telas

- Se pone en un cristalizador un trozo de tela blanca de algodón lavada con acetona previamente y se añade la disolución (0,01g de poliamida en 2ml de DMA) con una pipeta Pasteur poco a poco. Una vez esté bien impregnada se lleva a la estufa 60C para eliminar el exceso de DMA.
- Se recortan los bordes y se hacen cuadraditos pequeños de 1cm por 1cm.

2.1.2. Detección de vapores de TNT

En un vial se pega un cuadradito pequeño a la pared y se introduce otro vial más pequeño con 0,05g de TNT y se mete a la estufa. En las siguientes figuras 1 e puede observar cómo se ha llevado a cabo el montaje.

Figura 1. Montaje para la detección de vapores de TNT [1].

2.1.3. Detección de TNT en disolución

Se prepara una disolución 80 % acetona, 20 % agua (1,6ml acetona y 0,4ml agua) se añade 0,01g de TNT. El TNT se disuelve parcialmente en agua pero se disuelve muy bien en acetona por eso se prepara esa disolución.

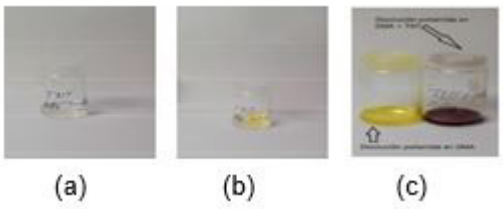


Figura 2. Secuencia de detección de TNT en estado líquido [1].

2.2. Detección Off-On sin disolvente del explosivo improvisado TATP (triperóxido de triacetona) con materiales fluorogénicos[1]

El TATP constituye un explosivo improvisado casi indetectable por los perros o dispositivos de rastreo que se utiliza con frecuencia en atentados terroristas suicidas. La falta de grupos nitro o de variedades aromáticas hace que la detección de este explosivo improvisado sea muy difícil de conseguir. El TATP se detecta generalmente por espectrometría de masas, espectrometría de movilidad iónica o espectroscopia multifotónica, pero la firma del TATP no es claramente visible excepto por espectrómetros de masas voluminosos.

La detección indirecta de H_2O_2 del TATP, asociada a eventos de oxidación, se utilizó con éxito para la detección colorimétrica o fluorimétrica. La detección directa de TATP se logró mediante microbalanzas de enfriamiento por fluorescencia o microbalanzas de cristal de cuarzo. Los sistemas quimiosensores fluorogénicos son una buena alternativa, por lo tanto, la búsqueda de sondas fluorogénicas específicas para TATP es un buen enfoque para la detección fácil y portátil de explosivos de peróxido en la verificación de materiales desconocidos en controles policiales. La sonda ideal debe tener un receptor fuertemente fluorescente y un grupo de reacción fácilmente oxidable por un reactivo oxidante suave en ausencia de cualquier disolvente. Las perilendiimidas (PDI) son compuestos fuertemente fluorescentes estables bajo luz y aire, usados para valiosos materiales biológicos y estructurales, por lo tanto son buenos candidatos para la unidad receptora.

Las PDI tienen un núcleo aromático conjugado pobre en electrones, adecuado para múltiples modificaciones químicas y sensores ópticos. El enfoque consiste en una modificación del núcleo fluorescente de las PDI con uno o dos grupos arílicos donantes de electrones mediante la química clásica del acoplamiento carbono-carbono de Suzuki. Las PDI monobromo y di-bromo iniciales fueron cuidadosamente seleccionados debido a su fácil disponibilidad y utilidad, para que puedan ser sometidos a reacciones de Suzuki con derivados del ácido borónico bajo condiciones clásicas, para obtener compuestos con las características requeridas como sensores fluorogénicos del explosivo casero TATP.

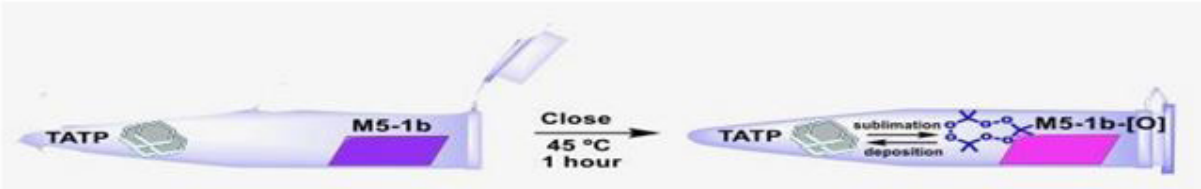


Figura 3. Esquema del experimento de detección sin disolventes de TATP.

2.2.1. Desarrollo del experimento

Con la membrana M5-1b se desarrolló una sencilla «prueba de polvo blanco» para detectar TATP sólido a partir de paquetes sospechosos que contienen «polvo blanco» y que podrían estar implicados en amenazas no identificadas. En un experimento típico, se colocan 4-5 mg de TATP sólido con una espátula en un frasco de muestra de 15 ml, se agrega una pieza de polímero M5-1b de 1 0; 5 cm y se cierra el frasco, se calienta a 50ºC con una pistola de aire caliente de laboratorio durante 10 minutos y se deja el frasco caliente. La ampolla se abrió y la pieza de polímero se extrajo de la ampolla y se colocó junto a una pieza de polímero no reaccionada bajo una luz UV TLC para su comparación. La pieza de polímero del frasco con TATP adquirió una fluorescencia naranja fuerte y un color rosado mientras que la pieza no reaccionada era de color no fluorescente y púrpura, lo que indica la presencia inequívoca de TATP en el polvo blanco.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados de la detección de TNT.

Los resultados obtenidos se pueden observar en las figuras 4

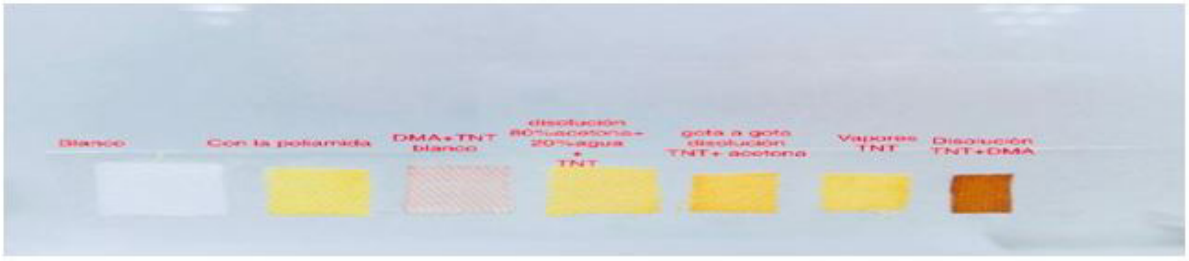


Figura 4. Secuencia fotográfica del proceso de detección de TNT [2].

También es posible detectar los cambios de la misma secuencia con la ayuda de una lámpara de rayos UV y así poder detectar los cambios de fluorescencia.

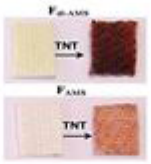
(a)

(b) La correspondencia de la secuencia fotográfica es la misma que la de la imagen superior.

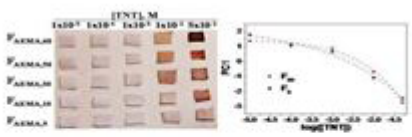
Figura 5. Lámpara UV adaptada para poder hacer fotografías y secuencia al UV [2].

Los resultados fueron positivos como se aprecia en las figuras por lo que se llegó a la conclusión de que esta síntesis deja la puerta abierta para la detección de TNT en vapores mediante posibles modificaciones de la poliamida, y que a partir de este momento se podría detectar y cuantificar TNT con un smartphone, mediante el cambio de color de las telas según se describe a continuación. Además, la ventaja de las poliamidas sintetizadas frente a los polímeros acrílicos, es que las poliamidas se pueden fabricar directamente como fibras, lo que nos permite incluirlas en ropa además de mejorar las propiedades térmicas y mecánicas.

Para la detección cuantificada, se utiliza la definición digital de los colores de las fibras inteligentes tras entrar en contacto con el explosivo, es decir, los valores RGB (R = rojo, G = verde, B = azul; cada uno entre 0 y 255) que se consideran como variables y se agrupan en una única variable denominada componente principal (PC1) mediante análisis por componentes principales (PCA). Así, PC1 contiene la mayor parte de la información de los tres valores RGB con una disminución significativa de ruido y permite la representación de curvas sencillas, en dos dimensiones, en las que se representa la concentración de TNT frente a la respuesta de color de la fibra inteligente (PC1). La detección de vapores de TNT es mucho más compleja, ya que la tensión de vapor de este explosivo es extremadamente baja (9; 15 10 ^{9}atm a 25 C). Por este motivo se diseñaron recubrimientos con aminas primarias y secundarias, empleando los monómeros AMS (4-(aminometil) estireno) y di-AMS (4-(N)-(2- (metilamino)-etil)aminometil estireno), que las hace más proclives a la formación de complejos de Meisenheimer, con lo que se consiguió que los textiles recubiertos respondieran colorimétricamente a vapores de TNT (figura 6.



(a) Detección visual de vapores de TNT con las fibras recubiertas con 2HEA/AMS/EGDMMA (FAMS) y 2HEA/di-AMS/EGDMMA (Fdi-AMS).



(b) Fotografía de textiles de algodón de 1 cm x 1 cm recubiertas con AE-MA/EGDMA

Figura 6. Resultados TNT.

En este mismo trabajo, la inmersión de las telas en disoluciones de acetona con TNT da lugar al cambio de color, del amarillo al rojo, permitiendo no solo la detección, sino también la cuantificación mediante el empleo de la cámara de un móvil como instrumento analítico (figura 6 [4].

En este estudio, se demuestra el potencial de los polímeros en aplicaciones tecnológicas punteras como la detección a simple vista de explosivos siguiendo un enfoque quimiosensorial. El diseño de sustratos poliméricos sensoriales sólidos con grupos de aminas químicamente anclados como motivos sensoriales de TNT se ha llevado a cabo siguiendo un enfoque simple y sencillo para producir películas o membranas utilizables junto con fibras de algodón recubiertas como telas inteligentes para la detección visual sensible y selectiva de TNT tanto en solución como en vapor. El cambio visual de los materiales de incoloro o blanco (fibras) a rojo permitió la detección a simple vista del explosivo, y las fotografías digitales tomadas de los materiales permitirían la cuantificación mediante la construcción de curvas de valoración utilizando la definición digital de color, es decir, los parámetros RGB, de los materiales tras haber estado en contacto con diversas concentraciones de TNT [3][4].

3.2. Resultados TATP

Los resultados que se obtuvieron fueron positivos ya que la membrana que se diseñó para la detección de TATP fue sensible al cambio de color y al cambio de fluorescencia como se puede observar en la siguiente figura 7

(a) Efecto cualitativo de exponer la membrana M5-1b a cantidades crecientes de TATP(A)libre de disolventes bajo luz blanca y (B) bajo luz UV 366nm.

(b) Cambios de color y fluorescencia de la membrana M5-1b con algunos ácidos y oxidantes bajo luz blanca y UV.

Figura 7. Resultados TATP. [5]

Las mediciones cuantitativas de la fluorescencia de la membrana en el fluorímetro confirmaron claramente que la fluorescencia resultante era una función de la cantidad de TATP a la que se expuso en el experimento. También, pero en una extensión menor, el cambio de color se incrementó con la cantidad de TATP (figura 8.

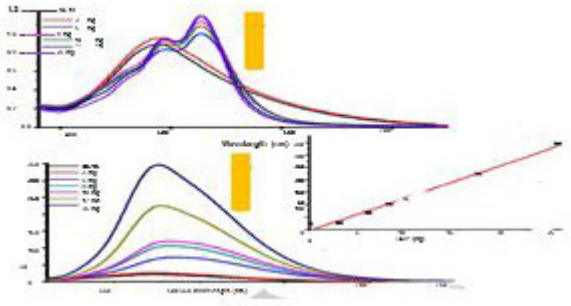


Figura 8. Curvas de valoración cuantitativas obtenidas al exponer la membrana M5-1b a cantidades crecientes de vapor TATP superiores por espectroscopia UV-vis e inferiores por espectroscopia fluorescente. Inserto: Diagrama de valoración por fluorescencia de M5-1b y vapor TATP.

Después de la exposición al TATP se ha observado un aumento del 1,7 % en el contenido de oxígeno del polímero, medido por espectroscopia fotoelectrónica de rayos X de dispersión energética en el SEM, compatible con la oxidación del nitrógeno anilíneo en el PDI, desencadenando la respuesta fluorescente.

La respuesta fluorescente dada por el material a la presencia de TATP fue permanente, por lo que se pudo comprobar en cualquier momento después de la exposición del TATP [5].

4. Conclusiones

Las investigaciones llevadas a cabo y los resultados obtenidos dejan la puerta abierta a futuras investigaciones y mejoras en los resultados con el fin de llegar a obtener un tejido inteligente que nos detecte la presencia de explosivos en sus diferentes estados. Ya que las particularidades de cada explosivo hace compleja la elaboración de un único polímero detector de todos los explosivos.

En el trabajo realizado se han llegado a conseguir dos formas diferentes de materiales poliméricos capaces de detectar tanto en estado vapor como líquido la presencia de dos de los explosivos más usados en la actualidad, tanto TNT como el TATP; sin que para tal detección sea necesario portar ningún dispositivo adicional en los equipos de protección individual de los miembros de las Fuerzas Armadas o de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado facilitando así su uso; ya que no incrementa el peso del equipo de protección individual ni se requiere de conocimientos especiales para su detección ya que

cambiaría de color la parte del textil con el polímero sensor, siendo visual la información. Lo cual sería de gran utilidad en las labores de campo.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han apoyado y ayudado, de manera que sin su contribución no hubiera sido posible culminar este trabajo de manera satisfactoria.

Referencias

1. *European Committee for Standardization: CEN TC248 WG31 http://www.cen.eu/CEN/Sectors/TechnicalCommitteesWorkshops/ CENTechnicalCommittees/Pages/TCStruc., Ac-cessed 22 November 2011*
2. *PABLOS, Jesús L., et al. Solid polymer substrates and smart fibres for the selective visual detection of TNT both in vapour and in aqueous media. RSC Advances, 2014, vol. 4, no 49, p. 25562-25568.*
3. *TRIGO LÓPEZ, Miriam, et al. Poliamidas aromáticas con heterociclos en la cadena principal y lateral. Aplicación a la extracción/eliminación de cationes contaminantes en medios acuosos. 2010.*
4. *TORROBA, Tomas, et al. Solvent–Free Off–On Detection of the Improvised Explosive Triacetone Triperoxide TATP with Fluorogenic Materials. Chemistry–A European Journal, 2017.*

Detección de materiales energéticos mediante una nariz electrónica basada en sensores MOx

Díez Castellanos, Roberto[1], López Sánchez, Raúl[2,*], Debán Miguel, Luis[3], Pardo Almudí, Rafael[3]

[1] Cuerpo Nacional de Policía. Especialidad TEDAX-NRBQ, GDE-NRBQ San Sebastián.

[2] Área de Materiales Energéticos, Dep. de Defensa NBQyM, Subd. de Sistemas Terrestres, INTA. Ctra. M301 km.10,5 Edif. 7, La Marañosa, San Martín de la Vega, 28330 Madrid, Spain.

[3] Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid, Paseo de Belén 7, 47011 Valladolid, Spain.

* Contacto: lopezsr@inta.es (R. López).

Resumen

La detección de pólvoras y explosivos se ha convertido en una actividad de vital importancia para preservar la seguridad, siendo las instituciones responsables de la Seguridad del Estado la línea de defensa más importante. Los medios de detección de materiales energéticos se encuentran en continua evolución, siendo esenciales aquellos con capacidad de detección a distancia y de identificación de vapores. La detección de los materiales energéticos en fase gas se puede realizar a través de los vapores del propio explosivo, de sus productos de degradación o de los aditivos presentes en la composición. Actualmente las unidades cinológicas son el medio más versátil para la detección a distancia de explosivos, aunque los dispositivos electrónicos empiezan a ofrecer una alternativa viable en algunos escenarios. Las narices electrónicas, *e-nose*, son una de las líneas de investigación y desarrollo más prometedoras en el campo de la detección de explosivos debido a las posibilidades que ofrecen para reducir el número de falsos positivos mediante la hibridación de señales. Este trabajo presenta estudios de laboratorio y de uso en campo con TRL –*Technology Readiness Level*– comprendido entre 5 y 7.

Utilizándose una *e-nose* de desarrollo propio, Belerofonte II, se estudia su capacidad de detección de explosivos mediante los productos de degradación de materiales energéticos, y mediante la detección de sus vapores. Se presentan las diferentes huellas olfativas de los materiales energéticos estudiados.

Palabras clave

e-nose, nariz electrónica, semiconductores, MOx, explosivos.

1. Introducción

Los actos de terrorismo con uso de explosivos generan un elevado impacto mediático debido a los daños materiales y personales que producen. En Europa han incrementado su número en la última década, habiéndose utilizado artefactos explosivos para la realización de actos terroristas en más de un 30 % de los mismos [1].

Un factor decisivo a la hora de seleccionar la carga explosiva de artefactos explosivos improvisados, IED –*Improvised Explosive Device*–, es la facilidad de acceso a los materiales energéticos o sus precursores. Por ello, los grupos organizados suelen utilizar explosivos clásicos, principalmente provenientes de las sustracciones de material militar o industrial, mientras que grupos con estructuras menos organizadas suelen utilizar material pirotécnico y sales inorgánicas en la fabricación de IED. En los últimos años con fines terroristas se han utilizado extensivamente los explosivos orgánicos de la familia de los peróxidos debido a su facilidad de síntesis, dentro de esta familia destaca el TATP –*triacetone triperoxide*–, también conocido como la «madre de Satán» [1].

Los materiales energéticos utilizados como carga en IED son principalmente de tipo químico, debido a su capacidad para liberar energía de manera súbita, provocando la expansión brusca del entorno gaseoso con un considerable aumento de presión, la denominada onda expansiva. Estos materiales energéticos suelen clasificarse en explosivos, propulsantes y pirotecnia. Los primeros presentan capacidad para detonar produciendo una onda de choque supersónica con velocidades comprendidas entre los 2.000 y 9.000 m/s. Por su parte, los propulsantes poseen una menor velocidad de reacción mientras que la pirotecnia se caracteriza por la liberación de gran cantidad de energía calorífica pero con una menor velocidad y producción de gases que los propulsantes y explosivos [2].

La detección de estos materiales energéticos de tipo químico, se ha convertido en una necesidad de vital importancia para preservar la seguridad de nuestra sociedad. Esta misión se desempeña, principalmente, por las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, FFCCSE, siendo sus servicios cinológicos la herramienta de mayor valor en este campo. Estos servicios cinológicos detectan los materiales energéticos de tipo químico mediante su «olor característico», «huella olfativa» o «firma química gaseosa» de sus vapores. Estos olores pueden ser de tres tipos: el del propio compuesto, el de productos de descomposición y el de compuestos minoritarios o contaminantes característicos [3]. Este método, aunque pudiera parecer rudimentario, es el que actualmente se utiliza para comparar otros métodos instrumentales de detección de explosivos [4].

2. Equipos electrónicos y detección de explosivos

Los dispositivos electrónicos están aumentando su presencia, e importancia, en el campo de la detección de explosivos, proporcionando nuevas herramientas de comunicación, adquisición, control de calidad y gestión de la información que el uso de perros no permite. Las unidades cinológicas, por su parte, siguen mostrando los mejores resultados en sensibilidad, selectividad y robustez para la identificación de los explosivos para los que han sido entrenados, pero los animales presentan un número limitado de

ciclos de trabajo, tras el cual se reduce su efectividad, incrementándose el porcentaje de falsos positivos y negativos.

Las narices electrónicas o *e-nose* son una tecnología que trata de imitar el funcionamiento de los sistemas olfativos biológicos y que, por ahora, busca complementar al conjunto de equipamientos utilizados para la detección de explosivos mediante la hibridación de sensores. Puede considerarse a tecnología en auge, si atendemos al aumento de los programas I+D+i relacionados con las *e-nose*, siendo ejemplos de ello la «WINOSE» desarrollada por el CSIC y la Universidad de Extremadura, la «Moosy 32» desarrollada por la Universidad de Valencia o la «JPL *Electronic Nose*» desarrollada por la NASA y que está siendo utilizada en la estación internacional para el control de la calidad del aire. Nuestro proyecto, el «Belerofonte II», se encuadra en este contexto de investigación de la tecnología, pero orientado a la detección de tóxicos en aire y explosivos escondidos.

Una *e-nose* es un sistema que hibrida las señales de sensores que ofrecen respuestas diferentes al mismo estímulo. De esta forma se alcanzan mejores sensibilidades y mayores niveles de discriminación que los equipos basados en un solo tipo de sensor. El sistema de detección de señales de las *e-nose* suele estar compuesto por sensores químicos de gases [4] seleccionados en base a su selectividad, portabilidad y bajo coste principalmente, siendo necesario una decisión de compromiso entre estas propiedades [5]. El sistema de sensores puede estar compuesto por sensores selectivos, cuando cada sensor se diseña para un determinado componente, o con selectividad cruzada [6], como es nuestro caso.

El tratamiento de las señales obtenidas se suele realizar principalmente mediante *software*, pero las señales previamente suelen sufrir una adaptación y preprocesamiento por *hardware*, para alcanzar el reconocimiento de patrones de los vapores. Entre los algoritmos principalmente utilizados destacan las técnicas de análisis multivariante de análisis de componentes principales, PCA –*Principal Component Analysis*– [7], y la más recientemente introducida, las redes neuronales [8].

3. Belerofonte II: construcción y metodología de ensayo

Para la obtención de datos experimentales se ha utilizado la *e-nose* denominada Belerofonte II que puede observarse en la figura 1. Este equipo, de desarrollo propio en el *hardware, software, firmware* como en los algoritmos de tratamiento de datos, consta de un cabezal de detección con, al menos, 3 sensores quimioresistivos basados en semiconductores de óxido metálico, MOx –*Metal Oxides*–. La adquisición de los datos se realiza mediante un microprocesador ATMEGA 328, capaz de realizar el análisis quimiométrico y la identificación de los gases a los que se encuentra expuesto en tiempo real [9].

Figura 1. e-nose Belorofonte II utilizada en los ensayos.

Para poder determinar la idoneidad del prototipo Belerofonte II a la hora de detectar e identificar materiales energéticos, se ha seguido una metodología de ensayo centrada en dos grupos de ensayos:

- Identificación de materiales energéticos mediante la huella olfativa del propio compuesto.
- Identificación de artefactos mediante la huella olfativa de los productos de descomposición de sus materiales energéticos.
  - Identificación de NO_2 en presencia de compuestos orgánicos volátiles, VOC [3].
  - Identificación a través de los productos de degradación post-explosión, desarrollados en dos localizaciones: el campo de maniobras del Ejército del Aire de Las Bárcenas Reales y la galería de tiro de la Comisaría Provincial de la Policía Nacional en Guipúzcoa.

3.1. Quimiometría y tratamiento de las señales

A las señales proporcionadas por los sensores, preacondicionadas por *hardware* a voltajes comprendidos entre 0 y 5 voltios, se les realizan una serie de procesados consistentes en un pretratamiento para discriminar la respuesta de interés de la línea base, ecuación 1. Posteriormente, se aplica un pretratamiento que maximiza la información cualitativa frente a la cuantitativa, ecuación 2, para, por último, realizar un tratamiento estadístico de los datos, $S_i''(t)$, mediante métodos multivariantes de PCA.

$$S_i'(t) = \frac{S_i(t) - S_i(t_0)}{S_i(t_0)} \quad (1)$$

$$S_i''(t) = \frac{S'_i(t)}{\sum|S_i'(t)|} \quad (2)$$

El tratamiento de las señales en el dominio del tiempo mediante PCA, permite una reducción de la dimensionalidad de la información de las 3 dimensiones originales, una dimensión por sensor del equipo, a dos dimensiones denominadas PC1 y PC2 que, entre las dos, proporcionan el 98,40 % de la varianza total de las tres dimensiones iniciales; el PC1 el 92,88 % y el PC2 el 5,52 %. El software empleado para el PCA es el Statgraphics XVII ©.

El entrenamiento del equipo Belerofonte II, para realizar posteriormente identificaciones en tiempo real, se lleva a cabo mediante el tratamiento de las señales con una computadora y la representación final de las coordenadas PC1 y PC2 se realiza en un gráfico bidimensional.

4. Materiales estudiados

Los diferentes estudios, que a continuación se presentarán, utilizan los materiales energéticos presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Materiales energéticos utilizados en los ensayos con el Belerofonte II.

Pirotécnicos	**Prop. de base nitrocelulosa**	**Explosivos**
Pólvora negra	Pólvoras PSB y CSB	Dinamita
Pólvora perclorato	Calibre 9 y 7,62 mm	Pentrita
		C-3

5. Resultados experimentales e interpretación

5.1. Identificación de materiales energéticos a través de los vapores del propio material

Utilizando los vapores de los materiales energéticos, el Belerofonte-II registró las huellas olfativas de 1 g de los materiales energéticos de la tabla 1. La adquisición de datos se realizó en una cámara con un volumen de 1,1 L, siendo registrada la señal en un tiempo inferior a 5 s.

Los resultados, presentados en las figuras 2 y 3 muestran las huellas características de cada uno de los materiales energéticos sometidos a estudio. Puede constatarse que, con la configuración de sensores elegidos para el Belerofonte II, y aplicando el método descrito, siguen observándose solapamientos entre las huellas olfativas de las familias de materiales energéticos, principalmente entre los propulsantes de base nitrocelulósica y la pólvora perclorato, aspecto que dificulta la discriminación de ambas familias, ver figura 2. Por el contrario, los explosivos de uso militar son fácilmente distinguibles, ver figura 3.

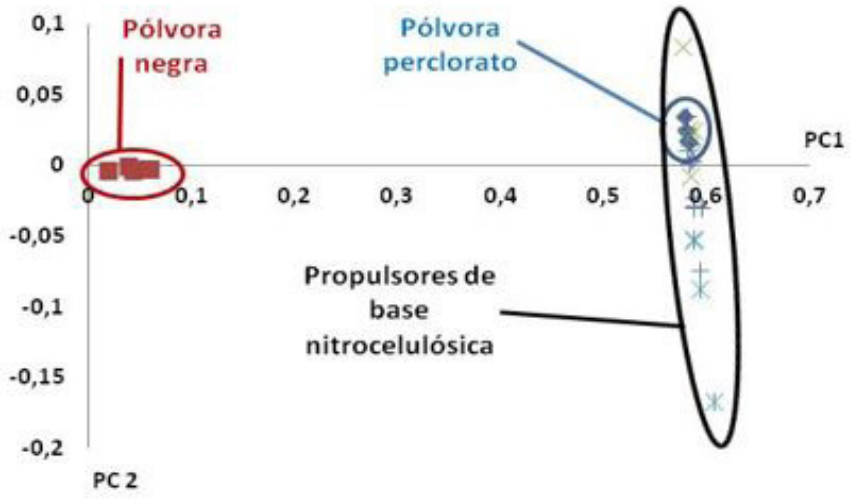


Figura 2. Gráfico bidimensional de los propulsores y pirotecnia estudiados.

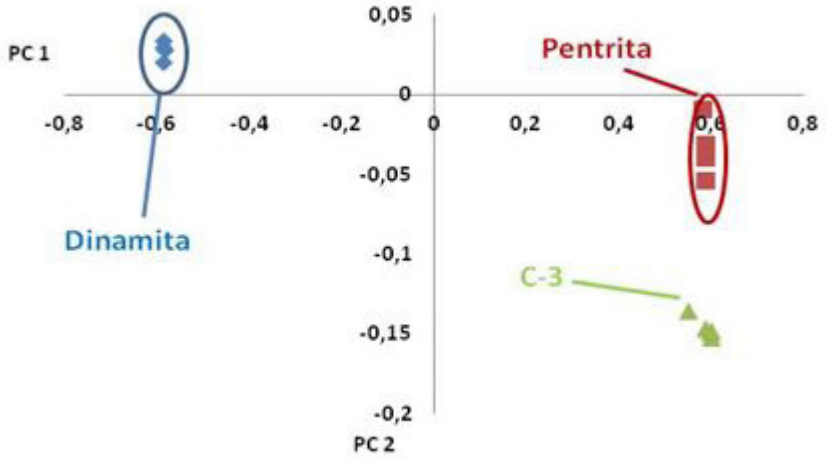


Figura 3. Gráfico bidimensional de los explosivos estudiados.

5.2. Identificación de materiales energéticos a través de NO_2 en presencia de VOC

Este segundo ensayo utilizó al NO_2 como molécula diana. Adicionalmente, se estudió la respuesta del Belerofonte II a la exposición combinada de NO_2 en presencia de algunos compuestos orgánicos volátiles, VOC –*Volatile Organic Compounds*–, susceptibles de presentarse en los ambientes de detección.

La producción de NO_2, entre 1 y 30 ppm según el ensayo, se realiza *in situ* en el laboratorio y se inyecta en el interior de un recipiente hermético de 125 L dentro del cual se encuentra el equipo de medida. Para conocer la respuesta del equipo en presencia de VOC, a la vez que se inyecta el NO_2 se introducen también cantidades conocidas, entre 1 y 20 ppm, de éter, acetona o etanol. Los resultados obtenidos pueden observarse en la figura 4.

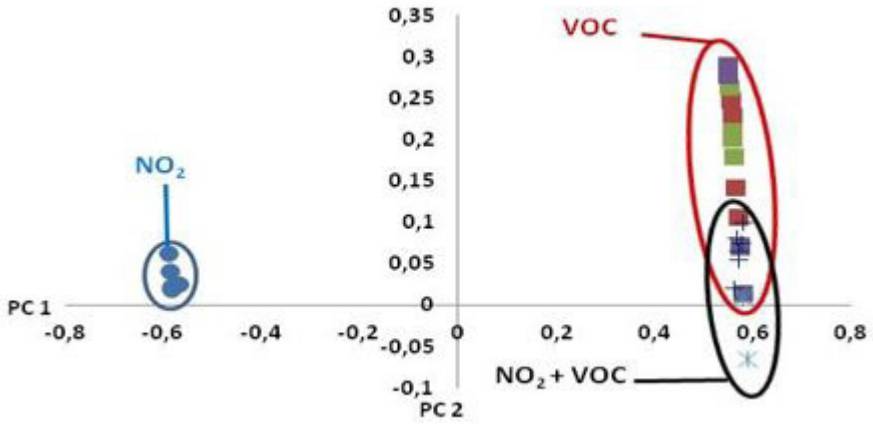


Figura 4. Representación bidimensional del PCA de la medida de NO2, VOC y mezclas.

Del análisis de los datos presentados puede observarse que el Belerofonte II muestra capacidad para la detección e identificación de la molécula diana NO_2, sin embargo, la presencia de VOC, enmascara la respuesta impidiendo una correcta identificación, ver figura 4.

5.3. Análisis de la respuesta del Belerofonte II en productos post-explosión

Para realizar el presente estudio se expuso al Belerofonte II a gases post-explosión de pentrita, pólvora pirotécnica así como a los gases de deflagración de cartuchos de munición de 9 mm, todos ellos en campo abierto. Adicionalmente, se realizaron ensayos de identificación de los vapores de vainas recién disparadas del calibre 9 mm parabellum en un volumen estanco de 1,1 L.

El registro de los datos puede observarse en la figura 5.

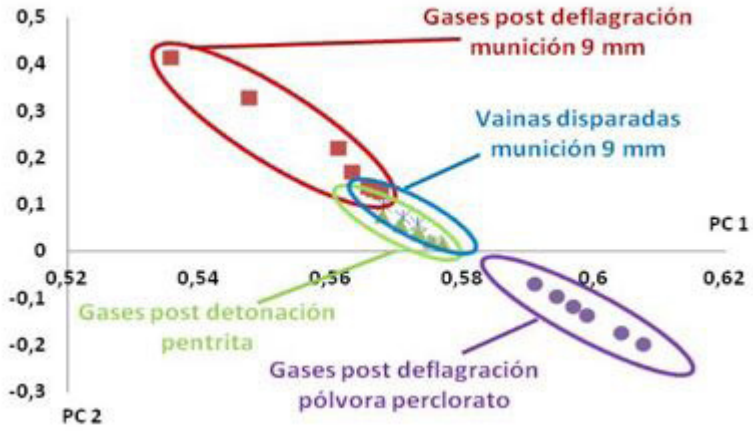


Figura 5. Gráfico bidimensional del PCA de los productos poscombustión.

Como puede observarse en la figura 5, los tres materiales energéticos estudiados pueden ser identificados con facilidad a través de sus productos de descomposición.

Durante la realización de los ensayos post-combustión en campo abierto, se considera necesario reseñar que la toma de datos del Belerofonte II se vio altamente influenciada por las condiciones ambientales. En el caso de los gases de deflagración de las pólvoras del calibre de 9 mm, al realizarse en una galería de tiro con ventilación forzada (v_{aire}= 0,14 m/s), fue necesario situar los sensores a favor de la dirección del aire, puesto que, de lo contrario, no se detectaba la presencia de los productos de deflagración. En el caso de los ensayos post-explosión de la pentrita y la pólvora perclorato, también realizados en campo

abierto, además de la citada influencia de la dirección del aire, la irrupción de precipitaciones, en forma de lluvia, produjo una distorsión de la línea base al no disponer el Belerofonte II de un blindaje apropiado para este tipo de inclemencias. En estas condiciones, no fue posible realizar una correcta identificación de los explosivos a través de sus gases de descomposición.

6. Resultados experimentales e interpretación

De los datos obtenidos, y su posterior análisis, se ha podido determinar que la *e-nose* Belerofonte II posee la capacidad de identificar materiales energéticos a través de la huella olfativa de los productos de descomposición de algunas pólvoras y explosivos, tanto en el laboratorio como en campo abierto. Sin embargo, la identificación a través de la molécula diana seleccionada, NO_2, se ve fácilmente interferida por la presencia de VOC, principalmente debido a la alta sensibilidad de los sensores utilizados a disolventes. La configuración de sensores elegida para el Belerofonte II puede provocar falsos negativos en presencia de disolventes, al quedar la señal enmascarada, aun cuando estos interferentes se encuentren en muy bajas concentraciones.

La rápida respuesta, inferior a cinco segundos, y las mejoras implementadas sobre el prototipo actual han reducido su consumo eléctrico y permiten su utilización como equipo portátil, al contrario que la versión 1.0 del sensor. Sin embargo, sigue encontrándose fuertemente influido por las condiciones climáticas en las que opere. Otras interferencias importantes de este prototipo son las condiciones medioambientales, tales como la lluvia o la dirección del viento; estos aspectos precisan ser considerados a la hora de interpretar los resultados de esta *e-nose*.

Acorde a la experiencia realizada, la segunda generación del Belerofonte permite la detección de algunos materiales energéticos en ambientes controlados que no estén fuertemente influidos por la climatología, al igual que para su uso en espacios abiertos, que no exteriores, para la identificación de explosivos escondidos en objetos y personas.

Se considera que futuras actualizaciones del prototipo actual deberían abordar aspectos tanto de *hardware* como de *software*, entre ellos se destacan:

- Hardware
  - Aumento en el número de sensores y sustituir alguno de los utilizados para maximizar la sensibilidad a las sustancias de interés, intentando minimizar la respuesta de los interferentes más habituales, principalmente los disolventes.
  - Acoplamiento del sensor a sistemas de alimentación forzada de aire, con objeto de aumentar el alcance de la detección y reducir la influencia de las condiciones climatológicas.
- Software
  - Debería realizarse un esfuerzo especial en la identificación de nuevos algoritmos de preprocesamiento de las señales para minimizar, aún más, la influencia de la concentración sobre los algoritmos de reconocimientos de pautas.
  - Explorar la introducción del *Machine Learning* y de las redes neuronales en los algoritmos de respuesta.

Agradecimientos

Se agradece al Ministerio de Defensa y al Ministerio del Interior el uso de sus instalaciones. Agradecimiento especial a la Universidad de Valladolid por las facilidades para la codirección de trabajos fin de grado por parte de tutores externos, aspecto que facilita el intercambio de conocimientos y necesidades, apoyando el desarrollo de proyectos relacionados con la seguridad.

Referencias

1. *European Union. Terrorism situation and trend - TESAT. European Union, EUROPOL; 2018.*

2. *Department of the army. Military explosives Washington, D.C.; 1990.*
3. *Patel HK. The electronic Nose: Artificial Olfation Technology New Delhi: Springer; 2014.*
4. *Elsiever. Explosives Detection Oxford: Elsiever; 2009.*
5. *Korotcenkov G. Handbook of Gas Sensor Materials. Properties, Advantages and Shortcomings for Applications. Springer; 2013.*
6. *Alegret S. Chemical sensors as integrates analytical systems. Revista mexicana de física. 2006;(52 (2)): 99-103.*
7. *Peña D. Análisis de datos multivariantes. McGraw-Hill; 2002.*
8. *Jesús R.J. Sistema sensor para monitoreo ambiental basado en redes neuronales. Ingeniería Investigación y Tecnología. 2016; XVII (2): 211-222.*
9. *López R, Pellico D, Castellanos R, Debán L, Pardo R. Narices electrónicas para la detección de explosivos caseros. Los diez artículos finalistas del DESEi+d 2017. 2018. pp. 1-9.*

Simulación del efecto de ondas expansivas sobre estructuras porticadas

Huete, César[1,*], Ortiz-Valderas, Abraham Fco.[2], Cuadrado-Lara, Alberto[3], Sánchez-Monreal, Juan[4,1] y Vera, Marcos[1]

[1] Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid.

[2] Máster Universitario en Ingeniería Industrial, Universidad Carlos III de Madrid.

[3] Máster Interuniversitario en Matemática Industrial, Universidad Carlos III de Madrid.

[4] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, Alemania.

* Autor principal y responsable del trabajo; chuete@ing.uc3m.es (C.H.).

Resumen

La respuesta dinámica de una estructura sometida a cargas explosivas es un problema de gran importancia en el ámbito de la defensa y seguridad. Entre las medidas de protección pasiva más utilizadas en la actualidad destacan las barreras mitigadoras (T-Wall o HESCO® Bastion) cuyo objetivo es minimizar el impacto de la onda expansiva sobre el elemento a proteger. Sin embargo, dada la gran variabilidad de escenarios posibles resulta muy difícil establecer criterios de diseño válidos para todas las situaciones. La gran complejidad del fenómeno, que incluye la detonación de la carga explosiva, la propagación y reflexión de la onda expansiva, y los efectos de esta sobre el blanco, exige el uso de técnicas de simulación avanzadas con un alto coste computacional. Como primera aproximación, en este trabajo se investiga el efecto atenuante de las barreras protectoras mediante simulaciones numéricas de ondas expansivas en medios parcialmente confinados con geometría bidimensional utilizando el método de los volúmenes finitos. El estudio cuantifica el efecto mitigador sobre los efectos de la onda de presión de una barrera perfectamente rígida en nueve configuraciones geométricas diferentes, resultado de considerar tres alturas y tres distancias distintas. El campo de presiones resultante se emplea para estimar las cargas dinámicas que actúan sobre estructuras porticadas y la respuesta estructural se simula mediante el *software* comercial Autodesk® Robot™ Structural Analysis. El estudio, aún siendo muy simplificado, constituye un primer paso para entender cuáles son las configuraciones protectoras más adecuadas y por qué, pudiéndose extrapolar las conclusiones obtenidas a configuraciones tridimensionales más realistas.

Palabras clave

Explosiones, IED, onda expansiva, respuesta estructural, barreras mitigadoras.

1. Introducción

La protección de edificios singulares frente a explosiones se ha convertido en un factor determinante a la hora de diseñar e instalar las medidas protectoras más adecuadas. Con el fin de plantear medidas preventivas para proteger los puntos más vulnerables de la estructura durante los instantes críticos que siguen a la explosión, resulta de gran utilidad conocer la respuesta de los elementos estructurales que conforman el edificio ante cargas dinámicas. Dado que las ondas expansivas sufren reflexiones al interactuar con el edificio, resulta de especial interés analizar la propagación de dichas ondas en geometrías parcialmente confinadas. Una descripción detallada de este fenómeno requiere de modelos numéricos complejos que generalmente vienen implementados en paquetes de *software* cerrados. Pese a que existen numerosos estudios en los que se investigan los efectos dinámicos de las ondas expansivas, su carácter reservado hace que el acceso a los mismos esté parcialmente restringido. Esto justifica la realización de estudios como el que se presenta a continuación, pues estos proporcionan información muy útil para el diseño de estructuras atendiendo al margen de seguridad que se desee establecer y al riesgo expuesto.

Los estudios que tratan de predecir el comportamiento de la onda expansiva producida por una explosión se dividen en dos categorías en función de los métodos empleados:

- Método semi-empírico: se basa en la realización de estudios teóricos, numéricos y experimentales considerando geometrías sencillas y explosivos de referencia (como el TNT). Los datos obtenidos se combinan con las leyes de escala de las explosiones para establecer correlaciones de aplicación más general, que se combinan con análisis simplificados de la respuesta estructural para dar lugar a los procedimientos que se recogen en guías de diseño como las UFC-3-340-02 [1] y -01 [2].
- Método numérico: se basa en la resolución de las ecuaciones de conservación que gobiernan el comportamiento del fluido durante la explosión. Entre los códigos comerciales que implementan este método se encuentran, por ejemplo, el *software* de simulación LS-DYNA, el módulo AUTODYN de ANSYS, o el método numérico empleado en este trabajo.

No obstante, no existe un método definido para parametrizar protecciones contra los efectos de las ondas de choque de forma sencilla. En lo que a barreras de protección se refiere, pueden distinguirse dos tipos de acuerdo a su composición:

- Barrera convencional: estructuras de hormigón armado y acero en algunos casos, que se disponen en la zona circundante al objetivo que se pretende proteger con el fin de obstaculizar el paso libre de las ondas de choque hacia el mismo (barreras de tipo T-Wall).
- Barrera no convencional: estructuras con disposiciones y materiales especiales, como pueden ser depósitos de arena o protecciones de materiales compuestos que se emplean sobre todo en el ámbito militar (barreras de tipo HESCO® Bastion).

En lo que al estudio de ondas expansivas se refiere, existe una amplia oferta de códigos comerciales y *software* libre que ofrecen herramientas para simular la liberación brusca de cargas concentradas de energía, como ocurre en la detonación de un explosivo. No obstante, no todos estos productos están optimizados para la descripción de flujos supersónicos asociados a la aparición de ondas de choque en el medio fluido.

En un trabajo previo presentado en el V Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad [3], se propuso mejorar las condiciones iniciales de simulación, proporcionando información relativa a las propiedades fluido-térmicas del explosivo en el momento inmediatamente posterior a la detonación. En este proyecto se plantea utilizar el mismo modelo numérico, desarrollado inicialmente por Antanovskii [4], con el objeto de parametrizar diferentes aspectos del problema de forma sencilla. Esto permitirá considerar diferentes cantidades de carga explosiva, distancias al blanco y posicionamiento y geometría de las barreras mitigadoras. Con los datos obtenidos, se estudiará la respuesta dinámica de los elementos estructurales fundamentales del edificio con el fin de comprender los instantes críticos inmediatamente posteriores a la detonación, e identificar así los puntos más vulnerables en cada escenario de carga propuesto.

El objetivo de este trabajo es analizar el efecto de las cargas de presión dinámicas originadas por la detonación de una carga explosiva sobre la respuesta dinámica de una estructura tipo pórtico que asemeja la sección transversal de un edificio. En particular, se estudiará la atenuación de dichas cargas por barreras mitigadoras pasivas variando tanto la posición como la geometría de las barreras con el fin de determinar qué configuración resulta la más adecuada desde el punto de vista de la protección pasiva.

2. Estudio de la onda expansiva en espacios abiertos

El código numérico empleado para realizar las simulaciones de la propagación de ondas expansivas en aire fue desarrollado inicialmente por la División de Sistemas de Armamento de la Organización de Tecnología y Ciencia del Ministerio de Defensa del Gobierno de Australia [4]. Este código de volúmenes finitos, implementado en MATLAB®, usa un esquema conservativo del tipo Godunov [5] para resolver las ecuaciones de conservación (masa, momento y energía) en todo el dominio de interés. En particular, el código emplea el método de Riemann para determinar los flujos en las caras de los volúmenes discretos que conforman el dominio fluido.

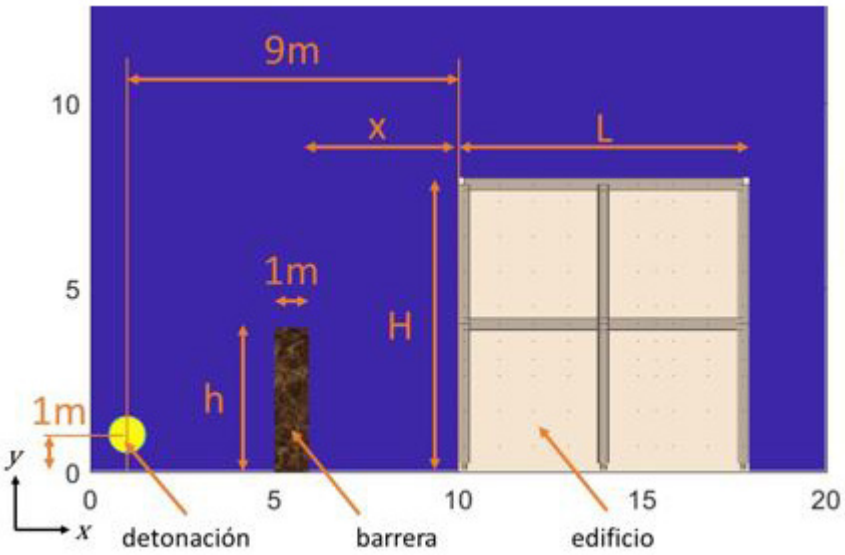


Figura 1. Esquema y parametrización de los elementos que intervienen en el problema.

El código requiere información sobre las condiciones iniciales del fluido, así como de las condiciones de contorno del dominio bajo estudio. Las primeras están relacionadas con las propiedades del explosivo detonado. En este estudio se simulan las propiedades del aire circundante al explosivo, cuyo efecto se modeliza como una región gaseosa de geometría cilíndrica de 0,5 m de radio con centro en el punto (1,1) y con una presión uniforme de 10 bar en el instante inicial, estando el resto del aire en reposo a 1 bar. Estas condiciones iniciales equivalen a una energía depositada de 2.6 MJ/m. Teniendo en cuenta que el equivalente TNT es de 4,61 MJ/kg, las condiciones iniciales corresponden a una carga de TNT de 0,56 kg

TNT/m. En principio esta carga podría parecer pequeña, pero hay que tener en cuenta que en un problema bidimensional el decaimiento de la onda de presión con la distancia se produce más despacio que en el caso tridimensional. Las condiciones de contorno están determinadas por una combinación de superficies libres que representan el espacio abierto, y superficies rígidas puramente reflexivas [6] que conforman los contornos del suelo, barrera y estructura porticada, tal y como se esquematiza en la figura 1.

A continuación se plantea una batería de casos en los que, para valores fijos de la altura del edificio y la distancia a la carga (9 m), se varían dos de los parámetros geométricos de la barrera: su altura y su distancia al edificio. El objeto del estudio es analizar la influencia de dichos parámetros sobre la eficiencia de la protección que ofrece la barrera. En la tabla 1 se indican los cocientes adimensionales y de los nueve casos bajo estudio.

Relación	Relación	Caso
0,25 (barrera de perfil bajo)	0,125	1
	0,500	2
	0,875	3
0,50 (barrera de perfil medio)	0,125	4
	0,500	5
	0,875	6
0,75 (barrera de perfil alto)	0,125	7
	0,500	8
	0,875	9

Tabla 1. Identificación de los nueve casos de estudio. El número de caso tiene un enlace activo a las simulaciones contenidas en el Google Drive de la UC3M

Como escenario representativo, en la figura 2 se representa el caso 5 para cuatro instantes de tiempo: t=8, 18, 28 y 38 ms. Se observa perfectamente cómo la onda resulta atenuada tras su interacción con la barrera, incidiendo sobre la pared frontal del edificio con mucha menor fuerza. Para el resto de los casos ocurre lo mismo, si bien el grado de atenuación se ve bastante afectado por la configuración geométrica. Conviene destacar que en este estudio la respuesta fluidodinámica se supone desacoplada de la respuesta estructural. Esto es, desde el punto de vista de la onda expansiva la barrera y el edificio se modelan como perfectamente rígidos. Esta hipótesis solo será válida cuando la barrera no sufra grandes deformaciones o desplazamientos a consecuencia de la propia onda expansiva, los cuales podrían llegar a producir el colapso estructural de la misma. De producirse este, la variación en la geometría del flujo afectaría a la propagación y atenuación de la onda expansiva, un efecto que queda sin embargo fuera del ámbito de este estudio.

Las cargas dinámicas obtenidas de las simulaciones fluidodinámicas se utilizan a continuación para alimentar el programa de análisis estructural y calcular las tensiones y deformaciones máximas que aparecen en la estructura por efecto de la onda expansiva. Finalmente, se analizarán los resultados y se realizará una valoración final en la que se recogen las conclusiones derivadas de la realización del trabajo, así como trabajos futuros que pudieran surgir de esta línea de investigación.

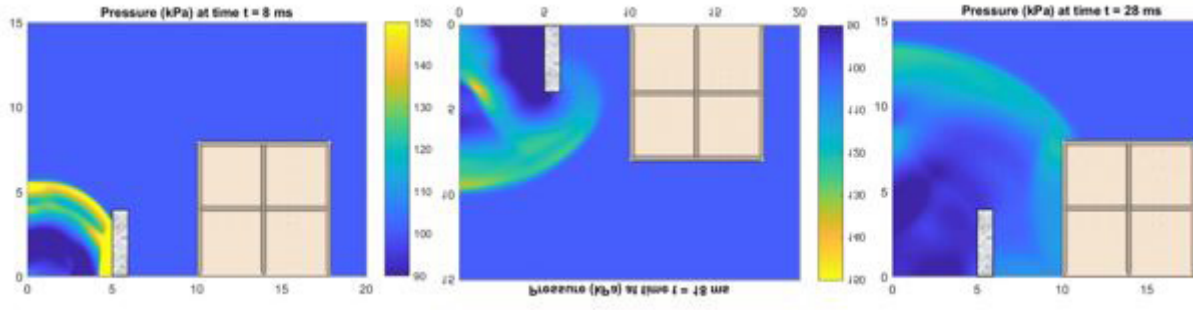


Figura 2. Campo de presiones en tres instantes de tiempo para el caso intermedio 5.

3. Efecto de la onda expansiva sobre la estructura

La simulación estructural, realizada mediante el *software* comercial Autodesk® Robot™ Structural Analysis, toma como dato de entrada la distribución de presiones obtenida de la simulación fluidodinámica descrita en la sección anterior. El cálculo de la onda expansiva genera un gran volumen de datos sobre cada una de las paredes del edificio, pues al tratarse de un método de primer orden se requieren mallas muy finas para describir con precisión la solución. Por ese motivo se decidió trabajar con elementos estructurales significativamente más grandes que el tamaño de celda del modelo hidrodinámico, calculando la fuerza resultante sobre cada uno y ubicando dicha resultante en el punto correspondiente para garantizar el equilibrio de momentos (véase figura 3).

Al tratarse de una simulación bidimensional se deben realizar una serie de hipótesis para darle forma a los datos de entrada que se introducen en el programa de análisis estructural. El edificio se trata como una estructura simplificada de barras, siendo todas las uniones entre las mismas de tipo reticulado, es decir, se restringen todos los grados de libertad en las uniones entre barras, como suele ocurrir en las construcciones reales. Asimismo, se supone que las uniones entre el edificio y la cimentación también son de tipo reticulado, por lo que los apoyos de la estructura de consideran empotrados, restringiéndose de nuevo todos los grados de libertad en esos puntos. Tanto las uniones entre barras como la unión del edificio con su base, al ser de tipo reticulado, aportan por un lado mayor rigidez a la estructura, pero a su vez existe la posibilidad de generar esfuerzos de reacción asociados a todos los grados de libertad que se restringen, como se verá una vez realizado el análisis de los distintos casos. La configuración estructural se considera que los vanos del pórtico simplificado tienen una longitud de 5 metros en la dirección perpendicular al plano observado.

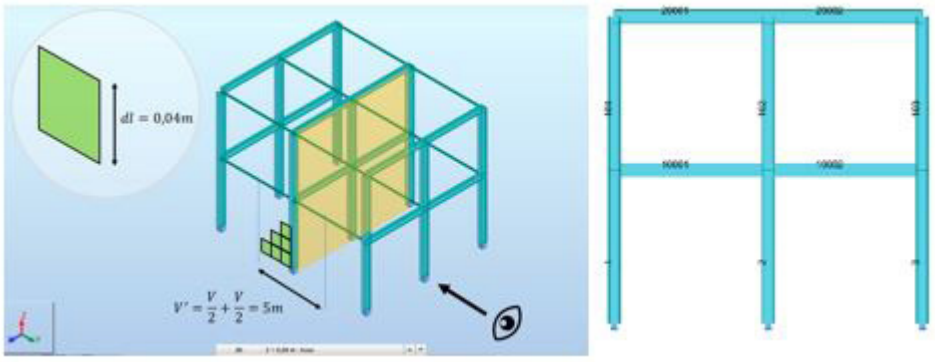


Figura 3. Elementos considerados para el cálculo de las fuerzas que actúan sobre la estructura.

La estructura planteada para la realización del estudio es un pórtico complejo en el que se consideran elementos internos con el objetivo de asimilar el modelo 2D a la geometría de las estructuras reales. Se seleccionó una estructura de estas características ya que permitía incorporar compartimentos en el interior del pórtico, lo que se asemeja más a las estructuras observables en una construcción común, y se escogió unas dimensiones de 8x8 metros ya que se debía mantener un compromiso entre el tiempo empleado en las simulaciones y los resultados obtenidos. Los materiales y el perfil de las barras empleados en el estudio en la figura 4. La elección de los elementos estructurales no está ligada a un modelo en particular. Se han mantenido los perfiles sugeridos por defecto en el programa, pero se ha modificado el material constructivo por el acero S275.

La respuesta de la estructura a las solicitaciones impuestas por la onda expansiva es claramente dinámica. Las tensiones sobre las barras y las deformaciones de estas dependen de la posición instantánea de la onda expansiva. Por lo tanto, el comportamiento estructural observado depende de la morfología de la onda expansiva, esto es, de los históricos de las fuerzas aplicadas a la estructura una vez que la onda expansiva sobrepasa la barrera y se producen las reflexiones correspondientes.

Barra	Perfil	Material
1	HEB340	Acero S275
2	HEB340	Acero S275
3	HEB340	Acero S275
101	HEB340	Acero S275
102	HEB340	Acero S275

Barra	Perfil	Material
103	HEB340	Acero S275
10001	IPE360	Acero S275
10002	IPE360	Acero S275
20001	IPE360	Acero S275
20002	IPE360	Acero S275

Figura 4. Información de las barras etiquetadas en la figura 3.

Con el objetivo de mostrar estas características y la posible relación entre el comportamiento observado y las fuerzas aplicadas, se computan en la figura 5 las fuerzas que llegan en dos puntos diferenciados de la cara oeste de la estructura. En los casos 1, 2 y 3 se hace evidente que la reflexión de ondas contra las barreras de perfil bajo refuerza el impacto en las cotas inferiores de la estructura.

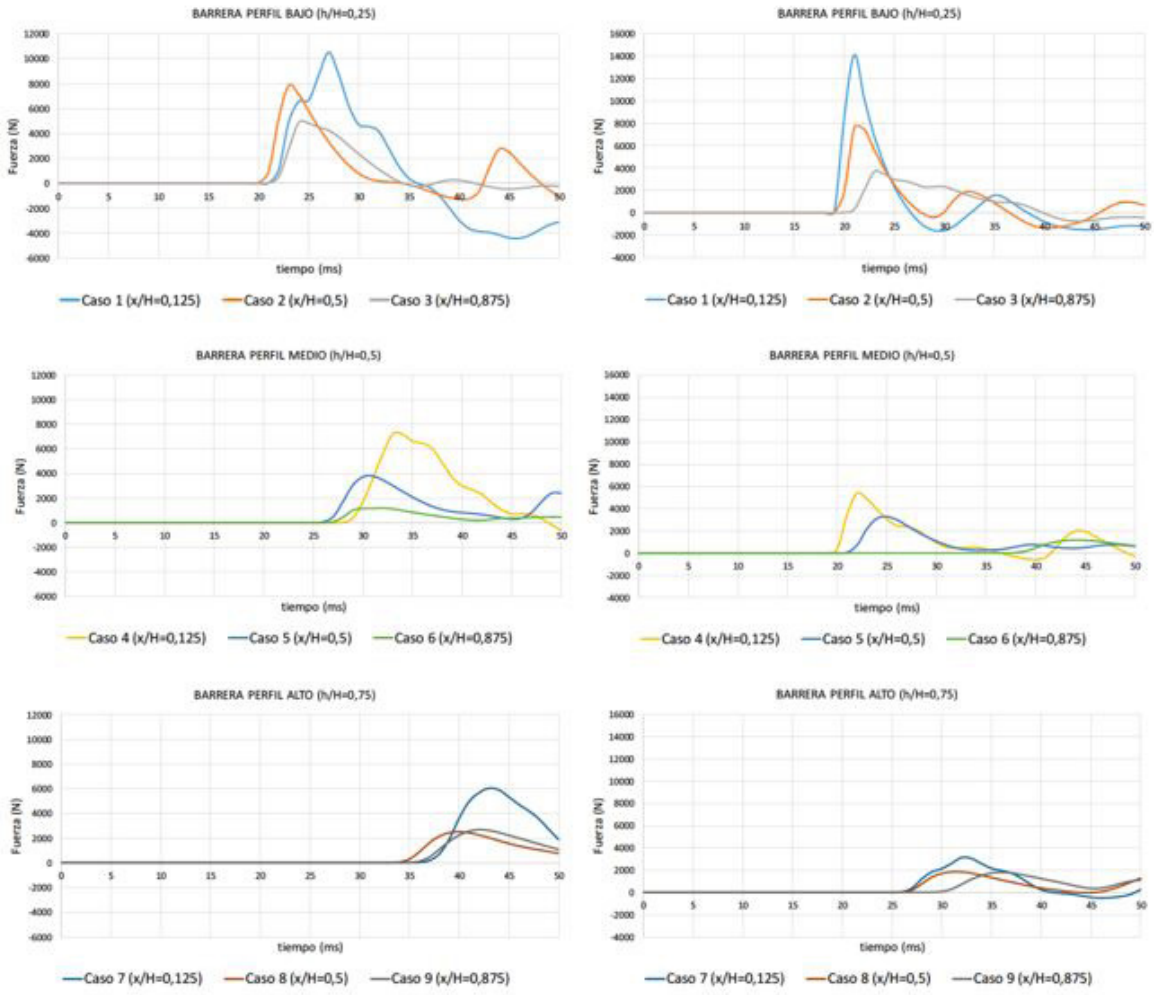


Figura 5. Fuerzas en la pared oeste de la estructura al nivel del suelo $y = 0$ (izquierda) y a media altura $y = H/2$ (derecha); nótese que la escala vertical es distinta en ambos casos.

Si se analizan las fuerzas que llegan a la pared oeste, tanto en la base $y = 0$ como en su punto de altura medio $y = H/2$, se observa que el caso 1 es el más desfavorable, pues la onda de presión alcanza en estas condiciones su valor más elevado y, además, la forma de la onda tras el frente de choque posee zonas de presión positivas y negativas de gran intensidad. Sin embargo, la deducción del caso más favorable a partir del histórico de fuerzas aplicadas sobre las caras del edificio no es tan trivial. Esto es, para valores

máximos similares, la forma de la onda puede jugar un papel crucial en la deformación dinámica de la estructura. Para poder hacer un análisis comparativo global es conveniente usar los valores máximos de deformación y tensión producidos sobre la estructura en el transcurso de la onda expansiva. Por ejemplo, para la configuración del caso 5, representada en la figura 6, se observa que la tensión máxima se localiza en la barra 10001 y deformación máxima en el nudo superior derecho. También se observa que el límite elástico no se supera, por lo que ningún elemento de la estructura sufre deformaciones permanentes durante el proceso (σ = 275 MPa).

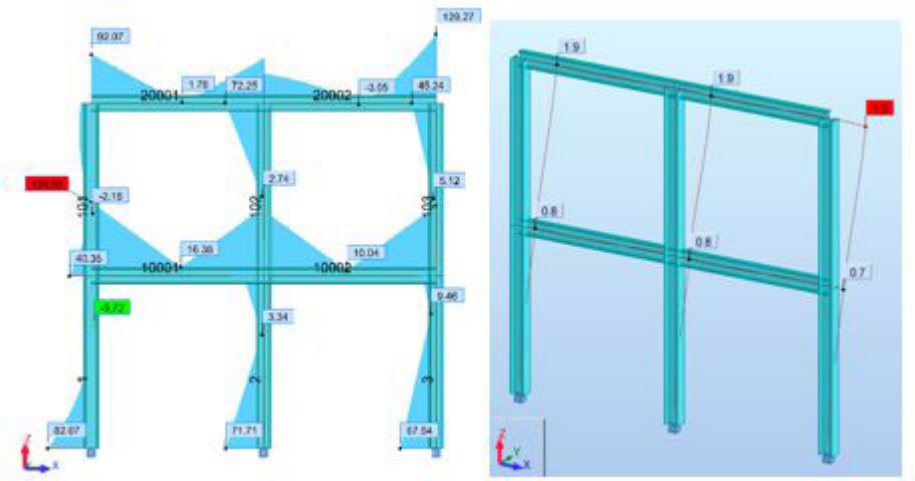


Figura 6. Tensiones normales máximas [MPa] (izquierda) y deformaciones máximas [mm] (derecha) para el caso número 5.

En lo que a tensiones normales máximas se refiere (ver panel superior en la figura 7), hay una clara tendencia para los tres tipos de perfil de barrera, en la cual la tensión se reduce a medida que se aleja la barrera del edificio. A medida que la barrera se aleja del edificio, el frente de ondas se redirecciona hacia una zona más alejada del edificio, con lo cual se reduce de forma significativa el impacto de la onda expansiva sobre la estructura del edificio. Respecto a qué tipo de barrera resulta más efectivo, según lo mostrado en el panel inferior de la figura 7, se produce una reducción significativa de la tensión máxima soportada por la estructura al pasar de un perfil bajo a uno medio.

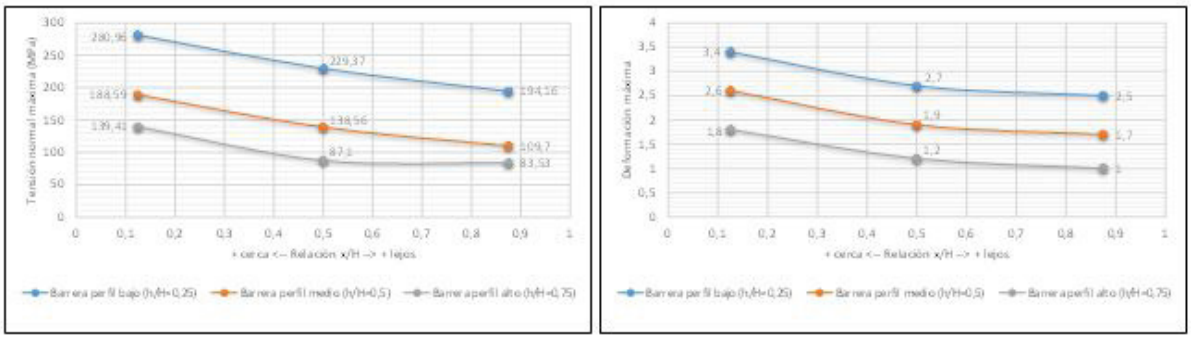


Figura 7. Influencia del tipo de caso en la tensión normal máxima (panel superior izquierda) y en la deformación máxima (panel inferior izquierda).

En cuanto a las deformaciones máximas observadas en la estructura, se mantiene la tendencia en cuanto a la distancia de la barrera respecto al edificio, reduciéndose los valores máximos observados a medida que se aleja la barrera. A diferencia de lo que ocurría con las tensiones normales máximas, en este caso la diferencia al cambiar de perfil de barrera es similar al pasar de perfil bajo a perfil medio, y de perfil medio a perfil alto. Bajo este criterio, se podría justificar la elección de perfiles altos de barrera. Atendiendo

a los resultados obtenidos para cada una de las configuraciones de barrera propuestas, en la siguiente tabla se recogen los datos más relevantes a modo de resumen:

	x/H	h/H	$\sigma_{máx}$ [MPa]	¿$\sigma_{máx} > \sigma_y$? (¿Plastifica?)	$\varepsilon_{máx}$	Perfil de barrera	Distancia relativa al edificio
Caso 1	0,125		280,96	**SÍ (280,96>275)**	3,4		Cerca
Caso 2	0,500		229,37	NO (229,37<275)	2,7		Media
Caso 3	0,875	0,25	194,16	NO (194,16<275)	2,5	Bajo	Lejos
Caso 4	0,125		188,59	NO (188,59<275)	2,6		Cerca
Caso 5	0,500		138,56	NO (138,56<275)	1,9		Media
Caso 6	0,875	0,50	109,70	NO (109,70<275)	1,7	Medio	Lejos
Caso 7	0,125		139,41	NO (139,41<275)	1,8		Cerca
Caso 8	0,500		87,10	NO (87,10<275)	1,2		Media
Caso 9	0,875	0,75	83,53	NO (83,53<275)	1,0	Alto	Lejos

Tabla 2. Comparativa de los resultados obtenidos en el análisis estructural

4. Conclusiones

Tras haber abordado la simulación de los casos planteados con diferentes configuraciones de barrera se concluye que el uso de barreras mitigadoras es efectivo para proteger estructuras porticadas. En 8 de los 9 casos propuestos se logra el objetivo de reducir el impacto de las ondas de choque sobre el edificio lo suficiente como para que no se supere en los elementos estructurales el límite admisible de tensión del material. El trabajo abre un amplio abanico de posibilidades, ya que se puede ampliar la batería de escenarios de ensayo con el objetivo de establecer un modelo predictivo en el cual se pueda obtener una parametrización inicial de la geometría y la disposición de barrera de protección en función de las necesidades de cada caso. Como aspectos de mejora cabe destacar la posibilidad de realizar simulaciones tridimensionales y de incluir modelos de explosivos catalogados para la determinación de las condiciones iniciales.

Referencias

1. *DoD, U. S. (2008). Structures to resist the effects of accidental explosions. Unified Facilities Criteria, USA, DoD, Washington, DC, Doc. No. UFC, 3-340-02.*
2. *DoD, U. S. (2002). Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. Unified Facilities Criteria, USA, DoD, Washington, DC, Doc. No. UFC, 3-340-01.*
3. *Huete, C., Meléndez de Lama, A., Sánchez-Monreal, J. y Vera, M. Cálculo de las condiciones iniciales para la simulación de ondas expansivas, V DESEID, Toledo, 2017.*
4. *Antanovskii, L. K. Solving multi-dimensional problems of gas dynamics using MATLAB. Weapons Systems Division, Australia 2008, No. DSTO-TR-2139.*
5. *Godunov, S. K. (1959). A finite difference method for the computation of discontinuous solutions of the equations of fluid dynamics. Sbornik: Mathematics, 47(8-9), 357-393.*
6. *Sánchez-Monreal, J., Huete, C., Baillif, G. y Vera, M. Numerical simulation of blast waves interacting with shock attenuation barriers for explosive protection, 11th European Fluid Mechanics Conference Seville, Spain, 2016.*

5B. Defensa nuclear, radiológica, biológica y química (NRBQ)

Evaluación de detectores de aerosoles biológicos en túnel de viento

Dabbagh Escalante, N.A.[1], Rozas Sanz, G.[1], Peraile Muñoz, I.[2], González López, L.[1], Cabria Ramos, J.C.[1] y Lorenzo Lozano, P.[1]*

[1] Área de Defensa Biológica, Dpto NBQ y Materiales, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) - Campus La Marañosa.

[2] Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España (ISDEFE).

Email:

* Lorenzo Lozano, P; plorloz@oc.mde.es (LLP).

Resumen

Durante el siglo pasado, los avances en biotecnología y bioquímica han simplificado el desarrollo y la producción de armas biológicas. Estas pueden ser más potentes que las armas convencionales o las armas químicas, por su alta contagiosidad, fácil difusión y la cantidad mínima de organismos requeridos para causar enfermedad y/o muerte.

Los agentes biológicos que tienen mayor probabilidad de ser utilizados como armas biológicas son bacterias, rickettsias, virus y toxinas, y la vía de dispersión de mayor interés desde el punto de vista de la seguridad y la defensa es mediante los bioaerosoles. Desde los ataques con ántrax producidos en 2001 en EE. UU., los países han incrementado considerablemente los esfuerzos en investigación para el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan una detección temprana de las amenazas biológicas. Disponer de sistemas de detección en tiempo real y con una elevada sensibilidad permite minimizar los riesgos de exposición a este tipo de agentes, ya que la información obtenida puede ser utilizada para adoptar medidas de protección y prevención apropiadas a la amenaza detectada.

El Área de Defensa Biológica, ubicada en el Departamento de Sistemas de Defensa NBQ y Materiales Energéticos de la Subdirección General de Sistemas Terrestres del INTA-Campus La Marañosa, ha puesto a punto una metodología para evaluar nuevos equipos de detección de aerosoles biológicos. La eficacia de estos equipos se ha analizado en términos de tiempo de respuesta, sensibilidad y capacidad, para diferenciar entre eventos biológicos y no biológicos. Los ensayos se han realizado en un túnel de viento (diseñado por la empresa IBATECH) sobre el que se inyectan aerosoles biológicos de concentraciones conocidas. Para la generación de la nube se han utilizado simulantes de agentes de guerra biológica (*Bacillus thuringiensis* como simulante de *Bacillus anthracis* y *Pantoea agglomerans* como simulante de *Yersinia pestis*).

Palabras clave

Detectores, bioaerosoles, túnel de viento, simulantes, agentes de guerra biológica.

1. Introducción

El uso de agentes de guerra biológica supone una amenaza creciente para la sociedad, por lo que la mayoría de los países se han visto obligados a aumentar recursos en investigación, diseño y desarrollo de nuevas tecnologías para su detección e identificación. Uno de los puntos críticos en la lucha eficaz contra estos agentes es su detección e identificación precoz [1].

Se considera como arma biológica cualquier material de origen orgánico que pueda provocar una infección, alergia o toxicidad sobre el ser humano, el ganado o las cosechas cuando es dispersado deliberadamente. La vía de dispersión de mayor interés desde el punto de vista militar es a través de bioaerosoles [2].

En la última década se han desarrollado diversos equipos de detección y/o muestreo de aerosoles biológicos con diferentes especificaciones en cuanto a su funcionamiento (rango de tamaño de partículas, tasa de flujo de aire, medio utilizado, volumen de muestra, etc.), lo que debe tenerse en cuenta dependiendo del tipo de bioaerosoles que se quiera muestrear. La variabilidad, tanto de equipos como de bioaerosoles, hace necesario el desarrollo de una metodología de evaluación de estos equipos que permita estandarizar los procedimientos utilizados, proporcionando resultados fiables y precisos [3, 4].

El sistema CATS (*Compact Aerosol Test System*) diseñado por la empresa IBATECH se compone de un sistema de generación de aerosoles, un sonicador y un túnel de viento al que se conectan dos equipos de detección y un muestreador de bioaerosoles. Esto permite realizar simulaciones de generación y propagación de aerosoles, donde se acoplan los equipos a probar y otros que se utilizan como equipos patrón o de referencia.

En este trabajo se desarrolla una metodología para evaluar el funcionamiento de nuevos equipos de detección y/o muestreo de bioaerosoles que permitan la detección temprana de amenazas biológicas provenientes de un entorno civil o militar.

2. Desarrollo

2.1. Equipos utilizados

El sistema CATS empleado es una cámara híbrida de ensayos compuesta por los siguientes componentes (figura 1).

El túnel de viento (ATD, Dycor Technologies™) es un tubo de aluminio de 0,2 m^3, con puertos de acceso para el resto de los componentes del sistema y filtros HEPA en la salida. Permite diseminar bioaerosoles en un espacio contenido. El ATD tiene una tasa de flujo de aire de 30 litros por minuto.

El sistema de generación de aerosoles (ADS, Dycor Technologies™) consiste en una campana con un nebulizador sonicador (Sono-Tek, Dycor Technologies™), que evita que las partículas biológicas formen agregados. La potencia del Sono-Tek es de 1,8 W. El ATD y el ADS se controlan mediante un *software* que permite modificar la configuración y el funcionamiento del sistema.

El C-FLAPS™ III (Dycor Technologies™) es un sistema de detección de aerosoles biológicos que consta de un láser UV de 405 nm que ilumina las partículas y permite determinar si estas son organismos vivos o no, su tamaño y concentración. El detector recolecta, filtra y concentra las partículas comprendidas entre 1 y 10 µm; este rango de tamaño incluye las bacterias y agregados de bacterias que pueden utilizarse como agentes de guerra biológica mediante aerosoles [1,5]. El flujo de entrada de aire es de más de 200 litros por minuto.

El IBAC™ (FLIR®) es un equipo de detección en tiempo real de aerosoles biológicos que funciona mediante un fenómeno de dispersión de luz asociado a un aumento de fluorescencia, característico de elementos específicos constituyentes de organismos vivos. El flujo de entrada de aire es de 3,8 litros por minuto. Este equipo se controla mediante el *software* Communicator LT.

El Slit Sampler (Dycor Technologies™) es un muestreador de aerosoles biológicos por succión. Las partículas se recogen sobre una placa de Petri de 15 cm de diámetro con medio de cultivo (TSA Tryptic Soy Agar, Scharlab™) que será incubada posteriormente para el cálculo de la concentración de microorganismos. El muestreo se realiza durante 2 minutos, el tiempo que tarda en dar una vuelta completa a la placa.

En este trabajo se ha empleado la combinación C-FLAPS™ III – IBAC™ –Slit Sampler, que serán los equipos patrón.

2.2. Metodología empleada

Se realizaron diluciones seriadas de células vegetativas y esporas de *Bacillus thuringiensis* (referencia CECT 4454) y células vegetativas de *Pantoea agglomerans* (referencia CECT 850) para obtener distintas concentraciones de trabajo. Las diluciones se realizan en tampón fosfato a pH 7,4 (PBS 1X) y en caldo de cultivo de triptona y soja (TSB Tryptic Soy Broth, Scharlab™). Para confirmar que las diluciones se habían realizado correctamente, se midió su concentración mediante los estándares de turbidez de McFarland y se sembraron placas de Petri para su incubación y posterior recuento de las unidades formadoras de colonias (UFC) mediante la siguiente ecuación:

$$UFC/ml = \frac{c}{(n_1 + 0{,}1.\, n_2)d} \,.10 \qquad (1)$$

Donde c es la suma de colonias contadas en todas las placas tenidas en cuenta; n_1 es el número de placas de la dilución menor que se pueden contar; n_2 es el número de placas de la dilución mayor que se pueden contar y d es el factor de dilución de la dilución menor.

2.3. Detección de simulantes de guerra biológica

Se generaron aerosoles con distintas concentraciones patrón de *B. thuringiensis* y *P. agglomerans* (10^6, 10^7, 10^8, y 10^9 UFC/ml para las células vegetativas y 10^3, 10^4, 10^5 y 10^6 UFC/ml para las esporas de *B. thuringiensis*), además de blancos únicamente con PBS 1X o TSB como control negativo. Cada ensayo tuvo una duración total de 10 minutos y la secuencia de trabajo fue la siguiente: fase de inicio del ADS (10 segundos), fase de nebulización (370 segundos), fase de muestreo del Slit Sampler (120 segundos dentro de la fase de nebulización), fase de limpieza y finalización (220 segundos). La jeringuilla en la que se carga la suspensión para su nebulización en el Sono-Tek deja pasar 500 µL/min. Entre muestra y muestra se realizaron 2 lavados de 10 minutos con PBS 1X para evitar contaminaciones cruzadas.

El C-FLAPS™ III detecta un aumento en el número de partículas respecto al *background* y aumento de las emisiones de fluorescencia de marcadores naturales de partículas vivas (NADH y riboflavina), permitiendo discriminar en tiempo real las partículas biológicas de los materiales inertes [5]. Cuando el sistema detecta una alerta biológica, se dispara una alarma (figura 2). Los algoritmos de la alarma pueden ser modificados según la sensibilidad que se desee, pudiendo elegir entre alta (limita el umbral

de detección, lo que puede provocar que se pasen por alto alarmas biológicas), media (el nivel utilizado en este estudio) y baja (umbral de detección amplio, puede dar lugar a falsas alarmas).

El IBAC™ recoge datos en tiempo real de partículas biológicas (las que emiten luz fluorescente en el rango de longitud de onda relacionado con marcadores de partículas vivas) discriminando por tamaño (partículas pequeñas o menores de 1,5 µm y partículas grandes o mayores de 1,5 µm). Cuando el sensor detecta un aumento de las partículas biológicas con una duración mínima de 30 segundos, se activa la alarma que indica una amenaza biológica (figura 3).

2.4. Estimación de la concentración de microorganismos

Las placas de Petri con los muestreos del Slit Sampler (figura 4A) se incubaron a 37ºC *overnight* y se llevó a cabo el recuento de colonias para obtener el número de UFC/litro de aire en la nube:

$$UFC/L\ aire = \frac{\text{N colonias}}{\text{Tasa flujo aire x t}} \qquad (2)$$

Donde N colonias es el número de colonias contadas; la tasa de flujo de aire es 30 L/min y t es el tiempo de muestreo, en este caso 2 minutos.

2.5. Descontaminación

Como parte de la metodología de trabajo desarrollada, se optimizó un proceso de descontaminación para garantizar la correcta limpieza y desinfección del sistema. La descontaminación consistió en lavados sucesivos con alcohol al 10 % y PBS 1X hasta lograr la ausencia de alarma en los detectores C-FLAPS™ III e IBAC™ y el recuento negativo de colonias con los muestreos del Slit Sampler.

3. Listas, figuras y tablas

1) Ecuación para el cálculo de la concentración de microorganismos (UFC/ml).
2) Ecuación para el cálculo de UFC/litro de aire.

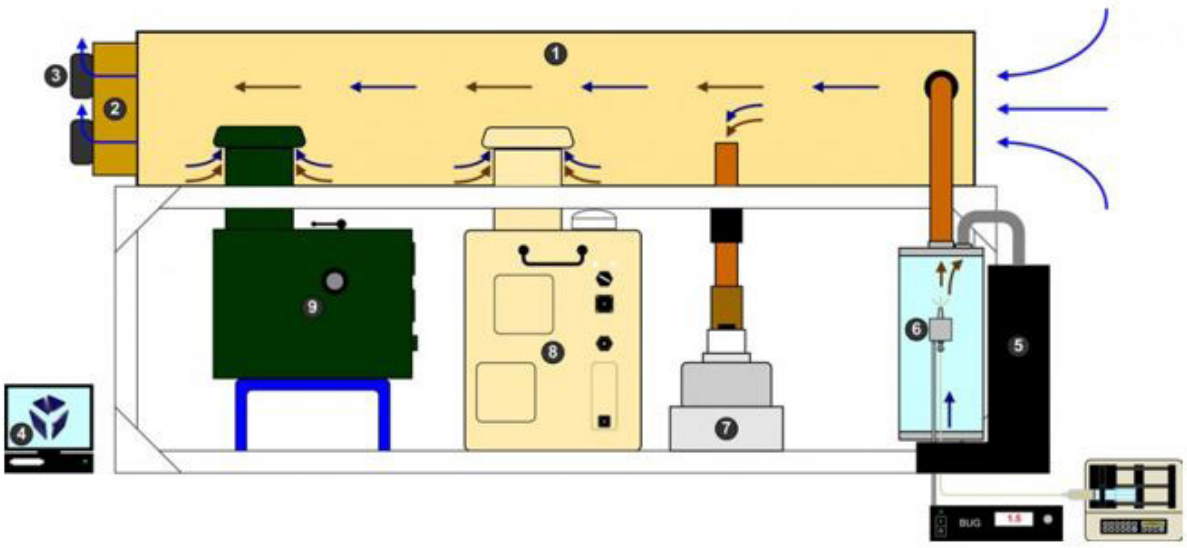


Figura 1. Diagrama del sistema CATS. Las flechas indican el sentido del flujo de aire. El aire es introducido al túnel de viento mediante las bombas insufladoras (3), formando la nube con los aerosoles diseminados (1), que son filtrados (2) antes de liberarse al exterior. Mediante el software de control (4) se inicia el proceso de diseminación del nebulizador Sono-Tek (6), incluido en el ADS (5) y se pone en funcionamiento el Slit Sampler (7). Los detectores C-FLAPS™ III (8) e IBAC™ (9) recogen muestra procedente de la nube para su análisis.

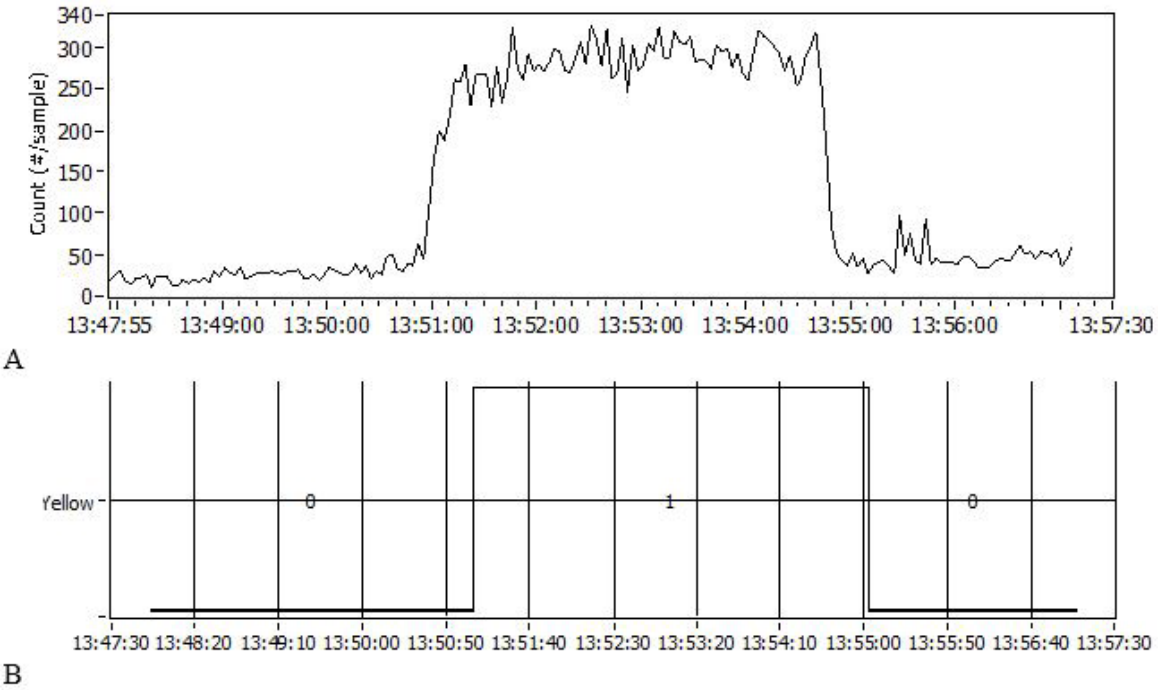


Figura 2. Gráficos del C-FLAPS™ III correspondientes a la muestra de células vegetativas de B. thuringiensis (109 UFC/ml). (A) Gráfico de historial de partículas, muestra el recuento de partículas en función del tiempo. (B) Gráfico de historial de alarma en función del tiempo; el estado 1 indica que se ha activado la alarma y el estado 0 indica que la alarma está desactivada.

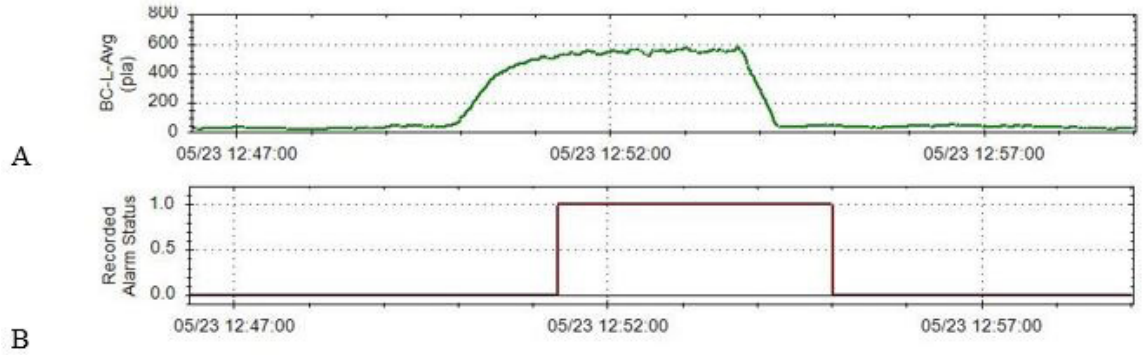


Figura 3. Gráficos del IBAC™ correspondientes a la muestra de células vegetativas de B. thuringiensis (109 UFC/ml). (A) Gráfico de historial de partículas, muestra el recuento de partículas biológicas por litro de aire en función del tiempo. (B) Gráfico de historial de alarma en función del tiempo; el estado 1 indica que se ha activado la alarma y el estado 0 indica que la alarma está desactivada.

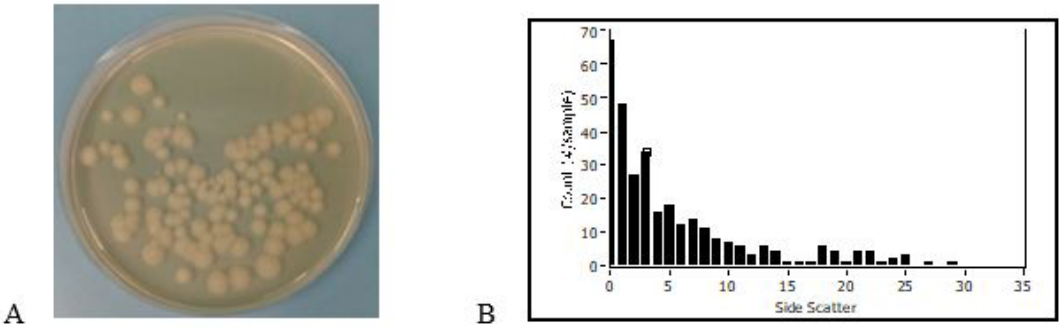


Figura 4. (A) Placa de Petri del Slit Sampler (tras la incubación) correspondiente a la muestra de células vegetativas de B. thuringiensis (109 UFC/ml). (B) Gráfico de distribución de tamaños de las partículas de la muestra de células vegetativas de B. thuringiensis (109 UFC/ml).

Tabla 3. Datos obtenidos para las muestras de células vegetativas de *B. thuringiensis*

Concentración (UFC/ml)	N.º de partículas	Tamaño medio de las partículas (µm)	UFC/L aire	Alarma C-FLAPS III	Alarma IBAC
10^6	689	3,03	0,5	No	No
10^7	436	2,66	1	No	No
10^8	306	2,87	1,5	No	No
10^9	311	3,39	6,5	Sí	Sí

Tabla 4. Datos obtenidos para las muestras de esporas de *B. thuringiensis*

Concentración (UFC/ml)	N.º de partículas	Tamaño medio de las partículas (µm)	UFC/L aire	Alarma C-FLAPS III	Alarma IBAC
10^3	502	1,91	2,5	No	No
10^4	294	1,85	5	No	No
10^5	321	2,33	11,5	Sí	No
10^6	388	2,51	Incontable	Sí	Sí

Tabla 5. Datos obtenidos para las muestras de células vegetativas de *P. agglomerans*

Concentración (UFC/ml)	N.º de partículas	Tamaño medio de las partículas (µm)	UFC/L aire	Alarma C-FLAPS III	Alarma IBAC
10^6	566	1,87	6	No	No
10^7	410	1,39	34,5	Sí	No
10^8	864	1,14	75	Sí	No
10^9	112	2,27	Incontable	No	Sí

4. Resultados y discusión

Los datos obtenidos para los ensayos con *B. thuringiensis* y *P. agglomerans* en TSB (datos no mostrados) indican que el contenido en triptófano de este medio interfiere en las detecciones llevadas a cabo con el C-FLAPS™ III al emitir fluorescencia [6], por lo que se descartó utilizarlo en los ensayos realizados para la estandarización del método.

Con las condiciones utilizadas, C-FLAPS™ III e IBAC™ detectaron diferentes concentraciones de *B. thuringiensis* y *P. agglomerans*. En la tabla 1 se muestran los datos obtenidos para los ensayos con células vegetativas de *B. thuringiensis*. El número de partículas detectadas en cada ensayo se mantuvo entre 300 y 690. El tamaño de las partículas se obtiene mediante la intensidad de luz del Side Scatter del C-FLAPS™ III (figura 4B), ya que, aunque no hay una calibración exacta de los dos parámetros, existe un consenso sobre su correlación directa [7]. El tamaño medio de las partículas detectadas está entre 2,6 y 3,4 µm. Estos datos coinciden con la bibliografía, que indica que el tamaño medio de las células individuales de *B. thuringiensis* es de 1 µm, pudiendo encontrarse tamaños mayores debido al agregado de células [8]. El recuento de UFC/L en la nube se mantuvo entre 0,5 y 6,5. Los detectores dieron señal de alarma cuando el aerosol se generó con una concentración patrón de 10^9 UFC/ml.

Los valores correspondientes a los ensayos con esporas de *B. thuringiensis* se encuentran reflejados en la tabla 2. Se detectaron entre 290 y 510 partículas por ensayo, de tamaño medio comprendido entre 1,8 y 2,6 µm. De acuerdo con la bibliografía, las esporas de *B. thuringiensis* tienen un tamaño aproximado de 1 µm, pudiendo formarse clústers de mayor tamaño [6]. Las UFC/L contabilizadas en la nube se encuentran entre 2,5 y más de 11,5, no siendo posible realizar el recuento de la placa con mayor concentración debido al elevado número y solapamiento de colonias. Las alarmas del C-FLAPS™ III e IBAC™ se desencadenaron a concentraciones de 10^5-10^6 y 10^6 UFC/ml, respectivamente.

En cuanto a los ensayos con *P. agglomerans,* los datos obtenidos se muestran en la tabla 3. El número de partículas detectadas en cada ensayo se mantuvo entre 110 y 870, con un rango de tamaño medio entre 1,10 y 2,30 µm. El tamaño de las células de *P. agglomerans* está entre 0,5 y 1 µm, pudiendo formarse agregados celulares de mayor tamaño [9], lo cual coincide con las partículas detectadas. Se contabilizaron entre 6 y más de 75 UFC/L en la nube, no siendo posible realizar el recuento de la placa con mayor concentración debido al elevado número y solapamiento de colonias. Las alarmas del C-FLAPS™ III e IBAC™ se desencadenaron a concentraciones de 10^7-10^8 y 10^9 UFC/ml, respectivamente.

Con estos datos se observa que los detectores evaluados producen alarmas en las muestras procesadas que contienen 6,5 UFC/L o superior. El C-FLAPS™ III desencadena alarmas a concentraciones inferiores al IBAC™, salvo en la muestra patrón de *P. agglomerans* preparada a 10^9 UFC/ml. En este caso se pudo producir una saturación del C-FLAPS™ III por la formación de agregados de células al tener una concentración muy elevada.

En cuanto al proceso de descontaminación, la combinación óptima ha resultado ser de 4 lavados con alcohol al 10 % seguidos de 3 lavados con PBS 1X, que se aplican al finalizar los experimentos.

5. Conclusiones

Se han puesto a punto las condiciones para la evaluación de detectores y/o muestreadores de bioaerosoles en túnel de viento, utilizando como equipos patrón C-FLAPS™ III, IBAC™ y Slit Sampler.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el PBS 1X es el medio más adecuado para la suspensión de células vegetativas y de esporas cuando se utilizan sistemas de detección de partículas biológicas que registran emisiones de fluorescencia a partir de marcadores naturales. Se ha determinado que la concentración patrón de esporas a utilizar en el proceso debe oscilar entre 10^5 y 10^6 UFC/ml, y la de células vegetativas, entre 10^7 y 10^9 UFC/ml.

En conclusión, se ha desarrollado y estandarizado un método para la evaluación en túnel de viento de equipos de detección y/o muestreo, los cuales permitirán estimar en tiempo real la concentración de microorganismos en un bioaerosol, su tamaño y la posibilidad de que constituyan una amenaza potencial, mejorando por tanto la detección y minimizando la aparición de falsos negativos y/o positivos.

Agradecimientos

Becas de formación del INTA, Resolución 3D0/38136/2015 de 21 de septiembre.

Proyecto OPTONANOSENS TEC2015-63838-C3-2-R financiado con fondos MINECO/FEDER.

Referencias

1. *Detección e identificación de agentes de guerra biológica. Estado del arte y tendencia futura. Monografías del Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica. Ministerio de Defensa: Dirección General de Relaciones Institucionales; 2010.*
2. *Thavaselvam D, Vijayaraghavan R. Biological warfare agents. J Pharm Bioallied Sci. 2010; 2(3):179-188.*
3. *Dybwad M, Skogan G, Blatny JM. Comparative testing and evaluation of nine different air samplers: end-to-end sampling efficiencies as specific performance measurements for bioaerosol applications. Aerosol Sci Technol. 2014; 48(3):282-295.*
4. *Yao M, Mainelis G. Analysis of portable impactor performance for enumeration of viable bioaerosols. J Occup Environ Hyg. 2007; 4:514-524.*
5. *Hairston PP, Ho J, Quant FR. Design of an instrument for real-time detection of bioaerosols using simultaneous measurement of particle aerodynamic size and intrinsic fluorescence. J Aerosol Sci. 1997; 28(3):471-482.*

6. *Saari S, Reponen T, Keskinen J. Performance of two fluorescence-based real-time bioaerosol detectors: BioScout vs. UVAPS. Aerosol Sci Technol. 2014; 48:371-378.*
7. *Seaver M, Eversole JD, Hardgrove JJ, Cary WK, Roselle DC. Size and fluorescence measurements for field detection of biological aerosols. Aerosol Sci Technol. 1999; 30(2):174-185.*
8. *On the use of Bacillus thuringiensis as a surrogate for Bacillus anthracis in aerosol research. Technical report. United States Environmental Protection Agency; 2012.*
9. *Rule AM, Schwab KJ, Kesavan J, Buckley TJ. Assessment of bioaerosol generation and sampling efficiency based on Pantoea agglomerans. Aerosol Sci Technol. 2009; 43(6):620-628.*

Biofuncionalización de superficies de nylon con anticuerpos anti-ricina para su uso en inmunobiosensores

Peraile Muñoz, Ines[1,*], Gil García, Matilde[2], Murillo, Nieves[3], Maudes, Jon[3], Rozas Sanz, Gabriel[2], González López, Laura[2], Dabbagh Escalante, Nushin[2], Pérez, Ana[3], Cabria Ramos, Juan Carlos[2] y Lorenzo Lozano, Paloma[2]

[1] Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España (ISDEFE).

[2] Área de Defensa Biológica, Departamento de Sistemas de Defensa NBQ y Materiales Energéticos, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas» (INTA)-Campus La Marañosa, Crta. San Martín de la Vega (M-301), km 10,5, 28330 Madrid, Spain.

[3] División Industria y Transporte, TECNALIA, Pº Mikeletegi, 2. Parque Tecnológico, E-200009 Donostia-San Sebastián, Spain.

[*] Corresponding author: e-mail: iperaile@isdefe.es, Phone: +34 911742375.

1. Introducción

Los agentes de guerra biológica constituyen un riesgo creciente en la actualidad, pudiendo ser dirigidos tanto a la población como a los cultivos y al ganado, produciendo efectos devastadores tanto en la salud de la población como en la economía de los países [1]. Por ello, la mayoría de los países invierten en la investigación y el desarrollo de técnicas de detección e identificación de dichos agentes, siendo un objetivo prioritario el desarrollo de dispositivos que permitan una identificación temprana *in situ* lo más específica y sensible posible, de bajo coste, alta estabilidad y fáciles de usar, que permitan una miniaturización [2]. Dentro de estos dispositivos, los inmunobiosensores, basados en técnicas inmunológicas, resultan ser los candidatos de elección, puesto que la unión antígeno-anticuerpo es rápida y altamente específica.

En un inmunobiosensor, el tipo de sensado determinará el umbral de detección mientras que la especificidad y sensibilidad de la detección dependerá de los anticuerpos seleccionados y la forma en que estos son inmovilizados. Es por ello que tanto la superficie como el método de inmovilización determinarán la densidad y orientación del anticuerpo retenido y, en consecuencia, la eficiencia de la unión antígeno-anticuerpo y el éxito del sistema de inmunocaptura [3,4].

El objetivo de este trabajo consiste en el diseño de un modelo capaz de reproducir el proceso de inmunocaptura que tendría lugar en un dispositivo de tipo inmunológico (inmunobiosensor), independientemente del tipo de sensado, en su optimización y posterior validación para su aplicación en la detección de agentes reales susceptibles de ser usados en guerra biológica.

Como agente de guerra biológica se eligió la ricina (RCA60). La ricina es una toxina muy potente que se extrae de las semillas de la planta *Ricinus communis* de la familia *Euphorbiaceae*. Esta toxina actúa bloqueando la síntesis proteica, con resultado de muerte celular, lo que conduce al fallo multiorgánico y, finalmente, la muerte entre las 36-72 h posteriores a la exposición [5]. Se considera un arma biológica y un arma química, apareciendo en la lista 1 de las sustancias químicas tóxicas sujetas a control por la Organización para la Prohibición de las Armas Químicas (OPAQ).

2. Desarrollo

2.1. Superficies de inmovilización

Puesto que el nylon (poliamida 6, PA6) es una de las superficies de inmovilización más utilizadas en bioensayos, se propuso utilizarlo como material de inmovilización. Para este estudio se eligió una superficie planar comercial (Zprobe) y una superficie químicamente similar constituida por nanofibras, manufacturada por los autores.

2.1.1. Fabricación de las nanofibras

Se fabricaron nanofibras (NF) ultrafinas de poliamida 6, PA6, 6 % en peso, disueltas en 2:1 de ácido acético y ácido fórmico (Aldrich), mediante electrospinning (Nanospaider™ 500, El Marco). La forma-

ción de las NF tiene lugar cuando la disolución polimérica es sometida a grandes campos electromagnéticos, aplicados entre el electrodo rotatorio, que se encuentra sumergido en la cubeta, y el electrodo conectado a tierra delante del cual se sitúa el substrato colector (figura 1). Las fibras se forman durante el vuelo entre ambos electrodos, al mismo tiempo que sucede la evaporación del disolvente y las elevadas fuerzas a las que se ve sometida la fibra inducen el estiramiento de la misma hasta llegar a diámetros nanométricos [6].

Las fibras ultra-finas de PA6 se recogieron sobre un rectángulo de silicio de 25 mm^2 pulido para evitar la formación de arrugas en la malla obtenida (figura 2). Los parámetros óptimos de fabricación de las NF fueron 65 kV de voltaje aplicado para una distancia entre el electrodo rotatorio y el de tierra de 170 mm a 19±2ºC y 40 ± 5 % de humedad relativa.

La morfología de las NF obtenidas fue estudiada mediante microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM), modelo Zeiss Ultra 55. Las muestras obtenidas presentan una elevada homogeneidad sin que se observen defectos (figura 3A). Se utilizó el programa de análisis de imágenes Image-J para determinar el diámetro promedio de las nanofibras, obteniéndose un diámetro de $\bar{D}$=23±5,8 nm (figura 3.B).

2.2. Modelo de inmunocaptura

En el dispositivo final del inmunobiosensor, los anticuerpos capturarán al antígeno de interés y el sistema de sensado acoplado será capaz de detectarlo directa y simultáneamente. Por lo tanto, para monitorizar el proceso de inmunocaptura de un modo directo, sin añadir ningún paso intermedio que pudiera afectar al resultado final, se marcó, tanto el antígeno como el anticuerpo, con fluorocromos que pudieran ser detectados simultánea e independientemente uno de otro.

Para el estudio de este modelo se utilizó como antígeno un simulante de toxina proteica, la albúmina de suero bovino (BSA) (Sigma-Aldrich). La BSA fue preparada a una concentración de 1 mg/mL en tampón fisiológico fosfato salino pH 7,4 (PBS) marcada con ficoeritrina (RPE) con un kit de conjugación comercial (Biorad). Posteriormente, fue ensayada a distintas concentraciones: 25, 50, 100 y 200 µg/mL en 10 µL (lo que corresponde a 2.5, 5, 10 y 20 ng).

El anticuerpo elegido para nuestro modelo fue un anticuerpo policlonal de oveja anti-BS, marcado con fluoresceína (FITC) (ThermoFisher) para el seguimiento de su inmovilización y cuantificación. Se utilizó diluido en tampón fisiológico fosfato salino pH 7,4 (PBS) a una concentración de 100 µg/mL en 10 µL.

Como métodos de inmovilización y basándonos en ensayos previos de los autores, se eligieron la adsorción pasiva (anticuerpo: 100 ng/µL, 10 µL) tomada como grupo control de referencia, y la inmovilización a través de proteína A/G (100 ng/µL, 10µL).

2.2.1. Parámetros determinados

- Densidad del anticuerpo inmovilizado

Se determinó como el cociente entre la medida de fluorescencia (ʎ excitación=490 nm; ʎ emisión= 521 nm; ʎcutoff=515 nm) asociada al anticuerpo (FITC), tras su incubación y lavado, y la medida de autofluroescencia del sistema antes de la inmovilización del anticuerpo. Para cada método de inmovilización, los datos de las NF se representaron en porcentaje respecto los datos de inmovilización en nylon comercial (Zprobe). Estos se analizaron mediante One Way ANOVA, comparando los datos entre sí mediante un test de comparación múltiple (test de Tukey).

- El porcentaje de BSA inmunocapturada

Se determinó como el cociente entre la medida de fluorescencia (*ʎ excitación=495 nm; ʎ emisión=* 576 nm; ʎcutoff=570 nm) asociada al antígeno (RPE), tras su incubación y lavado, y la auto-fluorescencia del sistema, en términos de porcentaje. Los datos se analizaron mediante Two Way ANOVA, utilizando un post-test Bonferroni para estudiar las diferencias estadísticas entre los grupos.

- Eficiencia del sistema:

Se determinó como el cociente entre la fluorescencia de la ficoeritrina (RPE; ʎ excitación=495 nm; ʎ emisión= 576 nm; ʎcutoff=570 nm) asociada a BSA y la fluorescencia debida a la fluroesceína (FITC; ʎ excitación=490 nm; ʎ emisión= 521 nm; ʎcutoff=515 nm) asociada al anticuerpo, en términos de porcentaje. Los datos se analizaron mediante Two Way ANOVA, utilizando un post-test Bonferroni para estudiar las diferencias estadísticas entre los grupos.

Las medidas de fluorescencia se obtienen mediante un lector de fluorescencia multipocillo (SpectraMax-Gemini XPS, Molecular Devices).

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el *software GraphPad Prism.*

2.3. Validación del modelo de inmunocaptura con agentes reales

Basándonos en los parámetros anteriormente definidos, se eligió el modelo de inmunocaptura más adecuado, según los resultados obtenidos con el simulante.

Como agente de guerra biológica se eligió la ricina (RCA60). RCA60 se marcó con ficoeritrina (RPE) con un kit de conjugación comercial (Biorad).

El modelo de inmunocaptura se validó determinando el porcentaje de inmunocaptura del agente real (RCA60). Este porcentaje se determinó como el cociente entre la medida de fluorescencia asociada al antígeno debido a su marcaje con ficoeritrina (RPE), tras su incubación y lavado, y la auto-fluorescencia del sistema antes de la inmovilización del anticuerpo, en términos de porcentaje.

3. Figuras

1) Primer elemento

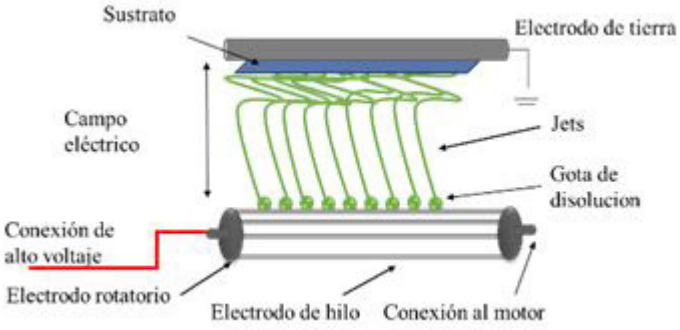


Figura 1. Representación esquemática del proceso de electrospinning denominado needle free electrospinning.

2) Segundo elemento

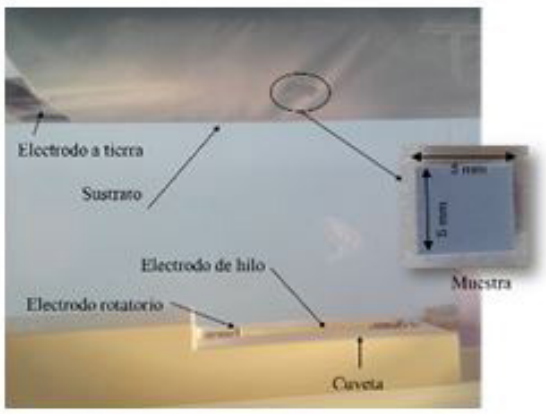


Figura 2. Equipo de electrospinning Nanospaider™ 500 empelado en la preparación de nanofibras ultrafinas de PA6.

3) Tercer elemento

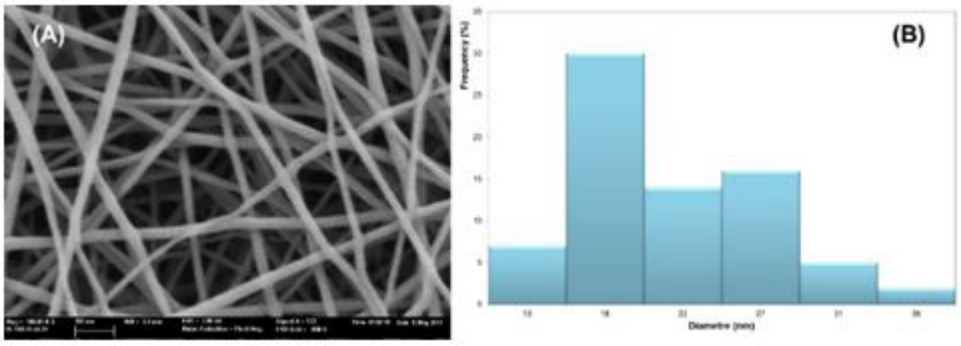


Figura 3. Micrografía FESEM de nanofibras ultrafinas de PA6 ultra-thing depositadas mediante electrospinning (A) and histograma de la distribution de diametros (B) mediante electrospinning (A) and histograma de la distribution de diametros (B).

4) Cuarto elemento

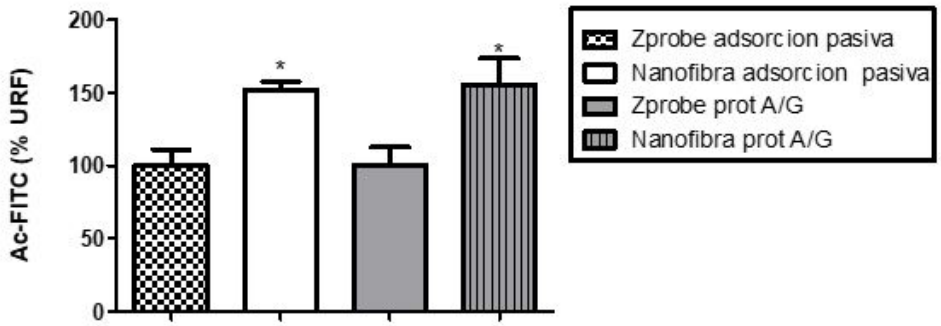


*Figura 4. Porcentaje de anticuerpo anti-BSA marcado con FITC (Ac-FITC). Resultados de nanofibras (NF) en porcentaje respecto Zprobe, en cada uno de los métodos de inmovilización (adsorción pasiva, proteínas A/G). * p< 0,05. Diferencias respecto a su correspondiente método de inmovilización en Zprobe. One Way ANOVA y el postest de comparación múltiple Tukey.*

5) Quinto elemento

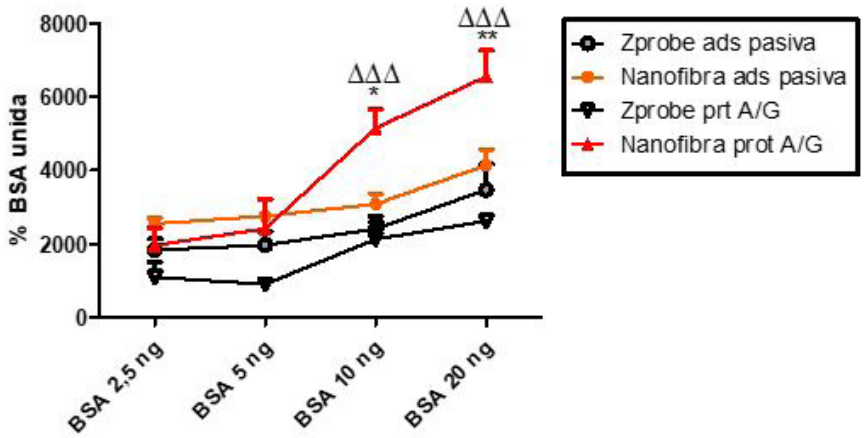


*Figura 5. Valores de BSA inmunocapturada en porcentaje respecto a su control (autofluorescencia con BSA 0 ng). * p< 0,05; ** p < 0,01. Diferencias entre adsorción pasiva y proteína A/G, en ambas superficies de inmovilización. ΔΔΔ p < 0,001 Diferencias entre NF con proteína A/G y Zprobe con proteína A/G. Two Way ANOVA y postest de Bonferroni.*

6) Sexto elemento

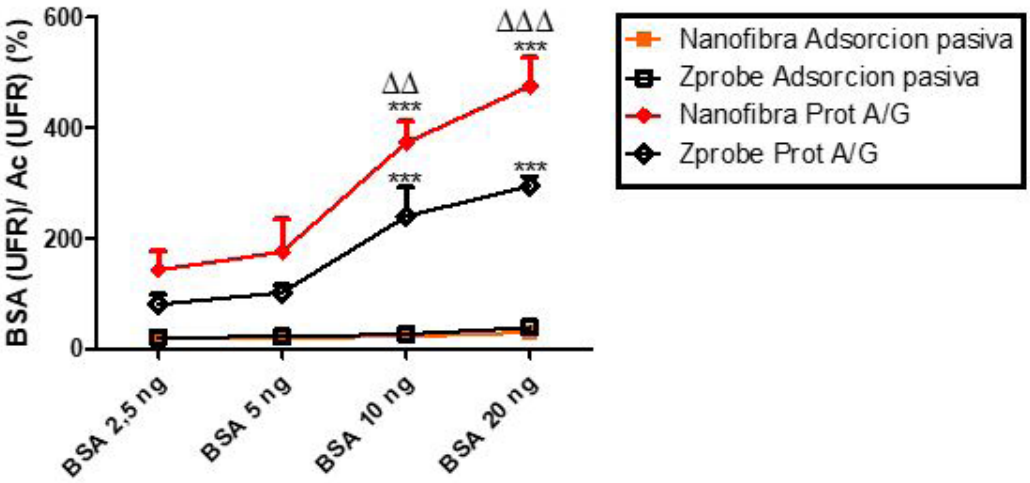


*Figura 6. Eficiencia calculada como el cociente entre la fluorescencia debida a BSA y la fluorescencia debida al anticuerpo en términos de porcentaje. *** p < 0,001. Diferencias entre adsorción pasiva y proteína A/G, en ambas superficies de inmovilización. ΔΔ p < 0,01; ΔΔΔ p < 0,001. Diferencias entre NF y Zprobe, ambos utilizando la proteína A/G como método de inmovilización. Two Way ANOVA y postest de Bonferroni.*

7) Séptimo elemento

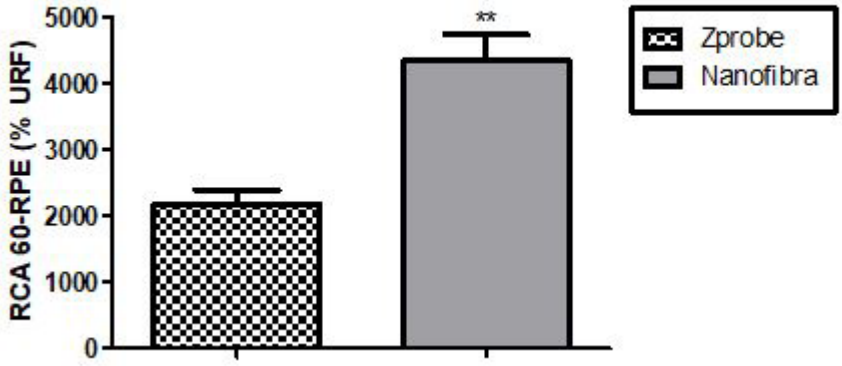


*Figura 7. Valores de fluorescencia ligada a la ricina (RCA60) marcada con ficoeritrina (RPE), en porcentaje respecto a su control (autofluorescencia del sistema). ** p < 0,01. Diferencias entre NF y Zprobe. T-student.*

4. Resultados y discusión

Los métodos de inmovilización del anticuerpo resultaron ser similares en cada una de las superficies ensayadas (NF y Zprobe), mostrando una capacidad de retención del anticuerpo ligeramente mayor en las nanofibras (NF). Para visualizar mejor este incremento, los datos se presentaron en porcentaje respecto a su correspondiente grupo de Zprobe (figura 4).

El sistema fue enfrentado a cantidades crecientes de BSA (de 2,5 a 20 ng), observándose una señal creciente en todos los grupos. Sin embrago, el grupo de las NF en combinación con la proteína A/G mostró

una señal estadísticamente superior a la de las mismas NF con adsorción pasiva y aún mayor respecto a Zprobe en combinación con proteína A/G (figura 5).

Los resultados de la eficiencia de los sistemas ensayados mostraron que la proteína A/G resultaba ser el método de inmovilización más eficaz, en ambas superficies. Estudios previos muestran que la inmovilización mediante proteínas mediadoras, como son la proteína A, la proteína G, o la proteína quimérica A/G, permite una unión orientada del anticuerpo al unirse específicamente a la región constante (Fc) del mismo, de forma que la región variable de unión al antígeno (Fab) queda accesible para la unión antígeno-anticuerpo [7]. La combinación de proteína A/G con las NF resultó ser el modelo de inmunocaptura estadísticamente más eficiente en cuanto a método y superficie de inmovilización utilizados, cuando la cantidad del antígeno capturado era igual o mayor a 10 ng (figura 6). Es un resultado coherente con las características de las NF, que presentan una mayor superficie/volumen, y de la proteína A/G, que orientan eficazmente el anticuerpo inmovilizado. Por tanto, al incrementar la cantidad del antígeno se puede visualizar este doble efecto. Datos previos realizados en nuestro laboratorio confirman estos resultados [8].

Para validar este modelo de inmunocaptura con agentes reales se seleccionó ricina (RCA60), marcada con RPE para monitorizar su captación. Este modelo se llevó a cabo tanto en las NF como en las membranas Zprobe, para poder verificar que las NF seguían siendo el sistema de inmunocaptura más eficaz, y se eligió el punto de 10 ng de RCA60. Los resultados evidenciaron que el modelo propuesto era válido para su aplicación con agentes reales confirmándose una mayor capacidad de captación con las NF que con la superficie planar Zprobe (figura 7).

5. Conclusiones

El modelo de inmunocaptura con el marcaje doble fluorescente de anticuerpo y antígeno permite reproducir el proceso de inmunocaptura que tendría lugar en un dispositivo de detección/identificación de tipo inmunológico (inmunobiosensor).

El cálculo de los parámetros establecidos de densidad de anticuerpo retenido, antígeno inmunocapturado y eficiencia del sistema, permiten comparar diferentes métodos de inmunocaptura, combinando diferentes técnicas y superficies de inmovilización del anticuerpo.

La utilización de proteína A/G sobre NF es el método de inmunocaptura seleccionado, siendo este sistema válido para ser aplicado utilizando agentes de guerra biológica.

Agradecimientos

Becas de formación del INTA, Resolución 3D0/38136/2015 de 21 de septiembre.

Los trabajos recogidos en esta comunicación están incluidos en el proyecto coordinado OPTONANOSENS TEC2015-63838-C3-2-R financiado con fondos MINECO / FEDER.

Referencias

1. *Thavaselvam D, Vijayaraghavan R. Biological warfare agents. J Pharm Bioallied Sci.2010;2(3):179-188.*
2. *Alahi MEE, Chandra Mukhopadhyay SC. Detection Methodologies for Pathogen and Toxins: A Review. Sensors (Basel). 2017, 17(8).*
3. *Koch S, Wolf H, Danapel C, Feller KA. Optical flow-cell multichannel immunobiosensor for the detection of biological warfare agents. Biosens Bioelectron 2000; 14(10-11):779-784.*
4. *Petrakova AV, Urusov AE, Gubaydullina MK, Bartosh AV, Zherdev AV, Dzantiev BB. "External" antibodies as the simplest tool for sensitive immunochromatographic tests. Talanta. 2017; 175:77-81.*
5. *Smith ME, Hayoun MA. Toxicity, Ricin. StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. 2018 - 2017.*

6. *Greiner A, Wendorff JH. Electrospinning: A Fascinating method for the preparation of ultrathin fibres. Nagewandte Chemie. 2007; 46:5670–5703.*
7. *Shen M, JRusling J, Dixit CK. Site-Selective Orientated Immobilization of Antibodies and Conjugates for Immunodiagnostics Development. Methods. 2017; 116: 95–111.*
8. *Peraile I, Lorenzo P, Murillo N, Maudes J, Rozas G, Pérez A, Gónzález-López L, Cabria JC, Gil M. Biofunctionalization of nylon nanofibers to be used in immunobiosensor for biological warfare agents detecting. Global progress in applied microbiology: a multidisciplinary approach. 2018. Accepted.*

Bacillus anthracis: un nuevo método rápido de identificación molecular en muestras ambientales

Bassy Álvarez, Olga[1,*], Jiménez-Mateo, Óscar[2], Ortega-García, María Victoria[1], Granja Albarellos, Carmen[1] y Cabria Ramos, Juan Carlos[1]

1 Lab. Biología Molecular, Área de Defensa Biológica, Dpto. NBQ y Materiales Energéticos, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA-Campus La Marañosa), Crta. M-301 km 10.5, 28330 San Martín de la Vega (Madrid). Correos electrónicos: obassy@isdefe.es (O. Bassy); ortegagmv@inta.es (M.V. Ortega-García); granjaac@inta.es (C. Granja); cabriarjc@inta.es (J.C. Cabria).

2 Dirección General de Armamento y Material (DGAM), c/ Arturo Soria n.º 289, 28033 Madrid. Correo electrónico: ojimmat@oc.mde.es (O. Jiménez-Mateo).

* Autor principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: obassy@isdefe.es

Resumen

Bacillus anthracis, agente causal del ántrax o carbunco, ha sido empleado en numerosas ocasiones como arma biológica. Es por ello que los laboratorios de biodefensa deben disponer de métodos rápidos y sensibles de identificación de esta bacteria. En este trabajo presentamos el desarrollo de un ensayo de PCR en tiempo real para la identificación molecular de *Bacillus anthracis*, basado en la amplificación de una región cromosómica específica de esta especie, la secuencia E4, con sondas de hibridación. El ensayo se evaluó utilizando un panel de diez cepas de *B. anthracis*, dos aislados clínicos humanos de *B. anthracis*, 12 hisopos ambientales de *B. anthracis* y 40 cepas de otras especies bacterianas. Tanto las diez cepas de *B. anthracis* como los dos aislados clínicos se detectaron correctamente, y el método no mostró reactividad cruzada con otros microorganismos. Del mismo modo, la secuencia E4 no se detectó en cinco cepas de *B. thuringiensis* y *B. cereus* estrechamente relacionadas (homología > 90 %) con *B. anthracis* por análisis informático. Por otro lado, este ensayo molecular mostró una alta sensibilidad analítica, 3,5 equivalentes de genoma completo por reacción con un 95 % de probabilidad. Además, el ensayo de PCR en tiempo real permitió la detección específica de secuencia del fragmento amplificado (un único pico con una temperatura de fusión de 63,5°C ± 0,5°C) sin necesidad de emplear procedimientos post-amplificación, lo que ofrece una ventaja adicional sobre otros ensayos de qPCR desarrollados para la detección de *B. anthracis*. Finalmente, el funcionamiento del método se evaluó con éxito en 12 muestras ambientales. Este trabajo ha sido publicado recientemente (Bassy, O., Jiménez-Mateo, O., Ortega M.V., Granja, C. and Cabria, J.C. Rapid Identification of *Bacillus anthracis* by Real-Time PCR with Dual Hybridization Probes in Environmental Swabs. Molecular and Cellular Probes, 2018; 37:22–27. doi: 10.1016/j.mcp.2017.11.001).

Palabras clave

Bacillus anthracis, identificación molecular, marcador cromosómico, PCR en tiempo real, sondas de hibridación.

1. Introducción

Bacillus anthracis es una bacteria Gram positiva formadora de endosporas que causa ántrax en humanos y animales [1]. Debido a su virulencia y fácil diseminación de las esporas, esta bacteria puede usarse como un agente de guerra biológica, como ya sucedió en los Estados Unidos en el año 2001 [2, 3]. Por lo tanto, se requieren métodos altamente sensibles y específicos para la identificación rápida de esta bacteria.

El método de qPCR recomendado por la Organización Mundial de la Salud para la identificación de *B. anthracis*, el ensayo SASP [4], ha demostrado recientemente una baja sensibilidad y especificidad diagnóstica en un ensayo inter laboratorio [5]. Los ensayos más específicos y sensibles para la detección molecular de *B. anthracis* se basan en la amplificación de tres secuencias cromosómicas llamadas BA5345 [6], PL3 [7] y BA5357 [8], más varios genes de virulencia localizados en los plásmidos pX01 y pX02 [9]. Los tres *loci* cromosómicos están ubicados en una región del profago lambda conocida como lambdaBa03 [10, 11], la cual tiene una elevada inestabilidad genética. Sin embargo, hasta la fecha no ha sido posible identificar ningún marcador cromosómico específico para *B. anthracis* fuera de las regiones del profago.

En este estudio presentamos el desarrollo de un ensayo rápido, específico y sensible de PCR en tiempo real para la identificación de *B. anthracis*, basado en la amplificación de un marcador cromosómico único, la secuencia E4 [12] y su posterior detección en tiempo real con sondas de hibridación.

2. Desarrollo

2.1. Cepas bacterianas y extracción de ADN

El ensayo se evaluó usando un panel de diez cepas de referencia de *B. anthracis* más dos muestras clínicas humanas de *B. anthracis*. Para el análisis de especificidad, se analizaron 40 cepas en total (diez cepas del grupo *B. cereus*, 15 cepas del grupo no *B. cereus* y 15 cepas de otros géneros) (datos no mostrados, se mostrarán en la ponencia).

Además, los excedentes de ADN de 12 muestras recibidas en el año 2010 procedentes del X Ejercicio SIBCRA (*Sampling and Identification of Biological, Chemical and Radiological Agents*) de la OTAN se volvieron a analizar para probar el funcionamiento del método en muestras ambientales. Las muestras eran hisopos de algodón, empleados para muestrear superficies en un ambiente interior, e impregnados con esporas (irradiadas con rayos gamma) de la cepa Sterne de *B. anthracis* tratadas con diferentes reactivos de descontaminación. Los hisopos se sumergieron en 600 µl de PBS y se incubaron con agitación durante 30 minutos. Posteriormente, el ADN se extrajo de 50 µl de esa solución utilizando el kit QIAamp DNA mini (Qiagen), y tras la finalización del ejercicio se almacenó a -20ºC.

2.2. PCR en tiempo real con sondas de hibridación duales

Dwyer *et al.* [12] desarrollaron dos cebadores para la amplificación de un fragmento de 235 pb de la secuencia E4. En el Área de Defensa Biológica se diseñaron además dos sondas de hibridación

con el *software* LightCycler Probe Design (Roche Diagnostics), permitiendo así una detección rápida y específica de secuencia a través del canal 640 nm del equipo LightCycler 2.0. Las secuencias nucleotídicas de los cebadores y las sondas de hibridación se indican en la tabla 1. Las mezclas de amplificación contenían 2 µl de la mezcla LightCycler FastStart DNA Master Hybridization Probes 10X (Roche Diagnostics), 3 mM de $MgCl_2$ (concentración final), 0,5 µM de cada oligonucleótido (Eurogentec), 0,25 µM de cada sonda de hibridación (TIB Molbiol) y 5 µl de ADN molde en un volumen final de 20 µl. Tras una desnaturalización inicial a 95°C durante 10 min, el programa de amplificación de 45 ciclos consistió en 95°C 15 s, 60°C 15 s y 72°C 15 s. A continuación, se realizó una curva de *melting* con una velocidad de calentamiento de 0,2°C/s. Los datos se analizaron con el *software* LightCycler versión 4.1 (Roche Diagnostics). En cada ensayo de qPCR se incluyó un control negativo (NTC) y un control positivo (ADN de la cepa Hankow Hide, 2 pg). Con los hisopos ambientales que dieron un resultado negativo se usaron también controles internos (5 µl de la muestra negativa mezclada con 2 µg del control positivo en un tubo separado) para confirmar dichos resultados.

2.3. Linealidad y sensibilidad analítica del ensayo qPCR

La linealidad del ensayo se determinó con diluciones seriadas 1/10 del ADN genómico de la cepa Hankow Hide de *B. anthracis*, desde $3{,}5x10^{5}$ hasta $3{,}5x10^{-1}$ equivalentes de genoma completo por reacción. Por otra parte, se analizaron las tres últimas diluciones del ADN (20 réplicas de cada una) para determinar la concentración más baja de ADN que se podía detectar con un 95 % de probabilidad. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con Excel (Microsoft Corporation). El punto de corte del ensayo se determinó como el mayor valor de Cq obtenido en el límite de detección.

2.4. Análisis de especificidad

La especificidad de la qPCR se evaluó analizando el ADN genómico de 12 cepas diana y 40 cepas no diana. Se usaron dos cantidades diferentes de ADN: $3x10^{3}$ equivalentes de genoma completo por reacción para las cepas diana, y $3x10^{4}$ equivalentes de genoma completo por reacción para las cepas no diana. Se asignó un resultado negativo cuando no se produjo amplificación o el valor de Cq fue mayor que el punto de corte del ensayo.

2.5. Secuenciación del ADN y análisis de la secuencia

El producto de PCR de 235 pb de la cepa Hankow Hide de *B. anthracis* se secuenció por el método clásico en un analizador genético ABI310 (Life Technologies Ltd) usando el kit BigDye Terminator versión 1.1 (Life Technologies Ltd). Las secuencias de ADN obtenidas se ensamblaron, editaron y analizaron utilizando el *software* Lasergene SeqMan Pro versión 11.1 (DNAStar).

La presencia de la secuencia E4 en otras bacterias (incluidas las cepas de *B. thuringiensis* y *B. cereus* con una homología superior al 90 % con la cepa Vollum de *B. anthracis*) se investigó utilizando el algoritmo BLASTn para buscar en la base de datos *nucleotide collection* de la página web del *National Centre for Biotechnology Information* (NCBI).

2.6. Evaluación del método con muestras ambientales

Los extractos de ADN sobrantes (almacenados a -20ºC) del X Ejercicio SIBCRA de la OTAN del año 2010 se emplearon para evaluar el funcionamiento del método en muestras ambientales. Cada muestra negativa se analizó de la siguiente manera: 5 ml de muestra negativa (tubo 1), 5 ml de muestra negativa mezclada con 2 pg del control positivo (tubo 2, control interno exógeno) y 2 pg de control positivo (tubo) 3). Si se observa una reducción de 3,4 o más ciclos en el valor de Cq del tubo 2 en comparación con el valor de Cq del tubo 3, se confirma la presencia de inhibidores de PCR en esa muestra.

3. Listas, figuras y tablas

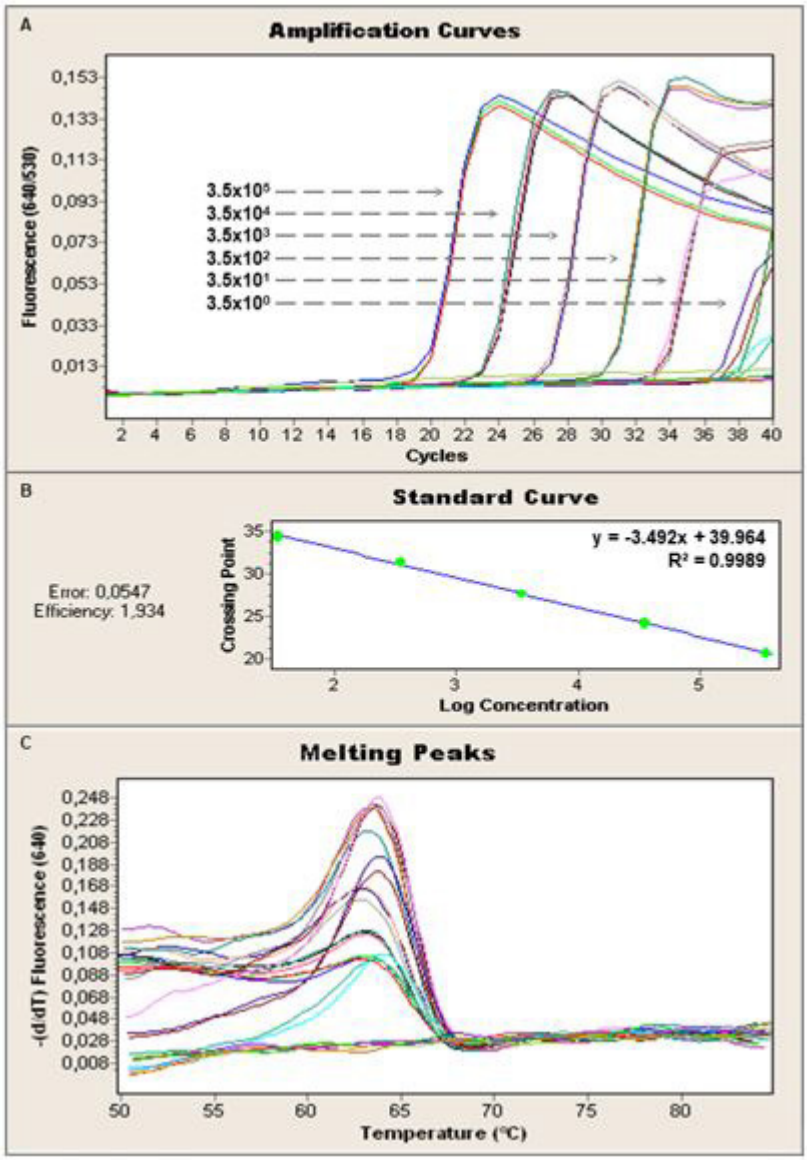


Figura 1. Linealidad y sensibilidad analítica de la PCR en tiempo real para la detección de la secuencia E4, determinada con diluciones seriadas del ADN de la cepa Hankow Hide de B. anthracis. A: curvas de amplificación (las cantidades de ADN, en equivalentes de genoma completo, determinadas por un ensayo PicoGreen, se encuentran indicadas cerca de la correspondiente curva de amplificación). B: curva estándar (R2 coeficiente de determinación). C: picos de melting a 640 nm, los cuales permiten la detección específica de secuencia del amplicón.

Tabla 1. Oligonucleótidos y sondas empleados para la detección de la secuencia E4

Nombre	Secuencia nucleotídica (5' ® 3')[a]	Posición[b]	Referencia
E4F	AGCAAAAGCTAACTGCTCGGG	460713-460733	Dwyer *et al.* (2004)
E4R	TCTACCCCTTCAGGATTAGCG	460927-460947	Dwyer *et al.* (2004)
BA-E4F	AGGAAGAGAATGAGTAAAGTAATTGAAGGAC-FL	460799-460829	Este estudio
BA-E4R	LCRed640-GAAGTTTATGTAAGCACAAGTGGTGG-Ph	460832-460857	Este estudio

[a]FL: Fluoresceína; LCRed640: LightCycler-Red 640-N-hydroxy-succinimide ester; Ph: 3'- fosfato.
[b]La secuencia de la cepa Ames de *Bacillus anthracis* (número de acceso en GeneBank AE016879) se ha utilizado como referencia para la determinar la posición nucleotídica de los oligonucleótidos y las sondas.

Tabla 2. Cepas de *Bacillus anthracis* analizadas en este estudio y resultado de la PCR en tiempo real

Cepas de *B. anthracis*	**Número de colección**	**Resultado qPCR**	
		Cq	**Tm**
Hankow Hide	NCTC 2620	21,6	63,1
Sterne	NCTC 8234	20,4	63,1
St Marys	NCTC 5444	20,6	63,1
Paddintong VI	NCTC 109	21,2	63,0
Fildes	NCTC 1328	19,2	63,1
282	NCTC 7752	23,3	63,1
1501	NCTC 7753	20,2	63,1
Vollum	NCTC 10340	26,6	63,6
Unica	ITM 004	26,7	63,5
Antrax 6	ITM 008	27,1	63,6
Aislado clínico	ISCIII 319/02	26,6	63,5
Aislado clínico	ISCIII 342/02	25,3	63,3

NCTC: National Collection of Type Cultures (Reino Unido); ISCIII: Instituto de Salud Carlos III (España); ITM: Instituto Tecnológico La Marañosa (España).

Tabla 3. Ausencia de la secuencia E4 en varias cepas de *B. cereus* y *B. thuringiensis* muy próximas a *B. anthracis*

Especie bacteriana	Serovariedad	Cepa[a]	Número de acceso	% Homología[b]	Secuencia E4[c]
Bacillus thuringiensis	*pondicheriensis*	BGSC 4BA1	NZ_CM000755	95	No presente
	monterrey	BGSC 4AJ1	NZ_CM000752	94	No presente
	andalousiensis	BGSC 4AW1	NZ_CM000754	93	No presente
	konkukian	97-27	NC_005957	92	No presente
Bacillus cereus		BGSC 6E1	NZ_CM000716	91	No presente

[a]BGSC: Bacillus Genetics Stock Center.

[b]Porcentaje de homología con la cepa Vollum de *Bacillus anthracis*, según Ågren *et al.* [5].

[c]Búsqueda mediante BLASTn en la base de datos «nucleotide collection».

Tabla 4. Re-evaluación de los extractos de ADN (almacenados a -20ºC) de las muestras del X Ejercicio SIBCRA

Muestra	**Preparación de la muestra[a]**	**Resultado de la qPCR[b]**			**Resultado final**
		Tubo 1	**Tubo 2**	**Tubo 3**	
SIBCRA1	Hisopo de esporas (sin reactivo de descontaminación)	25,9	NA	NA	Positivo
SIBCRA2	Hisopo de esporas tratadas con detergente Conflikt	25,3	NA	NA	Positivo
SIBCRA3	Hisopo de esporas tratadas con detergente LopHen	Neg	33,3	29,9	**Falso negativo**
SIBCRA4	Esporas secas molidas	24,9	NA	NA	Positivo
SIBCRA5	Hisopo de esporas tratadas con etanol al 70%	26,3	NA	NA	Positivo

Muestra	Preparación de la muestra[a]	Resultado de la qPCR[b]			Resultado final
		Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	
SIBCRA6	Hisopo de esporas tratadas con esporicida Sporgon	29,4	NA	NA	Positivo
SIBCRA7	Hisopo de esporas tratadas con jabón de manos Bacdown	25,0	NA	NA	Positivo
SIBCRA8	Blanco (sin esporas ni reactivo de descontaminación)	Neg	29,2	29,9	Negativo
SIBCRA9	Hisopo de esporas tratadas con detergente CiDecon	27,3	NA	NA	Positivo
SIBCRA10	Hisopo de esporas tratadas con lejía al 10%	25,5	NA	NA	Positivo
SIBCRA11	Hisopo de esporas tratadas con detergente Bacdown	26,5	NA	NA	Positivo
SIBCRA12	Blanco (sin esporas ni reactivo de descontaminación)	Neg	31,2	29,9	Negativo

[a]Hoja de respuestas del X Ejercicio SIBCRA de la OTAN.

[b]Tubo 1: 5 ml de muestra negativa; Tubo 2: 5 ml de muestra negativa mezclada con 2 pg de control positivo (control interno exógeno); Tubo 3: 2 pg de control positivo. NA: no analizado. Neg: negativo.

4. Resultados y discusión

El rango lineal del ensayo de qPCR abarca las 6 primeras diluciones, desde 2 ng hasta 200 fg de ADN, con una buena correlación entre el valor de Cq y la cantidad de ADN (figura 1A y 1B). La eficiencia de la PCR fue del 93,4 %, y el límite de detección del ensayo (con un 95 % de probabilidad) se estableció en 3,5 equivalentes de genoma (20 fg); esta sensibilidad analítica es más alta que la de otros ensayos con sondas TaqMan desarrollados para la detección de *B. anthracis* [6, 8]. El punto de corte del ensayo se fijó en el ciclo 38. El análisis de la curva de *melting* a 640 nm produjo un único pico con una temperatura de fusión (Tm) de 63,5ºC ± 0,5ºC (figura 1C). Estos resultados confirman que este ensayo de PCR en tiempo real permite la rápida detección específica de secuencia del amplicón sin necesidad de emplear tediosos procedimientos post-amplificación. Diversos autores han desarrollado ensayos similares para otros agentes de guerra biológica como *Yersinia pestis, Francisella tularensis* subsp. *tularensis* y *Burkholderia pseudomallei* [13-15].

Las 12 cepas de *B. anthracis* analizadas en este estudio se identificaron correctamente con las sondas de hibridación desarrolladas. El valor de Cq y la Tm de los picos de *melting* se muestran en la tabla 2. Cada muestra de ADN produjo un amplicón con una Tm de 63,5ºC ± 0,5ºC. La electroforesis en gel de agarosa mostró un producto de PCR de la longitud esperada y la ausencia de otros amplicones inespecíficos; este resultado se confirmó por secuenciación de los respectivos productos de amplificación (datos no mostrados). Aunque los aislados clínicos ISCIII 319/02 y 342/02 produjeron valores de Cq más altos, ambos pudieron detectarse. Por otro lado, ninguna de las 40 cepas de otras especies bacterianas mostró un resultado positivo, lo que indica que el método no tiene reactividad cruzada con otros microorganismos. Estas 40 cepas fueron detectadas por amplificación de un fragmento del ADNr 23S (datos no mostrados).

La secuencia E4 se encuentra en una región del profago llamada lambdaBa01 [12], dentro del *locus tag* BA_0454 (de acuerdo con la nomenclatura de la cepa Ames de *B. anthracis*, número de acceso en GeneBank AE016879). Sin embargo, el análisis mediante BLASTn de la base de datos *nucleotide collection* con esta secuencia de 235 pb no mostró ninguna homología con otras bacterias a excepción de varios genomas completos de *B. anthracis* (datos no mostrados). Del mismo modo, el análisis mediante BLASTn de los genomas completos de cuatro cepas patógenas de *B. thuringiensis* (BGSC 4BA1, BGSC 4AJ1, BGSC 4AW1 y 97-27) no mostró ninguna identidad con las secuencias de los cebadores o las

sondas aquí descritos; el mismo resultado se obtuvo con otra cepa de *B. cereus* muy relacionada con *B. anthracis*, la cepa BGSC 6E1 (tabla 3). Estos resultados sugieren que la secuencia E4 es específica de *B. anthracis*, aunque será necesario confirmarlo experimentalmente. Aunque la secuencia E4 se descubrió mediante hibridación sustractiva supresiva, ninguna de estas cepas se empleó en el estudio original, excepto la cepa 97-27 de *B. thuringiensis* [12]. La misma técnica se utilizó para identificar otro marcador cromosómico específico de *B. anthracis* conocido como BA5345 [6].

Desde un punto de vista de la biodefensa, son fundamentales ensayos moleculares que permitan la identificación rápida, específica y sensible de *B. anthracis* en muestras ambientales para poder iniciar cuanto antes acciones adecuadas de primera respuesta. El presente ensayo de PCR en tiempo real constituye una herramienta muy valiosa en el caso de un ataque bioterrorista. De hecho, el método se ha empleado con éxito para la reevaluación de muestras ambientales de un ejercicio inter comparativo de la OTAN (tabla 4). El objetivo del ejercicio fue evaluar los métodos de laboratorio en presencia de varias soluciones descontaminantes en hisopos ambientales. El organizador envió 12 muestras ciegas. Once de las doce muestras fueron identificadas correctamente. El uso de un control interno exógeno permitió la detección de un resultado falso negativo en la muestra SIBCRA3; esta muestra se trató con un desinfectante fenólico de pH bajo, el cual fue purificado junto con el ADN. Las sustancias fenólicas son fuertes inhibidores de la PCR. El mismo resultado falso negativo fue obtenido durante el ejercicio inter comparativo por otros laboratorios [16]. Si se hubiera utilizado este tipo de control interno durante el ejercicio, la extracción de ADN se habría repetido con fenol/cloroformo para confirmar que esta muestra era realmente positiva.

5. Conclusiones

En este trabajo presentamos el desarrollo de un ensayo específico de PCR en tiempo real para la rápida identificación de *B. anthracis*, basado en la amplificación de un marcador cromosómico único de esta bacteria, la secuencia E4, con sondas de hibridación. El límite de detección del método es de 3,5 equivalentes de genoma por reacción con un 95 % de probabilidad. El ensayo proporciona además una rápida detección específica de secuencia, ya que produce un único pico de *melting* con una Tm de 63,5ºC ± 0,5ºC en todas las cepas de *Bacillus anthracis* analizadas. Ninguna de las 40 cepas de otras especies bacterianas analizadas, tanto relacionadas como no relacionadas, produjo un resultado positivo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Defensa. La mención de productos comerciales no supone una recomendación de uso.

Referencias

1. *Irenge LM, Gala JL. Rapid detection methods for Bacillus anthracis in environmental samples: a review. Appl Microbiol Biotechnol. 2012;93:1411–1422.*
2. *Jernigan JA, Stephens DS, Ashford DA, et al. Bioterrorism-related inhalational anthrax: the first 10 cases reported in the United States. Emerg Infect Dis. 2001;7:933-944.*
3. *Hoffmaster AR, Fitzgerald CC, Ribot E, Mayer LW, Popovic T. Molecular subtyping of Bacillus anthracis and the 2001 bioterrorism-associated anthrax outbreak, United States. Emerg Infect Dis. 2002;8:1111-1116.*
4. *Turnbull PC (ed). Anthrax in humans and animals, 4th edn. Switzerland: WHO Press; 2008.*
5. *Ågren J, Hamidjaja RA, Hansen T, et al. In silico and in vitro evaluation of PCR-based assays for the detection of Bacillus anthracis chromosomal signature sequences. Virulence. 2013;4:671-685.*
6. *Antwerpen MH, Zimmermann P, Bewley K, Frangoulidis D, Meyer H. Real-time PCR system targeting a chromosomal marker specific for Bacillus anthracis. Mol Cel Probes. 2008;22:313-315.*

7. *Wielinga PR, Hamidjaja RA, Ågren J, et al. A multiplex real-time PCR for identifying and differentiating B. anthracis virulent types. Int J Food Microbiol. 2011;145:137-144.*
8. *Létant SE, Murphy GA, Alfaro TM, et al. Rapid-viability PCR method for detection of live, virulent Bacillus anthracis in environmental samples. Appl Environ Microbiol. 2011;77:6570–6578.*
9. *Ramisse V, Patra G, Garrigue H, Guesdon JL, Mock M. Identification and characterization of Bacillus anthracis by multiplex PCR analysis of sequences on plasmids pXO1 and pXO2 and chromosomal DNA. FEMS Microbiol Lett. 1996;145:9-16.*
10. *Read TD, Peterson SN, Tourasse N, et al. The genome sequence of Bacillus anthracis Ames and comparison to closely related bacteria. Nature. 2003; 423: 81-86.*
11. *Sozhamannan S, Chute MD, McAfee FD, et al. The Bacillus anthracis chromosome contains four conserved, excision-proficient, putative prophages. BMC Microbiol. 2006;6:34-44.*
12. *Dwyer KG, Lamonica JM, Schumacher JA, et al. Identification of Bacillus anthracis specific chromosomal sequences by suppressive subtractive hybridization. BMC Genomics. 2004;5:15-25.*
13. *Tomaso H, Reisinger EC, Al Dahouk S, et al. Rapid detection of Yersinia pestis with multiplex real-time PCR assays using fluorescent hybridisation probes. FEMS Immunol Med Mic. 2003;38:117–126.*
14. *Tomaso H, Scholz HC, Neubauer H, et al. Real-time PCR using hybridization probes for the rapid and specific identification of Francisella tularensis subspecie tularensis. Mol Cel Probes. 2007;21:12-16.*
15. *Tomaso H, Pitt TL, Landt O, et al. Rapid presumptive identification of Burkholderia pseudo-mallei with real-time PCR assays using fluorescent hybridization probes. Mol Cel Probes. 2005;19:9-20.*
16. *Pisa L, Krupka R, Formankova V, et al. Inter-laboratory comparative tests of biological laboratories of the NATO armies. Mil Med Sci Lett. 2011;80:159-168.*

Metodología de cálculo de la huella hídrica gris (GWF) en una unidad del Ejército del Aire

González García, Mariano[2], Fernández-López, Carmen[1]* y Vicente Martínez, Yesica[1]

[1] Centro Universitario de la Defensa (CUD), Academia General del Aire de San Javier (AGA) C/ Coronel Lopez Peña, s/n, 30720, San Javier, Murcia - SPAIN.

[2] Universidad Católica de Murcia. (UCAM), Av. de los Jerónimos, 135, 30107 Guadalupe, Murcia.

* Fernández-López, Carmen; correo electrónico: carmen.fernandez@cud.upct.es

Resumen

Algunos contaminantes, que principalmente alcanzan los ecosistemas a través de las descargas de los vertidos de aguas residuales, son persistentes en el ciclo del agua pudiendo entrar en la cadena alimentaria a través de la cadena trófica.

Las unidades del Ejército del Aire realizan controles periódicos de los parámetros físico-químicos y microbiológicos del agua de vertido al sistema integral de saneamiento, según la normativa de referencia.

La huella hídrica gris (GWF), relacionada con la calidad del agua y su posible contaminación debido a los vertidos, puede evaluar la contaminación de ciertos contaminantes en términos del volumen de consumo de agua dulce, de dos maneras posibles. Por un lado, una vez se evalúa la GWF, este valor se puede usar para analizar la sostenibilidad de los problemas de contaminación. Por ejemplo, cuando los flujos en las aguas receptoras superan la GWF, los cuerpos de agua pueden soportar las cargas de contaminación que reciben [1]. Pero, cuando los flujos son más bajos que la GWF, la contaminación no puede admitirse y la GWF debe reducirse [2]. Por otro lado, como los valores de GWF cuantifican los volúmenes de agua dulce que son necesarios para reducir los contaminantes de un efluente a ciertos niveles, estos podrían mostrar el orden de magnitud del volumen con el que sería necesario mezclar este efluente para poder reutilizarlo en otras actividades económicas.

Este trabajo aborda este problema, desarrollando la metodología para el cálculo del componente gris de la huella hídrica (GWFm) en una unidad militar, para cinco de los metales pesados más comunes (Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Niquel (Ni) y Zinc (Zn)) e hidrocarburos. Además, también se tiene en cuenta la GWF para los principales contaminantes convencionales (GWFc) (nitrógeno total, cloruros y materia orgánica).

Palabras clave

Huella hídrica gris, GWF, hidrocarburos, unidad militar, metales pesados.

1. Introducción

El Consejo del Atlántico Norte (NAC) aprobó el documento del Marco de Defensa Verde de la OTAN y validó el compromiso de las naciones para trabajar en la mejora del perfil «verde» creando indicadores para preservar el medio ambiente.

La huella hídrica (WF) se puede considerar como uno de estos indicadores. El concepto de WF es consistente y respalda las metas y los objetivos tal como se describen al más alto nivel de orientación política y militar dentro de la OTAN. Sería de interés para la OTAN y las naciones llevar a cabo tales iniciativas en un momento de bajos recursos y restricciones financieras.

En España, la política medioambiental del Ministerio de Defensa, está basada en el concepto de desarrollo sostenible, y deberá ser compatible con la misión de las Fuerzas Armadas. También tendrá que estar dirigida a alcanzar los objetivos e intenciones de la legislación vigente, en la conservación, protección y, cuando sea posible, en la recuperación de las condiciones ambientales.

1.1. El concepto de la huella hídrica

El concepto de huella hídrica (WF) se dio a conocer en 2002 por Arjen Hoekstra [1] del Instituto de Educación del Agua de la UNESCO. A día de hoy se define como: «el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir bienes y servicios de un individuo, de una comunidad o de una empresa».

La huella hídrica se mide en el volumen de agua consumida, evaporada o contaminada, ya sea en unidad de tiempo o en unidad de masa. Además, es un indicador del uso de agua, uso tanto directo como indirecto.

En relación con la toma de datos, este concepto clasifica las fuentes de agua en:

- Agua gris: es el volumen de agua contaminada asociada a la producción de bienes y servicios.
- Agua verde: es el volumen de agua evaporada.
- Agua azul: es el volumen de agua dulce consumida de los recursos hídricos (aguas superficiales y subterráneas).

El indicador de la huella hídrica puede ser de utilidad para llevar a cabo acciones de mejora en la gestión del agua. La Organización Internacional de Estandarización (ISO, International Organization for Standardization) está trabajando en una norma en relación con la huella hídrica, ISO 14046.

1.2. La huella hídrica gris

Como hemos comentado en el apartado 1.1, la definición de la GWF se aplica a las descargas en cuerpos de agua, tales como descargas directas de aguas residuales o descargas de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) en corrientes naturales [3]. También se aplica para determinar la GWF generada por el barrido de contaminantes por superficie escorrentía o por infiltración en acuíferos, como en el caso del exceso de fertilizante aplicado a los cultivos [4]. Por lo tanto, si el retorno de un uso de agua

se reutiliza en otra actividad económica, prevenir que los contaminantes lleguen a los cuerpos de agua (o reducir considerablemente la carga de contaminantes), no generaría una GWF.

Desde el Centro Universitario de Defensa (CUD) en la Academia General del Aire se está desarrollando la metodología para el cálculo de la «huella hídrica», que consiste en el cálculo y reporte de los consumos de agua y vertidos asociados. Además, se analizarán los riesgos y oportunidades relacionados con el agua, conociendo así la huella hídrica en una unidad del Ejercito del Aire.

2. Desarrollo

La formulación estándar para el cálculo de la huella hídrica gris de un proceso (Eq. (1)) definida por Hoekstra [1], está diseñada para el vertido puntual de un único contaminante sobre una masa de agua.

$$GWF = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \quad (1)$$

Donde, GWF es la huella hídrica gris calculada, C_{max} es la concentración máxima permitida en la masa de agua para dicho contaminante, y C_{nat} es la concentración natural de dicho contaminante en la masa de agua, si no hubiera sido alterada por la actividad humana.

Para calcular la huella hídrica teniendo en cuenta diferentes contaminantes, la metodología propuesta se basa en la fórmula (Eq. (2)) desarrollada por Martínez-Alcalá [5].

$$GWF_j = \max_k \left\{ \frac{Q_j Ceff_{j.k}}{(C_{max\,k} - C_{nat\,k})} \right\} \quad (2)$$

$$GWF_j = 0 \quad \forall k: Cmax_k \leq Cnat_k$$

Donde, GWF es la huella hídrica gris del proceso de contaminación, Q_j es el caudal del efluente, $Ceff_{j.k}$ es la concentraciones de k contaminantes considerados en el efluente j, $Cmax_k$ es la concentración máxima permitida en el agua de entrada de cada contaminante k, $Cnat_k$ es la concentración natural de los mismos contaminantes k en el agua de entrada, que debe ser cero en el caso de compuestos no naturales.

Los valores de las concentraciones máximas permitidas en aguas superficiales y subterráneas de cada uno de los contaminantes a estudiar se describen en la tabla 1.

Para las masas de agua superficiales las mediciones de las concentraciones de DQO, DBO5, nitratos y fosfatos son cercanos a cero excepto en momentos puntuales [6], por lo que se establecerán valores nulos para las concentraciones naturales de estos contaminantes. La presencia de cloruros en las aguas naturales se atribuye a la disolución de depósitos naturales de sal gema, contaminación proveniente de diversos efluentes de la actividad industrial, aguas excedentarias de riegos agrícolas y sobre todo de las minas de sales potásicas. La red de medidas de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) [7], indica que existe una pequeña concentración natural (cnat) de estos contaminantes.

Así como, que existe una pequeña concentración natural (cnat) de nitratos [8], en la mayoría de acuíferos en estas zonas cuya media es de 3 mg/l, siendo este el empleado para el cálculo [9].

3. Listas, figuras y tablas

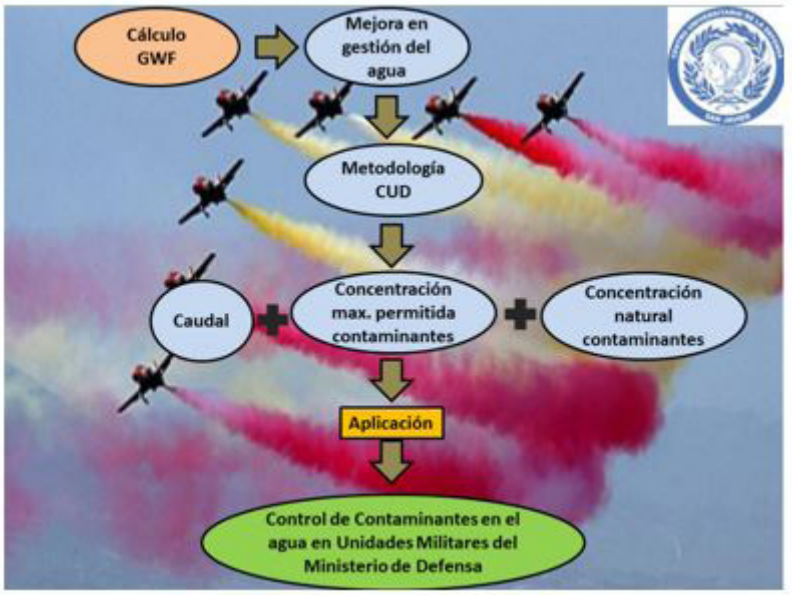


Figura 1. Diagrama de la metodología del cálculo de la GWF.

Concentraciones máximas permitidas		
Contaminante (k)	**Masas superficiales**	**Masas subterráneas**
Oxígeno disuelto	>5 mg/L	No contemplado (NC)
Tasa de saturación de Oxígeno (TS)	60 % < TS < 120 %	NC
pH	6 < pH < 9	NC
DBO_5	< 6 mg/L O_2	NC
Nitrato	< 25 mg/L NO_3	< 50 mg/L
Amonio	< 1 mg/L NH_4	NC
Fósforo total	< 0,4 mg/L PO_4	NC
Plaguicidas	NC	60 % < TS< 120 %
Arsénico	NC	< 10 mg/L
Fluoruro	NC	1,5 mg/L

Tabla 1. Concentraciones máximas permitidas [10]

4. Resultados y discusión

Dada la novedad de este indicador, existen aún muy pocas aplicaciones prácticas que se centran en unidades militares. La difusión del cálculo de la GWF en la Academia General del Aire de San Javier puede ser de mucha utilidad para contribuir en las iniciativas medioambientales del Ministerio de Defensa y con esta publicación se contribuye en la eficiencia en el empleo de los recursos hídricos en las distintas unidades militares.

Estos cálculos se realizarán teniendo en cuenta las características particulares de cada unidad militar. En el caso particular de la Academia General del Aire de San Javier, estos resultados proporcionan una idea o un orden de magnitud de lo que significa el aporte del agua que vierte a la EDAR de San Javier, ya que la aportación a la EDAR de mayor o menor cantidad de contaminantes influye en los procesos de depuración llevados a cabo por dicha EDAR.

5. Conclusiones

El comportamiento de la huella hídrica gris es un parámetro que posibilita el cálculo de un indicador medioambiental en una unidad del ejercito del aire. Y sirve para cuantificar los volúmenes de agua dulce necesarios para reducir los contaminantes de un efluente a ciertos niveles, estos podrían mostrar el orden de magnitud del volumen con el que sería necesario mezclar este efluente para poder reutilizarlo en otras actividades económicas.

Este parámetro permite la evaluación de todos los contaminantes, considerando la variabilidad espacio-temporal de la contaminación [11].

Por último, permite establecer escenarios futuros, en los que analizar cómo se comportará el valor de la huella hídrica en otras unidades militares.

Agradecimientos

Los autores les gustaría agradecer a la Academia General del Aire de San Javier por la participación y aporte de la documentación necesaria para realizar este estudio de la huella hídrica en su unidad.

Referencias

1. *Hoekstra AY, Chapagain, AK, Aldaya MM & MM Mekonnen. The Water Footprint*
2. *Assessment Manual: Setting the Global Standard. Earthscan, London, 2011.*
3. *Pellicer-Martínez F & JM Martínez-Paz. Contrast and Transferability of parameters of lumped water balance models in the Segura River Basin (Spain). Water and environment journal. 2014. doi:10.1111/wej.12091.*
4. *Morera, S., Corominas, L.I., Poch, M., Aldaya, M.M., Comas, J. Water footprint assessment in wastewater treatment plants. J. Clean. Prod. 2016. 112, 4741-4748.*
5. *Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water. Environ. Sci. Technol. 2015. 49 (21), 12860-12868.*
6. *Martínez-Alcalá, I, Guillén-Navarro, J.M., Fernández-López, C. Pharmaceutical biological degradation, sorption and mass balance determination in a conventional activated-sludge wastewater treatment plant from Murcia, Spain. Chem. Eng. J. 2107. 95: 811–816.*
7. *CHS. Plan de Cuenca de la Demarcación del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2013.*
8. *CHS. Web de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). 2013. Disponible en http://www.chsegura.es/chs/cuenca/redesdecontrol/calidadenaguassuperficiales/ (accedido en junio de 2018).*
9. *CHS. Web de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). 2013. Disponible https://www.chsegura.es/chs/cuenca/redesdecontrol/calidadenaguassubterraneas/ (accedido en junio de 2018).*
10. *Gu B, Ge Y, Chang SX, Luo W & J Chang. Nitrate in groundwater of China: Sources and driving forces. Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions, 2013b 23(5): 1112-1121.*
11. *BOE. 2008. Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Boletín Oficial del Estado. N.º 71. pp. 12820-12821.*
12. *Wang L, Wu X. Careful considerations when reporting and evaluating the grey water footprint of products. Ecological Indicators, 2014. 41: 131-132.*

Dotación de antidotos NBQ y Fuerzas Armadas españolas

Rodríguez Fernández, María José[1,*]; Pérez Cortés, Francisco Javier[2]; Azorín Abraham, Juan de Dios[3]; Somalo Duque, Sergio[4]; Juberías Sánchez, Antonio[5]; Blasco Barbero, Alejandro[6] y De La Calle Lamenca, Guillermo[7]

1 Capitán Farmacéutico, CEMILFARDEF, mrodfe4@et.mde.es (MJRF).
2 Capitán Farmacéutico, CEMILFARDEF, fperco2@oc.mde.es (FJPC).
3 Capitán Farmacéutico, CEMILFARDEF, jazoabr@et.mde.es (JAA).
4 Capitán Farmacéutico, CEMILFARDEF, ssomduq@mde.es (SSD).
5 Coronel Farmacéutico, CEMILFARDEF, ajubsan@oc.mde.es (AJS).
6 Teniente Farmacéutico, CEMILFARDEF; ablaba1@mde.es (ABB).
7 Teniente Farmacéutico, CEMILFARDEF; gdellam@mde.es (GCL).
* Autor principal y responsable del trabajo; mrodfe4@et.mde.es (MJRF).

Resumen

La incorporación de nuevas moléculas y formas farmacéuticas utilizadas como antídotos ante agresiones NRBQ satisface posibles vacíos terapéuticos existentes en la dotación de las Fuerzas Armadas (FAS).

El desarrollo, producción e incorporación al arsenal terapéutico de las Fuerzas Armadas de los siguientes antídotos, fabricados en el Centro Militar de Farmacia de la Defensa, mejora las herramientas disponibles para hacer frente a este tipo de agresiones:

- Hidroxocobalamina inyectable: agente frente intoxicación por cianuros.
- DTPA-Ca inyectable: agente quelante de especies radiactivas.
- Autoinyectable de diazepam: anticonvulsivante de uso inmediato y personal por el combatiente.

Por otro lado, la investigación y desarrollo de estos antídotos mejora la cobertura frente a agresiones NRBQ. En este campo se encuentran en fase de desarrollo los siguientes proyectos:

- Formas orales de administración de azul de Prusia como decorporante de Cesio 137 radiactivo.
- Autoinyectable de tres componentes (anticonvulsivante, oxima y atropina) para uso inmediato del combatiente ante exposición a gases nerviosos.
- Inhalador de DTPA-Ca polvo: agente quelante de especies radiactivas para uso inmediato ante sospecha de exposición.

Se describen las características de los diferentes antídotos relacionados anteriormente y su proceso de desarrollo.

Todas estas preparaciones se producen y desarrollan en el Centro Militar de Farmacia de la Defensa.

Palabras clave

Antídotos, investigación, desarrollo y fabricación.

1. Introducción

La disponibilidad de antídotos frente a agresiones NRBQ resulta de vital interés para las Fuerzas Armadas, constituyendo una parte fundamental de la protección sanitaria a la fuerza.

Este interés se hace también patente entre las autoridades civiles para minimizar los riesgos derivados de incidentes o ataques en los que sean utilizados agentes NRBQ. En este sentido, el Real Decreto 1054/2015, de 20 de noviembre, por el que se aprueba el «Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Radiológico» determina que «el Centro Militar de Farmacia de la Defensa facilitará al Ministerio del Interior las sustancias para la profilaxis radiológica, de acuerdo al convenio establecido al efecto»[1]. Por el mismo motivo, la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios estableció en 2016 un Convenio Marco de colaboración con el Ministerio de Defensa para asegurar la disponibilidad de determinados medicamentos en situaciones particulares relacionadas con emergencias, catástrofes y cooperación internacional, haciendo especial alusión a los antídotos NRBQ [2].

La mayoría de productos utilizados como antídotos carecen de interés comercial para la industria farmacéutica, por lo que la disponibilidad en el mercado puede ser reducida. El Centro Militar de Farmacia de la Defensa tiene como misión la producción, distribución, almacenamiento y custodia de estos antídotos. Estas capacidades son mejoradas mediante la investigación y desarrollo de nuevas moléculas o nuevas formas farmacéuticas, que actualizan el arsenal terapéutico disponible.

Se describen los nuevos antídotos incorporados al Petitorio de Farmacia Militar [3], y otros que se encuentran en fase de proyecto dentro del ámbito NRBQ.

2. Desarrollo

2.1. Nuevos antídotos incorporados para tratamiento terapéutico de bajas NRBQ

2.1.1. HIDROXOCOBALAMINA DEF INYECTABLE

2.1.1.1. Descripción de la molécula

La hidroxocobalamina es una forma activa hidroxilada de la vitamina B12, término genérico de varios compuestos llamados cobalaminas. La única diferencia entre cianocobalamina (vitamina B12) e hidroxocobalamina (referida como vitamina B12a) es el reemplazo del grupo cianuro (CN) con un grupo hidroxilo (OH) en el sitio activo en este último (figura 1).

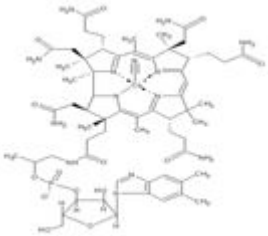


Figura 1. Estructura hidroxocobalamina.

2.1.1.2. *Aspectos toxicológicos que justifican el antídoto:*

La HIDROXOCOBALAMINA DEF INYECTABLE se basa en la combinación de la hidroxocobalamina con el cianuro circulante para formar cianocobalamina (vitamina B12), un compuesto de coordinación o quelato estable y no tóxico que se excreta por la orina [4].

Antídoto específico en el tratamiento de la intoxicación por cianuros. A diferencia de otros antídotos (nitrito sódico), la hidroxocobalamina está indicada cuando la intoxicación es concomitante con la de monóxido de carbono (inhalación de humo de incendios en locales cerrados) ya que el nitrito sódico puede reducir la capacidad de transporte de oxígeno de la víctima [5].

El envenenamiento por cianuros requiere un tratamiento inmediato y agresivo, su baja toxicidad permite su empleo seguro en casos de supuesta y no confirmada intoxicación por cianuros.

2.1.1.3. *Características del elaborado y justificación de la presentación*

1 vial de 100 mililitros con 2,5 gramos de cloruro de hidroxocobalamina, administración inyectable [5] (figura 2).

Figura 2.
Hidroxocobalamina DEF.

Dosis inicial: adultos: 5 gramos (2 viales), debe administrarse por vía intravenosa (perfusión) a dosis muy altas, si se comparan con las habituales cuando la acción es como vitamina B12 (5 gramos frente a 1 miligramo).

Medicamento sin interés comercial.

2.1.2. AUTOINYECTABLE DE DIAZEPAM DEF

2.1.2.1. *Descripción de la molécula*

Pertenece a la familia de las benzodiacepinas, ejerce una acción anticonvulsivante generalizada que se aprecia frente agentes neurotóxicos [6] (figura 3).

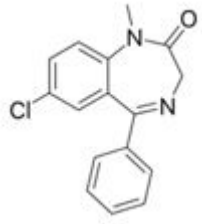


Figura 3. Estructura diazepam.

2.1.2.2. *Aspectos toxicológicos que justifican el antídoto*

Las crisis convulsivas y posterior daño neuronal inducido por los agentes neurotóxicos son debido a la inhibición de la enzima acetilcolinesterasa sináptica, aumentando los niveles de acetilcolina con la

consiguiente hiperestimulación colinérgica. El diazepam ejerce una acción miorrelajante y anticonvulsivante, debido a la fijación del ácido gammaminobutírico (GABA) a receptores específicos actuando como neurotransmisor inhibitorio.

2.1.2.3. *Características del elaborado y justificación de la presentación*

Autoinyectable de diazepam 10 miligramos, administración intramuscular (figura 4).

Figura 4. Autoinyectable diazepam.

Dosis inicial: adulto: 1 autoinyectable hasta que remitan los efectos convulsivos.

Se presenta como un dispositivo de autoinyección que es a su vez autoenvase para la única dosis que contiene. Cada autoinyectable contiene en su interior una jeringa o cartucho prellenado con 2 mililitros de solución inyectable, conteniendo 10 miligramos de diazepam [7].

2.1.3. DTPA-Ca DEF inyectable

2.1.3.1. *Descripción de la molécula*

El DTPA-Ca (dietilenetriaminepentaacetato sal trisódica cálcica) interacciona con plutonio, americio y curio, y en general con los transuránidos, los lantánidos, así como varios metales de transición: manganeso, hierro, cobalto, zirconio, rutenio e itrio [4] (figura 5).

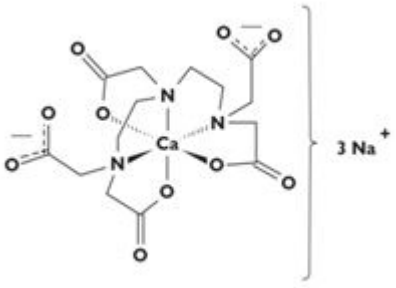


Figura 5. Estructura DTPA Ca.

2.1.3.2. *Aspectos toxicológicos que justifican el antídoto*

Es un agente de decorporación radiactiva presente en accidentes nucleares, atentados terroristas o dispositivos de dispersión radiológica como las «bombas sucias».

El DTPA-Ca forma quelatos estables con estos elementos radioactivos mediante intercambio del calcio por el metal radiactivo que tiene mayor capacidad de unión. Los quelatos radiactivos son luego eliminados por filtración glomerular en la orina.

2.1.3.3. *Características del elaborado y justificación de la presentación*

Ampolla de 4 mililitros conteniendo 1 gramo de DTPA-Ca, mediante perfusión intravenosa [8] (figura 6).

Figura 6. DTPA-Ca inyectable.

Dosis inicial: adulto: 1 gramo antes de las 24 horas, la duración del tratamiento está determinado por el nivel de contaminación interna y por la respuesta individual a la terapia.

La decorporación radiactiva es más efectiva si se inicia en las primeras 24 horas de la intoxicación, para evitar la acumulación de los transuránidos en el interior de los huesos. Debe iniciarse tan pronto como sea posible después de sospechar o conocer la contaminación interna [9].

2.1.4. Otros antídotos y terapias de apoyo incorporados en el Petitorio de Farmacia Militar:

2.1.4.1. APOMORFINA DEF: ampolla con 10 miligramos en 2 mililitros, como emético central.

2.1.4.2. NITRITO SÓDICO DEF: ampolla con 300 miligramos en 10 mililitros, contra cianuros.

2.1.4.3. TIOSULFATO SÓDICO DEF: vial con 12,5 gramos en 50 mililitros, contra cianuros.

2.1.4.4. PIRODISTIGMINA DEF: comprimido de 30 miligramos, pretratramiento frente neurotóxicos.

2.1.4.5. PRALIDOXIMA DEF: ampolla con 600 miligramos en 5 mililitros, reactivador de acetilcolinesterasa.

2.1.4.6. DIMERCAPROL DEF: ampolla con 100 miligramos en 2 mililitros, contra agentes vesicantes.

2.1.4.7. SULFATO DE ATROPINA DEF: ampolla 2 miligramos en 1 mililitro, frente a agentes nerviosos.

2.1.4.8. AUTOINYECTABLE DE ATROPINA DEF: con 2 miligramos, frente a agentes neurotóxicos.

2.1.4.9. AUTOINYECTABLE DE MORFINA DEF: con 10 miligramos, terapia de apoyo al dolor intenso.

2.1.4.10. AZUL DE METILENO DEF: ampolla con 100 miligramos en 10 mililitros, contra cianuros.

2.1.4.11. PERMANGANATO POTÁSICO 2 % DEF: vial 50 mililitros, para lavado gástrico.

2.1.4.12. YODURO POTÁSICO DEF: cápsulas de 130 miligramos y solución oral de 65 miligramos/mililitro, como agente bloqueante de glándula tiroides frente al yodo radiactivo.

2.1.4.13 DOXICICLINA DEF: cápsulas de 100 miligramos, tratamiento frente agentes biológicos.

2.1.4.14 CIPROFLOXACINO DEF: comprimidos de 500 miligramos, tratamiento frente agentes biológicos.

2.1.4.15 AZITROMICINA DEF: comprimidos de 500 miligramos, tratamiento frente agentes biológicos.

2.2. Proyectos para la mejora de medidas terapéuticas ante bajas NRBQ

2.2.1. Formas orales de administración de AZUL DE PRUSIA

2.2.1.1. *Descripción de la molécula*

Azul de Prusia insoluble $(FeIII)_4[FeII(CN)_6]^{3-}$. n H20, se configura como una estructura reticular que puede actuar como microtamiz, reteniendo en su interior iones de determinado radio iónico, presenta especial afinidad por cationes de alto radio iónico como Cesio 137 (Cs^{137}) (figura 7).

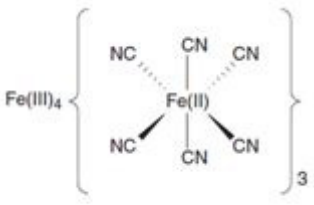


Figura 7. Estructura de azul de Prusia.

2.2.1.2. *Aspectos toxicológicos que justifican el antídoto*

El Cs^{137} es una especie radiactiva que se genera en accidentes o agresiones nucleares (bombas sucias), se fija en los tejidos blandos, (especialmente músculo esquelético), es fuente de radiación beta y gama y presenta una semivida de 30,2 años. El uso de una sustancia que facilite la eliminación resulta de vital interés. La acción decorporante del azul de Prusia se basa en la formación de un compuesto insoluble con Cs^{137} en el tracto digestivo, que facilita su eliminación a través de las heces; el producto actúa impidiendo la absorción del Cs ingerido y del Cs eliminado por vía biliar, procedente de la circulación general. Esta técnica de eliminación es conocida como diálisis intestinal [10].

2.2.1.3. *Características del elaborado y justificación de la presentación*

Cápsulas de azul de Prusia [11] (figura 8).

Figura 8. Azul de Prusia forma oral.

Actualmente no se dispone de antídoto específico frente al Cesio-137.

2.2.2. AUTOINYECTABLE DE TRES COMPONENTES: atropina, oxima y benzodiacepina

2.2.2.1. *Descripción de la molécula:*

El autoinyectable multicomponente se encuentra en desarrollo valorando la estabilidad de los distintos componentes: sulfato de atropina, obidoxima o pralidoxima y diazepam o midazolam.

Combina la inhibición competitiva de la acetilcolina por la atropina, el restablecimiento de la actividad de la enzima mediante la oxima, y la acción anticonvulsivante por la benzodiacepina [7].

2.2.2.2. Aspectos toxicológicos que justifican el antídoto

La intoxicación aguda o la exposición crónica a agentes neurotóxicos de guerra produce una hiperestimulación colinérgica, muscarínica y nicotínica, dando lugar a la conocida miosis, rinorrea, hipersalivación y convulsiones. Por ello, la administración conjunta de los tres componentes en una única autoinyección resulta de gran interés.

2.2.2.3. *Características del elaborado y justificación de la presentación*

Autoinyectable multicomponente, administración intramuscular. La rapidez de la administración es determinante para la eficacia del tratamiento (figura 9).

Figura 9. A. Multicomponente.

Dosis inicial: adulto, un único autoinyectable tras la exposición.

2.2.3. DTPA-CA polvo con aplicador para inhalación

2.2.3.1. *Descripción de la molécula*

El DTPA-Ca (dietilenetriaminepentaacetato sal trisódica cálcica) interacciona con plutonio, americio y curio, y en general para todos los transuránidos, los lantánidos, así como varios metales de transición.

2.2.3.2. *Aspectos toxicológicos que justifican el antídoto*

La inhalación de polvo radiactivo tras una detonación o accidente nuclear, es una importante vía de acceso de los elementos radiactivos al organismo. La aplicación de un agente quelante, sobre la superficie del aparato respiratorio, que forme complejos fácilmente eliminables, se configura como un tratamiento de urgencia y de gran interés.

2.2.3.3. *Características del elaborado y justificación de la presentación*

Polvo micronizado incorporado a un inhalador que permita su distribución por el árbol bronquial y la superficie alveolar.

La facilidad de uso del inhalador de polvo permite una rápida auto aplicación del antídoto y su empleo ante situaciones sospechosas, debido a la reducida toxicidad del producto activo.

Se buscará un grado de pulverización con tamaño reducido de partícula que permita su acceso al entorno alveolar. La micronización del polvo debe ser compatible con un reducido grado de cohesión de las partículas que permita la liberación del polvo y la inhalación efectiva del mismo.

3. Resultados y discusión

Los elaborados de nueva incorporación permiten contrarrestar ciertos vacíos terapéuticos en el tratamiento de bajas NRBQ o mejoran algunos aspectos de este tratamiento.

HIDROXOCOBALAMINA DEF como antídoto de elección frente a la intoxicación por cianuros y monóxido de carbono por inhalación de humos en incendios en espacios cerrados; presenta una superior relación beneficio-riesgo en comparación con el resto de antídotos contra cianuros que se dispone. Por ello, se ha considerado una elección de interés incorporarlo al arsenal terapéutico de las Fuerzas Armadas.

AUTOINYECTABLE DE DIAZEPAM DEF como terapia anticonvulsivante en la intoxicación por compuestos organosfosforados, agentes neurotóxicos o «gases nerviosos». Además, se ha mejorado el dispositivo diseñado para la autoadministración por vía parenteral (intramuscular) y de forma automática de la solución inyectable que contiene, tras desprecintar y activar su mecanismo de disparo.

DTPA-Ca DEF inyectable está indicado en el tratamiento de la intoxicación por elementos radiactivos como plutonio, americio, y curio, incrementando su eliminación. El tratamiento debe aplicarse en las primeras 24 horas tras la intoxicación para evitar la acumulación de estos elementos radiactivos en la médula ósea. No disponible un preparado similar en mercado.

Los proyectos relacionados con el desarrollo de nuevos antídotos o formas de aplicación, suponen una mejora en el tratamiento de bajas NRBQ.

El desarrollo de DTPA-Ca POLVO MICRONIZADO con aplicación para inhalación, permite una respuesta precoz ante posibles exposiciones a elementos radiactivos, lo que reducirá la gravedad de la exposición como el número de bajas resultantes de la misma.

El dispositivo AUTOINYECTABLE CON TRES COMPONENTES (atropina, oxima y benzodiacepina) específicos para el tratamiento frente a intoxicaciones por agentes neurotóxicos, facilita el tratamiento precoz del combatiente, mejorando las probabilidades de recuperación y su autonomía.

La incorporación de una FORMA DE ADMINISTRACIÓN ORAL DE AZUL DE PRUSIA, incrementa la capacidad de tratamiento de las bajas producidas en ambiente nuclear. Elaborado compatible y complementario con el uso de DTPA-Ca.

4. Conclusiones

Las Fuerzas Armadas y Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado requieren disponer de una serie de contramedidas terapéuticas como respuesta sanitaria a las amenazas actuales NRBQ.

El Centro Militar de Farmacia de la Defensa, integrado en el Sistema de Seguridad y Defensa Nacional, diseña, fabrica, almacena y distribuye antídotos NRBQ, contemplados en el Petitorio de Farmacia Militar [3]. Estos productos son sometidos a procesos de actualización, consecuencia de las actividades de investigación, desarrollo e innovación.

La inclusión de nuevas moléculas que mejoren anteriores terapias, como hidroxocobalamina, o que cubran vacíos terapéuticos, como DTPA-Ca o azul de Prusia, o la combinación de sustancias activas que mejoren la respuesta toxicológica, suponen importantes avances en el tratamiento de posibles bajas.

El empleo de sistemas de aplicación como el autoinyectable o dispositivos para la inhalación de polvo micronizado, permite una autoaplicación inmediata del producto, incrementando las posibilidades de éxito de la terapia.

Referencias

1. *Real Decreto 1054/2015, de 20 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Radiológico. 31.*
2. *Convenio Marco de colaboración entre el Ministerio de Defensa y la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios.*

3. *Orden Ministerial 8/2014, de 30 de enero, por la que se establece el Petitorio de farmacia del Ministerio de Defensa.*
4. *Nelson L, Goldfrank LR, editores. Goldfrank's toxicologic emergencies. 9th ed. New York: McGraw-Hill Medical; 2011. 1940 p.*
5. *Sánchez Ramos JJ. Estabilidad de la hidroxocobalamina en agua para inyección como antídoto contra cianuros: Elaborado de Farmacia Militar. Sanidad Militar [Internet], junio de 2012 [citado 24 de julio de 2018];68(2):87-96.*
6. *Beledo JF, Simón JAA, Martínez ÁM. Farmacología humana. Elsevier España; 2013. 3.098 p.*
7. *Sánchez Ramos JJ. Estudio y caracterización del Autoinyectable de atropina-oxima DEF: diseño de nuevos autoinyectables para defensa NBQ y otros medicamentos de urgencia. Sanidad Militar [Internet]. marzo de 2014 [citado 10 de mayo de 2018];70(1):7-19.*
8. *AMedP-7.1 EDA RD1 V1 E.pdf.*
9. *Brayfield A. Martindale: The Complete Drug Reference. Pharmaceutical Press; 2017. 4.792 p.*
10. *Nielsen P, Dresow B, Fischer R, Heinrich HC. Inhibition of intestinal absorption and decorporation of radiocaesium in humans by hexacyanoferrates(II). International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part B Nuclear Medicine and Biology [Internet]. 1 de enero de 1991 [citado 24 de julio de 2018];18(7):821-6.*
11. *Bates N. IPCS EVALUATION OF ANTIDOTES. 83.*

Tecnología de narices electrónicas para la detección a distancia de sustancias peligrosas en el ámbito NRBQ

José Miguel Sánchez[1,*], José Luis Herrero[2], Jesús Lozano[3]

[1] Grupo TEDAX-NRBQ de Policía Nacional de Badajoz. Av. Santiago Ramón y Cajal, s/n, 06001 Badajoz.

[2,3] Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Extremadura. Av. Elvas s/n. 06006 Badajoz.

* Correo electrónico: josespain1980@hotmail.com (JMS).

Resumen

En los últimos años se ha incrementado notablemente las amenazas a las que se enfrentan los cuerpos de seguridad. Con objeto de garantizar la seguridad de agentes y ciudadanos, es necesario contar con dispositivos que permitan detectar posibles peligros antes de realizar una actuación en un entorno desconocido. En la actualidad los dispositivos existentes carecen de una alta capacidad de identificación, tienen un alto coste y no permiten la realización de medidas a distancia y en tiempo real. Los sistemas olfativos artificiales tratan de imitar el sentido biológico del olfato y son una alternativa a los sistemas tradicionales de detección de compuestos volátiles pero con un coste y tamaño menor, más rápidos en la detección y con posibilidad de ser manejados a distancia. En este artículo se presentan varios prototipos desarrollados en la Universidad de Extremadura en colaboración con el Grupo TEDAX-NRBQ de Badajoz junto con unas medidas de diferentes compuestos responsables de amenazas químicas y vapores de explosivos. Los resultados presentados son prometedores y abren la puerta a una línea de investigación en la detección de sustancias peligrosas.

Palabras clave

Sensores de gases, reconocimiento de patrones, compuestos volátiles.

1. Introducción

La protección de los ciudadanos, las instituciones, las infraestructuras y los bienes es uno de los cuatro pilares de la Estrategia de Lucha contra el Terrorismo de la UE. Al enfrentarse a las amenazas NRBQ-E (nuclear, radiológico, biológico, químico y explosivos), el enfoque de la UE debe tener en cuenta también la Estrategia de Seguridad Interior, cuyos objetivos clave son, entre otros, la detección y la reducción de los riesgos NRBQ-E[1].

La evolución reciente, puesta de relieve por los informes del INTCEN (Centro de Análisis de Inteligencia de la UE) e Interpol, ofrece buenos motivos para pensar que la amenaza derivada de los materiales NRBQ y los explosivos se mantiene alta y está cambiando [1], como demuestra la larga e imparable lista de algunos de los atentados terroristas que han asolado el territorio europeo y extracomunitario en los últimos años. Estos hechos, así como el llamamiento reciente a los yihadistas para atacar en lugares muy concurridos[2] ponen de manifiesto hasta qué punto los agresores pueden innovar y ser oportunistas.

Aunque los terroristas han tendido a utilizar explosivos comerciales o de fabricación casera, determinados agentes químicos como el sarín, el gas mostaza, el cloro,… o biológicos como la ricina y el ántrax, también representan una grave amenaza. La fácil obtención de distintos tipos de agentes químicos les hace ser buenos candidatos para su empleo en atentados terroristas.

El análisis de las deficiencias en la detección de explosivos en la UE de 2012, realizado como parte del Plan de Acción de explosivos, destaca numerosas carencias en la detección de explosivos, a pesar de los avances tecnológicos, e identifica la necesidad urgente de reforzar la capacidad de detección de la UE. El informe, basado en una revisión de las medidas de seguridad, los equipos y los procesos que utilizan tecnologías avanzadas, insta a una nueva revisión y hace hincapié en la necesidad de reforzar las medidas en los diferentes ámbitos de la seguridad pública. Sobre la base de este análisis de las deficiencias, la Comisión también puso en marcha en 2013 el análisis de las deficiencias en la detección de amenazas NRBQ.

El desembolso realizado en tecnologías de detección/identificación de agentes NRBQ y explosivos ha sido millonario, si bien los equipos que ofrecen mejores resultados, se basan en tecnologías muy caras, son muy pesados, o presentan un alto coste de mantenimiento, etc. Esto supone un gran inconveniente a la hora de poder dotar a las unidades garantes de la seguridad, entre los que se encuentran las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad de Estado, recurriéndose por tanto a equipos más baratos y por ende menos eficaces.

Se abre un campo muy amplio en la búsqueda de nuevas tecnologías de detección que se traduzcan a nivel de campo en equipos con alta velocidad de respuesta, sensibilidad, escaso tamaño, bajo coste, baja

1 Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, sobre un nuevo enfoque de la UE en materia de detección y reducción de los riesgos NRBQ-E/*-COM/2014/0247 final*/.

2 La 12.ª edición (primavera de 2014) de la revista en línea *Inspire* de Al-Qaeda en la Península Arábiga aconseja a los yihadistas atacar en lugares concurridos como acontecimientos deportivos, lugares de afluencia turística, actos electorales y festivales, y utilizar dispositivos explosivos improvisados adosados a vehículos.

frecuencia de falsas alarmas, etc., para mejorar la respuesta a estos ataques NRBQ-E, en las que el precio no represente un escollo para garantizar la seguridad. La tecnología de narices electrónicas cumple estas expectativas y en este trabajo se han dado los primeros pasos para generar dispositivos que permitan la detección a distancia de las sustancias objetivo.

2. Narices electrónicas

Las narices electrónicas deben su nombre a que intenta reproducir el comportamiento y las funciones de la nariz humana, aun siendo un sistema mucho más elemental e imperfecto [2, 3]. Aunque el sistema olfativo biológico y el artificial son muy diferentes en constitución, sin embargo, guardan un paralelismo en cada una de sus etapas de funcionamiento como puede observarse en la figura 1. El primer paso en ambos sistemas es la interacción entre los aromas o compuestos volátiles (normalmente una mezcla compleja de gases con los receptores apropiados: receptores olfativos en el caso de la nariz humana y array de sensores de gases[3] en el caso de la nariz electrónica). Un receptor es sensible a varios aromas y un aroma es detectado por varios receptores en ambos casos. El siguiente paso es el almacenamiento de la señal generada por los receptores (etapa de aprendizaje) en el cerebro o en la base de datos de un sistema de reconocimiento de patrones (implementado en un ordenador o similar) y después la identificación de uno de los olores o aromas almacenados (etapa de clasificación).

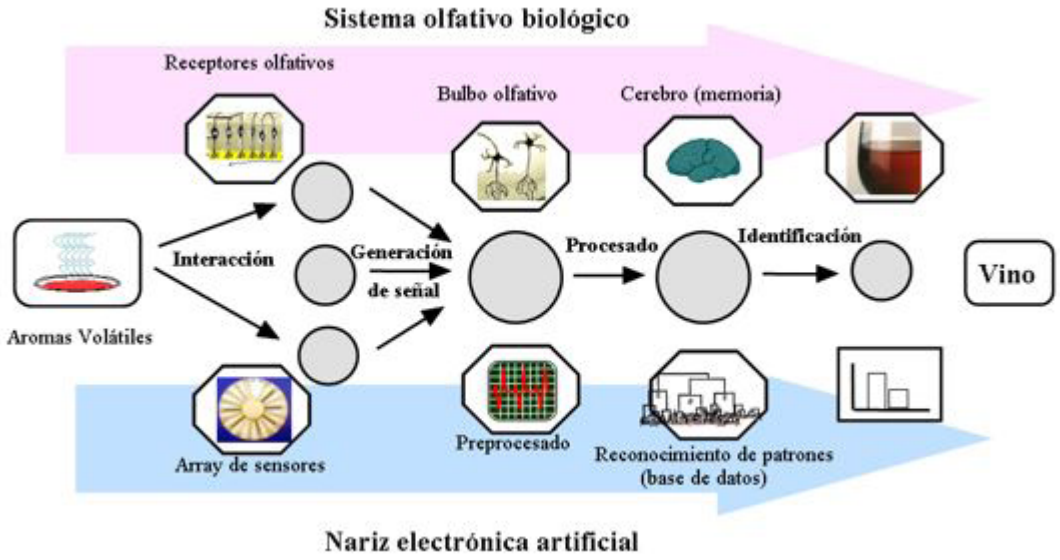


Figura 1. Paralelismo entre el sistema olfativo biológico y el artificial.

Las narices electrónicas son muy útiles como herramientas de control de calidad, particularmente en alimentación y perfumería [4, 5], pues se les puede «enseñar» a reconocer el producto válido y a rechazar aquel cuyo perfil de olor no concuerda con el estándar de referencia. Otras aplicaciones se han encontrado en medicina [6], reconociendo olores que son característicos de ciertos procesos de enfermedades particulares, para control de procesos industriales en los que se pueden medir los volátiles producidos en tiempo real, lo que permite introducir bucles de realimentación en el control y aplicaciones en el control del medio ambiente [7].

En el sistema olfativo artificial, el aroma se introduce dentro de un sistema de detección (cámara con un array de sensores) y las señales medidas de los sensores son procesadas por un programa estadístico en un ordenador. Después de una etapa de aprendizaje, el sistema sería capaz de reconocer diversos olores o compuestos y llegar a clasificarlos en diferentes categorías.

3 Sensores de gas son dispositivos electrónicos cuya función es dar lugar a una magnitud física (conductancia, resistencia, tensión eléctrica...) que refleja la exposición de los sensores a un gas, mezcla de ellos o muestra olorosa.

3. Prototipos desarrollados

A continuación, se describen de forma breve los prototipos de sistemas olfativos artificiales desarrollados para la detección de agentes peligrosos. Estos dispositivos se han probado con diferentes compuestos con objeto de comprobar su capacidad de discriminación.

3.1 Nariz electrónica portátil inalámbrica (WINOSE3)

Se trata de un dispositivo de medida inalámbrico diseñada entre el CSIC y la Universidad de Extremadura [8]. Está provisto de una pantalla táctil, bomba de muestreo y cuatro sensores de gas junto con uno de temperatura ambiente. Las medidas realizadas pueden ser transmitidas por *WiFi* a un ordenador personal que, a través de un *software*, recoge, pre-procesa y almacena los datos.

a. Robot olfateador

Se trata de una nariz electrónica diseñada para su utilización con un robot móvil para la búsqueda de sustancias peligrosas. El sistema consta de seis sensores de gases y un ventilador para el arrastre de los volátiles, junto con la electrónica adecuada para la realización de las medidas. Se muestra una imagen del prototipo en la figura 2. Ante la presencia de un gas detectable, se incrementa la conductividad del sensor a razón del incremento de la concentración de dicho gas.

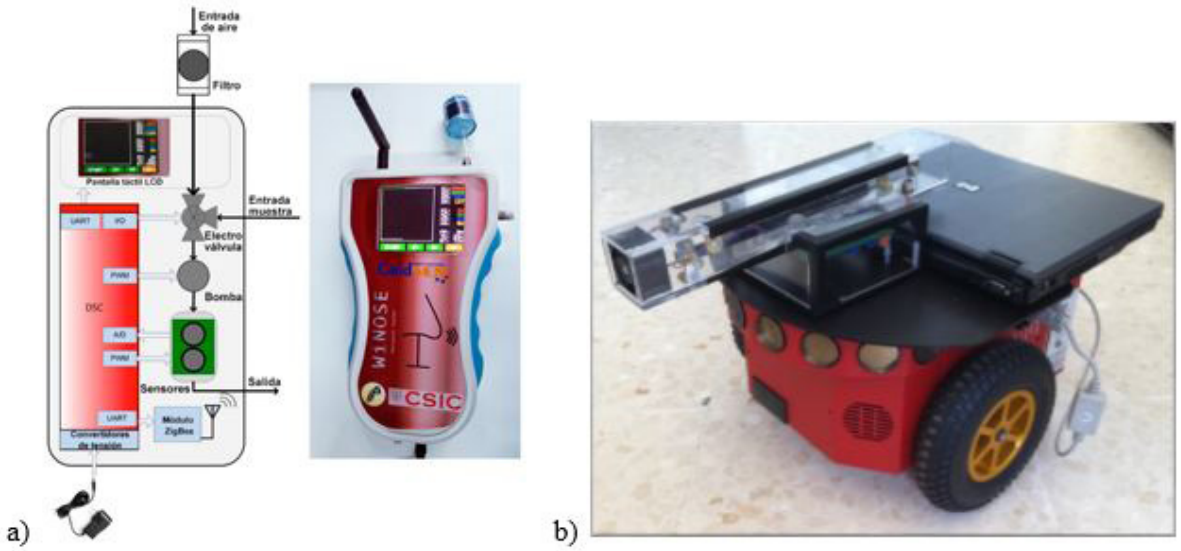


Figura 2. a) Diagrama de bloques y fotografía de la WiNOSE; b) Robot móvil con sistema olfateador electrónico.

Debido a que el sistema desarrollado no va enfocado a un robot específico (si bien en su concepción, se planteó como accesorio para un robot móvil Pioneer 3-DX), se ha buscado realizar una unidad de dimensiones reducidas y alta compatibilidad, lo que hace viable su instalación en diversos modelos de bases robóticas. Además, dado el carácter móvil del sistema, será necesario dotarlo de una robustez adecuada, permitiendo aceleraciones y giros sin sufrir daños o perturbaciones.

b. Nariz electrónica bluetooth

El siguiente dispositivo presentado se trata de un módulo de medición de gases con capacidad de comunicación inalámbrica (*bluetooth*) con dispositivos inteligentes, como pueden ser móviles o tabletas mediante una aplicación en Android. El sistema cuenta con seis sensores: uno para la humedad, uno para la temperatura y cuatro para la detección de gas.

Figura 3. Módulo para medición de gases con comunicación bluetooth.

Para el control del dispositivo se necesitan dos programas diferentes: uno en el microcontrolador que controla el dispositivo y otro en el dispositivo inteligente (Smartphone o Tablet) desde el que se supervisa el mismo. Esta aplicación del teléfono inteligente, es la encargada de establecer comunicación con el módulo *bluetooth* con el fin de recoger los datos, inicia una transacción de datos con el módulo del sensor, que responde enviando los datos. Para establecer la comunicación, algunos comandos son enviados al módulo sensor para recuperar información (lecturas de sensores individuales o globales), o para establecer ciertas acciones (controlar las calefacciones de los sensores, detener el envío de datos o activar algunas pruebas internas). En respuesta, el módulo sensor envía una trama al dispositivo inteligente.

4. Resultados

A continuación, se muestran en este apartado una serie de medidas realizadas con los prototipos desarrollados por el grupo de investigadores de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura en colaboración con el grupo TEDAX-NRBQ de la Policía Nacional. Las medidas han sido agrupadas por la utilidad que pueden aportar ante cualquier intervención de la Policía: detección de precursores del explosivo TATP (acetona y peróxido de hidrógeno), detección de ambientes químicos peligrosos y explosivos.

4.1. Nariz electrónica portátil inalámbrica (WINOSE3)

El peróxido de acetona (triperóxido de triacetona, peroxiacetona, TATP) es un peróxido orgánico, es una sustancia altamente explosiva que puede fabricarse con productos de uso doméstico: peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) y acetona con algún ácido que actúe como catalizador de la reacción (ácido sulfúrico o clorhídrico). Puesto que sus precursores son de fácil obtención, es normalmente usada por químicos aficionados y fabricantes de explosivos. Las medidas mostradas en este apartado han sido realizadas con el dispositivo Winose 3. En esta ocasión se han utilizado dos dispositivos idénticos para la realización de medidas en diferentes lugares.

Una vez realizadas las medidas, los datos adquiridos son preprocesados, se realiza la extracción de características y procesados mediante la técnica de análisis de componentes principales (PCA), que nos permite reducir la dimensión de los datos y poder visualizar en un gráfico de 2 o 3 dimensiones la distribución de los datos y así poder comprobar la capacidad de discriminación del prototipo utilizado. Una vez realizado el PCA, se obtiene el siguiente diagrama:

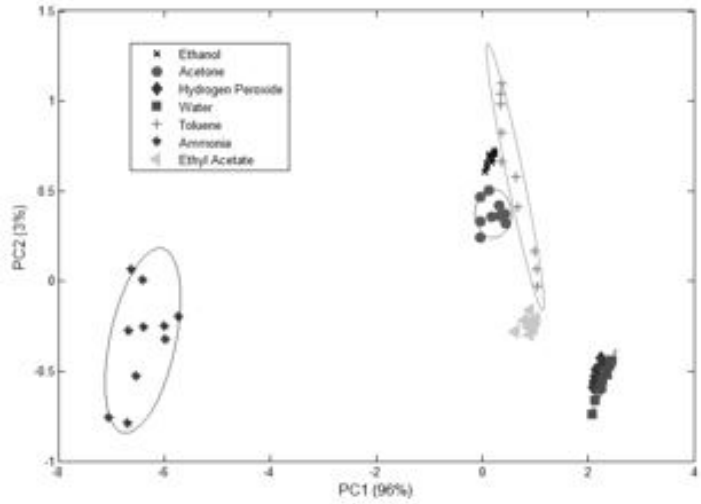


Figura 4. PCA de las medidas de diferentes compuestos volátiles.

Como se puede observar en la figura 4, el sistema es capaz de discriminar entre las muestras que contienen disoluciones de compuestos diferentes. También se puede observar que el amoniaco es el compuesto que da una respuesta más diferente que el resto de los compuestos, por ello se sitúa más alejado en el PCA. Por otra parte, el sistema ofrece respuestas similares al peróxido de hidrógeno y agua, aunque no llega a haber gran solapamiento en las zonas de cada compuesto. El resto de los compuestos están separados. En el caso del Tolueno se puede observar una ligera deriva debida a que, al realizar varias medidas sobre la muestra, la misma se va agotando y disminuyendo su concentración, por eso va disminuyendo la respuesta de los sensores y se sitúa a lo largo de una línea.

Por otra parte, estos resultados han sido confirmados mediante un entrenamiento y posterior clasificación de las muestras mediante redes neuronales, obteniendo un 90 % de éxito en la clasificación (9 de cada 10 muestras han sido correctamente clasificadas). Las mayores confusiones se han producido entre agua y peróxido de hidrógeno.

4.2 Detección de ambientes químicos

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de detección de algunos compuestos químicos que pudiesen ser peligrosos en caso de encontrarse a elevadas concentraciones para el personal que pueda inspeccionar algunas estancias en misiones de reconocimiento. Además, se han medido también otros compuestos químicos, que aun no siendo peligrosos pueden hacer de interferentes en la respuesta de los sensores. Se ha utilizado la nariz electrónica con comunicación *bluetooth*. Se han realizado 18 medidas para cada uno de los compuestos enumerados a continuación: acetona, ácido acético, benceno, etanol, etilacetato, etilbenceno, formaldehído, xileno, tolueno y dimetilacetamida. Se trata en la mayoría de gases tóxicos que en el caso de ser inspirados pueden causar graves enfermedades respiratorias. Otros compuestos como ácido acético, dimetilacetamida, etanol, y etilacetato, han sido incluidos en las medidas como posibles interferentes existentes en el medioambiente.

Para la generación de los compuestos, se han configurado las condiciones oportunas para un sistema calibrado mediante tubos de permeación con el fin de conseguir concentraciones de 100 ppb, y se ha generado una humedad relativa del 60 %. El número de muestras recogidas para cada compuesto es de 18 en estas medidas. Una vez realizado el procesado habitual, se muestran los resultados de los PCA en la figura siguiente.

En la figura 5 se observa una buena distribución de los datos, aunque existe un ligero solapamiento, principalmente entre los compuestos formaldehído, xileno y etanol, por una parte, y entre el ácido acético y el tolueno por otra parte. Mediante clasificación con redes neuronales se obtiene una clasificación exitosa en un 98,33 % de los casos (3 fallos de clasificación: dos entre el formaldehído y el xileno, y uno entre el etanol y la dimetilacetamida), un número bastante elevado, lo que indica la gran capacidad de este sistema para la discriminación de estos compuestos químicos.

4.3 Detección de explosivos

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de detección de algunos explosivos con el prototipo Winose 3. En este caso, para la captura de los olores se han almacenado los explosivos en bolsas cerradas durante varios días para, a continuación, mediante una bomba de muestreo se ha transferido este aire a unas bolsas de Tedlar utilizadas normalmente en cromatografía. Una vez llenas las bolsas se ha procedido a la medida de las muestras tomando como referencia el aire ambiente. Se han realizado al menos 10 medidas de cada uno de los explosivos siguientes: dinamita, PG2, pentrita y pólvora pirotécnica. Se realiza el procesado de la señal y se muestra el PCA en la figura siguiente:

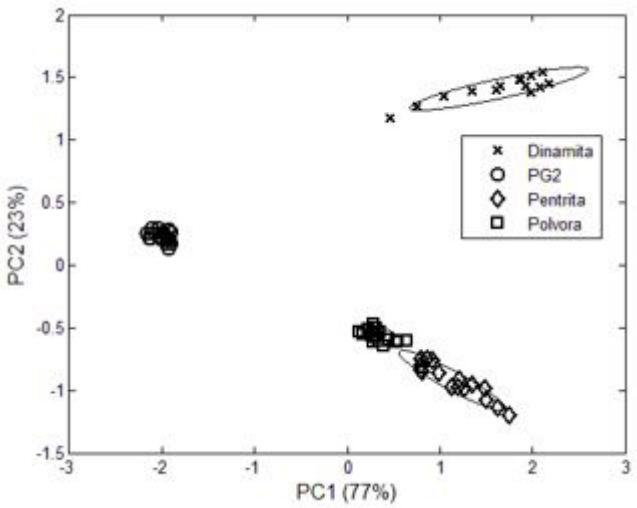


Figura 5. PCA de las medidas de diferentes explosivos.

Como se puede observar en el diagrama, el prototipo es capaz de discriminar correctamente entre las cuatro sustancias explosivas al situar los puntos de cada una de las medidas en lugares diferentes, lo cual muestra que la respuesta generada por los sensores es diferente para cada explosivo. Se observa también cómo los explosivos mejor detectados son dinamita, PG2 y pentrita, mientras que la pólvora pirotécnica la sitúa cerca de la zona de la pentrita, pero sin confundirla. En este caso, la clasificación mediante redes neuronales ha obtenido un 100 % de éxito en la validación.

5. Conclusiones

Se presenta en esta comunicación una aplicación de sistemas olfativos artificiales o comúnmente conocido como narices electrónicas, un posible dispositivo capaz de detectar un olor, ya sea proveniente de un explosivo, como de un agente químico peligroso en el ambiente, o incluso identificarlo con el debido entrenamiento. La combinación de esta tecnología con biosensores permitiría además la detección de agentes biológicos, lo que lo convierte en un sistema totalmente abierto. Este tipo de dispositivos permitiría al operador hacer frente a las incidencias más relevantes y usuales que se suelen presentar en el ámbito TEDAX-NRBQ, como puede ser, desde la averiguación de la naturaleza explosiva o no de una determinada sustancia que podemos encontrar en un registro domiciliario, mochila, coche, etc., hasta el polvo encontrado en el interior de un sobre que ha sido enviado a cierta institución, pudiendo tratarse

de una falsa amenaza o de una real, todo ello con un sistema de bajo coste y adaptable a las diferentes aplicaciones.

Referencias

1. *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones sobre un nuevo enfoque de la UE en materia de detección y reducción de los riesgos QBRN-E /* COM/2014/0247 final */. Disponible en la dirección: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52014DC0247n*
2. *J.W. Gardner, P.N. Bartlett, G.H. Dodd, and H.V. Shurmer, «The design of an artificial olfactory system», Chemosensory Information Processing, D. Shild (ed.), Springer Verlag, Heidelberg, Germany, 1990.*
3. *J. P. Santos, M. Aleixandre y C. Cruz, «Hand Held Electronic Nose for VOC Detection», Chemical Engineering Transactions, vol. 30, pp. 181-186, 2012.*
4. *A. Loutfi, S. Coradeschi, G. K. Mani, P. Shankar, & J. B. B. Rayappan (2015). Electronic noses for food quality: A review. Journal of Food Engineering, 144, 103-111.*
5. *A. Carrasco, C. Saby, P. Bernadet (1998). Discrimination of Yves Saint Laurent perfumes by an electronic nose. Flavour and fragrance journal, 13(5), 335-348.*
6. *A. K. Pavlou, N. Magan, C. McNulty, J. M. Jones, D. Sharp, J. Brown, A.P.F. Turner. «Use of an electronic nose system for diagnoses of urinary tract infections». Biosensors and Bioelectronics, 17, pp. 893-899. (2002).*
7. *J. Getino, L. Arés, J.I. Robla, M.C. Horrillo, I. Sayago, M. J. Fernández, J. Rodrigo, J. Gutiérrez. «Environmental applications of gas sensor arras: combustión atmospheres and contaminated soils». Sensors and Actuators B, vol. 59, 249-254.*
8. *J. P. Santos y J. Lozano, «Real time detection of beer defects with a hand held electronic nose», de 10th Spanish Conference on Electron Devices (CDE), Aranjuez, 2015.*

Counterfog

Pérez Díaz, José Luis[1,*], Martín Pérez, Tania[2], Sánchez García-Casarrubios, Juan[3], Pérez del Álamo, José Luis[3]

[1] Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá, Campus Externo, A2, km 33,600, 28803, Alcalá de Henares. Correo electrónico: jlperezd@uah.es (JLPD).

[2] Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá, Campus Externo, A2, km 33,600, 28803, Alcalá de Henares. Correo electrónico: tania.martinp@edu.uah.es (TMP).

[3] San Jorge Tecnológicas S.L., Avda. Europa 82, 28341, Valdemoro. Correo electrónico: jsanchez@sanjorgetecnologicas.com (JS).

Email: jlpedeal@sanjorgetecnologicas.com

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: jlperezd@uah.es (J.L.P.D.).

Resumen

El sistema *Counterfog* para protección y descontaminación basado en el empleo de chorros de niebla ha demostrado su utilidad en un amplio espectro de agentes NRBQ, incluyendo el humo producido en incendios. La capacidad de atrapar partículas, esporas, microorganismos y otros elementos dispersos en aire, así como la de poder dispersar micro-partículas nano-estructuradas y desinfectantes hace que *Counterfog* pueda ser empleado para evitar la propagación aérea de agentes NRBQ así como para la descontaminación de recintos e instalaciones. En este trabajo se presentan resultados con diversos sucedáneos de agentes a gran escala, así como con agentes químicos reales en laboratorio. Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea en su programa FP7-SEC-2012-1, con número de concesión 312804.

Palabras clave

Counterfog, descontaminación.

1. Introducción

1.1. Amenazas NRBQ

Las amenazas NRBQ son un creciente riesgo para la sociedad que pueden ser originadas por ataques terroristas, situaciones bélicas o, simplemente, por accidentes en la industria o el transporte. La relativamente fácil disponibilidad de agentes químicos, biológicos y radiológicos hacen que sea conveniente tener un medio económico y aplicable a gran escala para proteger de forma amplia a las personas y las infraestructuras de este tipo de ataques.

La peligrosidad de todos estos agentes cuando se liberan en el aire –por ejemplo, mediante una bomba sucia– radica precisamente en su estado disperso y en su capacidad de llegar a los pulmones de las personas expuestas. Los agentes químicos pueden estar en forma de vapor o de aerosoles formados por gotitas microscópicas; los agentes biológicos en forma de esporas, aerosoles o pequeñas partículas de aglomerados biológicos; y, por su parte, los agentes nucleares o radiactivos en forma de polvo en suspensión.

1.2. Sistema Counterfog

Teniendo en cuenta este riesgo, el proyecto *Counterfog*, financiado por el 7.º programa marco de la Comisión Europea, ha desarrollado un sistema económico, universal y aplicable a gran escala para la contención/neutralización de estos agentes.

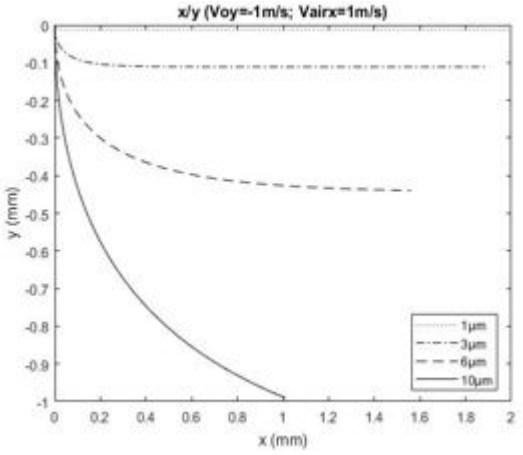


Figura 1. Trayectorias seguidas por gotas de agua dispersadas a 1 m/s inmersas en una corriente horizontal de aire de 1 m/s. Penetración en un fluido.

Counterfog emplea principalmente agua y aire comprimido para crear conos de niebla en boquillas de forma que limpia el aire. En el caso de partículas, esporas o aerosoles, las gotas de la niebla logran agregarlas y depositarlas. En el caso de vapores o gases, partículas nanoestructuradas de óxidos de titanio y aluminio, dispersas con el mismo sistema, logran catalizar rápidamente su descomposición sin necesidad de luz ultravioleta.

El principio de funcionamiento se basa en el comportamiento de las gotas y partículas de tamaño del orden de las pocas o fracciones de micras. Estas partículas acompañan al aire y no pueden ser removidas por gotas de tamaño mayor como las producidas por rociadores o pulverizadores convencionales.

Counterfog consiste en una boquilla alimentada por agua y aire a presión que genera un cono de niebla que aspira los contaminantes que se encuentran alrededor haciendo colapsar las partículas en suspensión con las gotas de la niebla arrastrándolas así y colapsándolas. Esto las elimina del aire para depositarlas en el suelo o sobre las superficies a las que se dirija el cono de niebla.

Esto evita que los agentes puedan seguir dispersándose y facilita la descontaminación –con un consumo de agua y una producción de residuos mínimos.

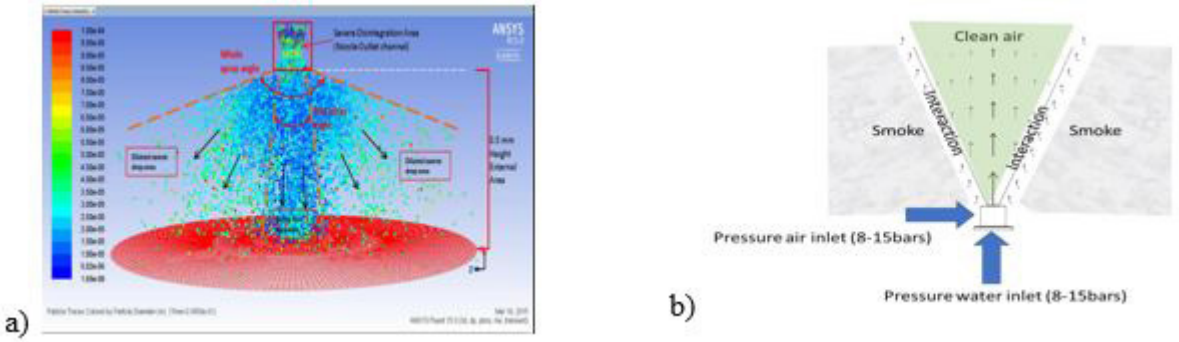


Figura 2. Diseño y efectividad de las boquillas de Counterfog.

1.3. Ensayos realizados

Para demostrar la efectividad del sistema *Counterfog*, se han realizado diferentes ensayos tanto de dinámica de las nieblas como de eliminación de sucedáneos de agentes químicos, biológicos y radiológicos del aire. Incluso se han realizado ensayos de descontaminación de humo de escape de vehículos en el aire. Los resultados han sido satisfactorios abriendo numerosas posibilidades en la defensa frente a accidentes o ataques NRBQ.

Figura 3. Captura y deposición de humo de color generado en una bengala mediante una boquilla portátil de Counterfog. Ensayo realizado en cooperación con la UME en la base aérea de Torrejón. La absorción. Captura y colapso del humo de colores hace visible al ojo humano el proceso.

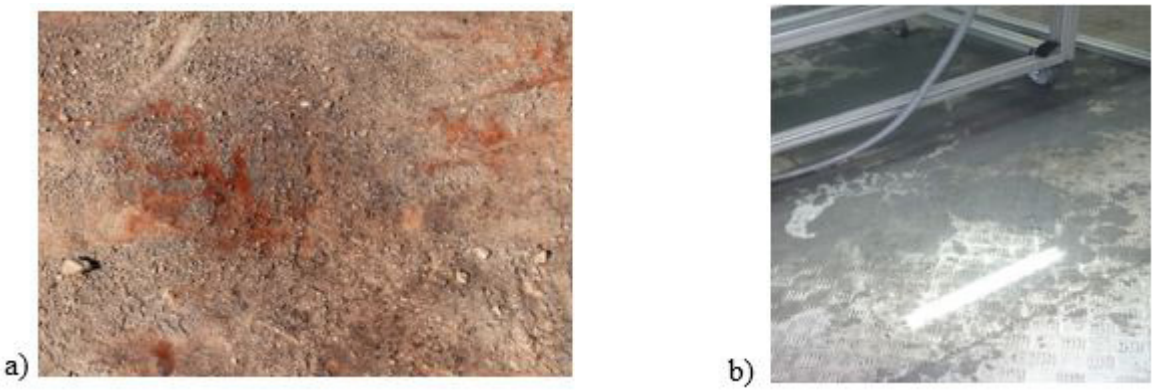


Figura 4. Residuos depositados sobre el suelo o superficies después de depurar el aire con Counterfog.

2. Resultados

Counterfog ha sido ensayado con sucedáneos de diversos agentes químicos, biológicos y radiológicos en laboratorio. En las referencias abajo indicadas pueden encontrarse más detalles de los mismos. En la figura puede observarse una serie de tomas de muestra biológica cultivadas en un ensayo en que se dispersó un aerosol con bacterias y esporas de *Bacillus thuringiensis*. La comparación de la dispersión sin ninguna actuación posterior con la misma dispersión y aplicación del *Counterfog* no deja dudas de la efectividad en la limpieza del aire de este tipo de agente.

Figura 5. Cultivo de tomas de muestra de aire después de pulverizar un aerosol de Bacillus thuringiensis sin activación y con activación de Counterfog. Puede comprobarse la eficiencia descontaminando el aire.

Figura 6. Actuación de un conjunto de boquillas Counterfog (fijo) para la limpieza de humo en una nave. Izquierda: nave repleta de humo. Centro: después de 6 minutos de aplicación de Counterfog. Derecha: después de 9 minutos de aplicación de Counterfog.

Además se han realizado ensayos en una nave amplia de 35mx12mx7,5 m –similar a lo que podría ser un atrio de una estación de ferrocarril, aeropuerto, etc. En esta nave fueron dispersadas partículas de bicarbonato sódico (hidrófilo) y de talco (hidrófobo) como simulantes de elementos radiológicos con los resultados que se muestran en las figuras adjuntas. En primer lugar se realizó la dispersión de dichas partículas y se midió la cantidad suspendida en el aire mediante contadores de partículas por difracción durante algo más de una hora para determinar su tasa de caída efectiva. Posteriormente, se repetía el experimento, pero aplicando una serie de 9 boquillas *Counterfog* durante 6 minutos. La comparación demuestra que el sistema es capaz de reducir la cantidad de partículas en suspensión con mucha mayor rapidez que la caída natural por gravedad de las mismas. Nótese que los contadores de partículas no distinguen entre gotas de agua y partículas sólidas por lo que cuando se aplica el sistema *Counterfog* aumenta significativamente el número de cuentas de las mismas. Una vez que todas las gotas de agua desaparecen se observa un número de partículas en suspensión inferior incluso al inicial –previamente a las pruebas–.

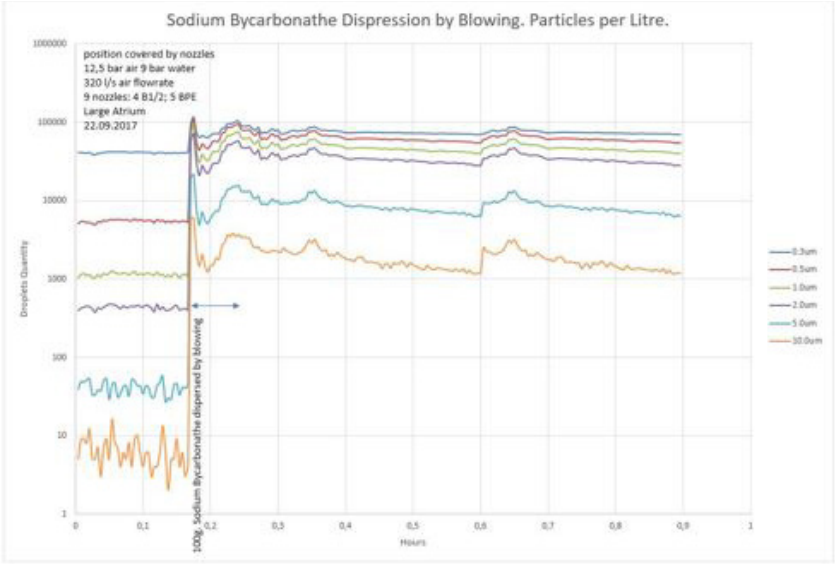


Figura 7. Caída natural por gravedad de 100 gr. de bicarbonato sódico dispersado por soplado.

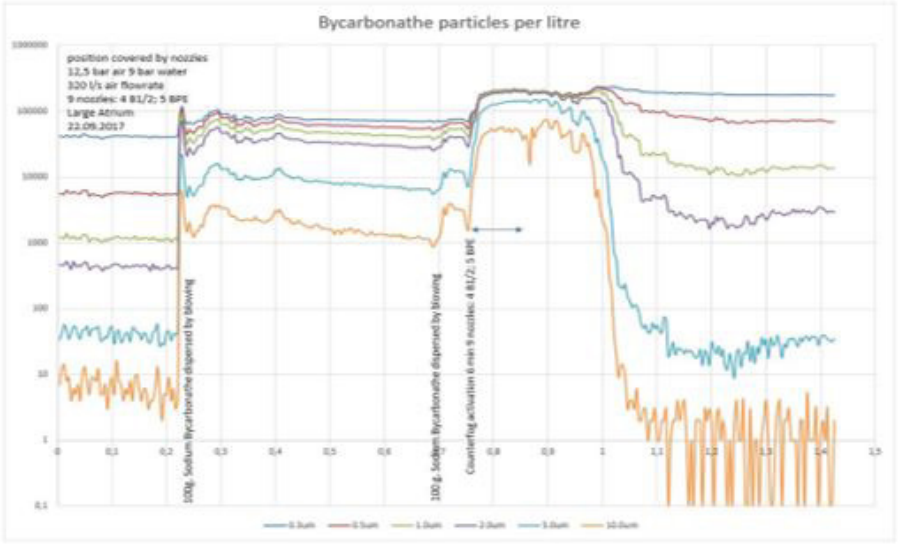


Figura 8. Actuación de un conjunto de boquillas Counterfog (fijo) para la limpieza de 200 gr de bicarbonato sódico dispersado por soplado en una nave. Izquierda: concentración de bicarbonato después de ser dispersado. Centro: dispersión de los 100 gr restantes de bicarbonato sódico y aplicación de Counterfog durante 6 minutos. Derecha: concentraciones por debajo del nivel de fondo después de la activación.

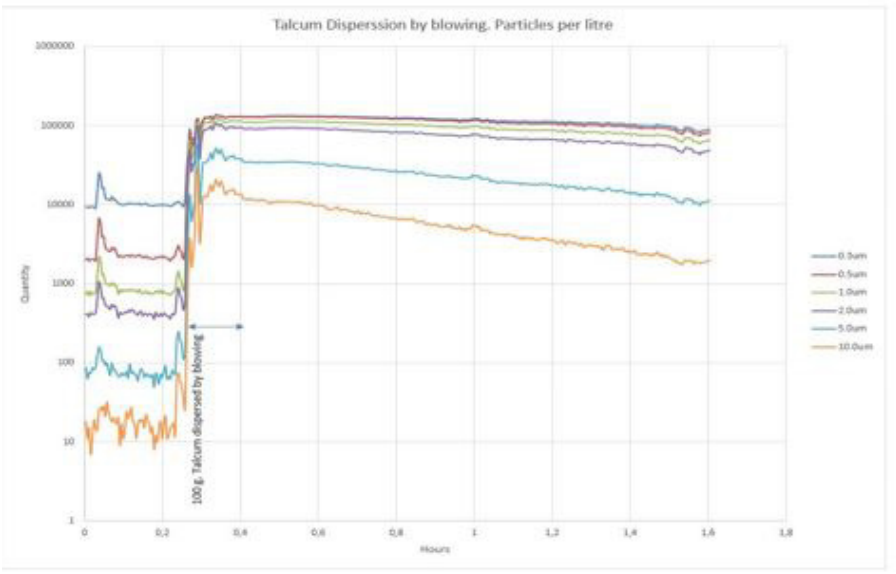


Figura 9. Caída natural por gravedad de 100 gr talco dispersado por soplado.

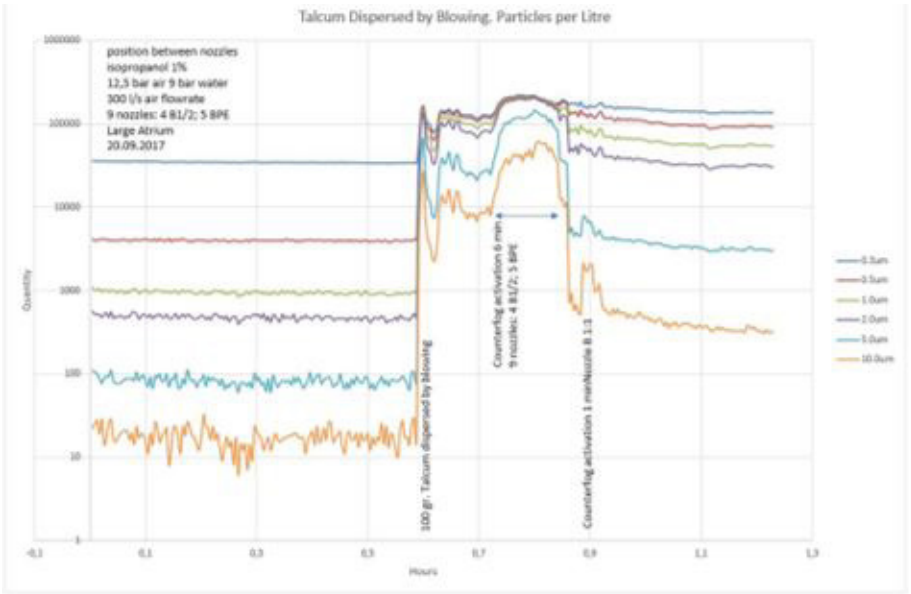


Figura 10. Actuación de un conjunto de boquillas Counterfog (fijo) para la limpieza de 100 gr de talco dispersado por soplado. Izquierda: concentración de talco después de ser dispersado. Centro: aplicación de Counterfog durante 6 minutos. Derecha: después de la activación.

3. Aplicaciones

El número de aplicaciones del sistema *Counterfog* parece pues enorme. Puede ser instalado permanentemente en edificios o instalaciones, donde pueda activarse manual o automáticamente en caso de emergencia, pero también se ha desarrollado un sistema *Counterfog* portátil. El sistema *Counterfog* portátil está formado por un conjunto de boquillas que puede ser transportado por un remolque para poder actuar en campo abierto.

El sistema *Counterfog* permite la adicción de diferentes tipos de desinfectantes al agua, de forma que ya no solamente se logra el abatimiento de los agentes NRBQ sino, en algunos casos, su neutralización. En

cualquier caso, el agua residual que se forma en el suelo puede limpiarse o desinfectarse en función del tipo de agente que haya sido abatido.

3.1. Posibles aplicaciones del sistema Counterfog fijo

1. Limpieza de salas y conductos que hayan podido quedar contaminados con agentes NRBQ.
2. Protección de vehículos y edificios frente a accidentes o ataques NRBQ.
3. Cortina *Counterfog* que actúa de barrera para detener la difusión de agentes NRBQ en el aire.
4. Barrera al paso del humo.
5. Abatimiento de agentes químicos o biológicos por ejemplo en una sala de apertura de correos.

3.2. Posibles aplicaciones del sistema Counterfog portátil

1. Abatimiento de nubes de partículas –por ejemplo de sales radiológicas- en el aire.
2. Abatimiento de agentes biológicos o químicos.
3. Cortina *Counterfog* que actúa de barrera para detener la difusión de nubes tóxicas NRBQ.

Figura 11. Ensayo en campo abierto de una barrera de 5 boquillas Counterfog (portátil) impidiendo el paso de humo.

4. Conclusiones

Se ha demostrado la efectividad y eficiencia del *Counterfog* como herramienta universal para neutralizar agentes en el aire, así como para su descontaminación. Dada la versatilidad de esta herramienta – tanto como parte de las instalaciones fijas de seguridad de un edificio como en su versión móvil–, se abre un abanico de posibilidades para su utilización en el ámbito de la defensa que parecen merecer ser explorados.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado parcialmente por el 7.º programa marco de la Unión Europea con número de concesión 312804. Los autores agradecen la colaboración en el proyecto del CIEMAT, la Universidad de Strathclyde de Glasgow, el Instituto de Física del Estado Sólido de la Academia de Ciencias Búlgara, el Instituto de Química Inorgánica de la Academia de Ciencias de la República Checa, Consilium Marine & Safety, BPE e.K., la Sección Española de la Asociación Europea de Ferroviarios, Vojensky Vyzkumny Ustav SP y la Universidad Carlos III de Madrid. Así mismo, agradecen los interesantes análisis y comentarios así como la colaboración en la evaluación y demostración del sistema al Tte. general Alcañiz así como a todos los miembros de la UME, al teniente coronel Cique, al comandante Julio Ortega, María del Mar Hidalgo y coronel Sánchez.

Referencias

1. *J.Sánchez-García-Casarrubios, F.J. Llerena, J.L. Pérez-Díaz. Fog Dynamics. 1st Scientific International Conference on CBRNE SICC 2017 Proceedings. 2017.*
2. *J.L. Pérez Díaz, Y.Quin, O.Ivanov, J.Quiñones, V. Stengl, K.Nylander, W.Hornig, J.Álvarez, E.Ruiz-Navas, K.Mazanec. Fast response CBRN high scale decontamination system: COUNTERFOG. 1st Scientific International Conference on CBRNE SICC 2017 Proceedings. 2018.*
3. *L.Pascual, M.Fernández, J.Domínguez, L. Amigo, K.Mazanec, J. Pérez-Díaz y J.Quiñones. First measurement using COUNTERFOG device: Nuclear and Radiological scenario. 1st Scientific International Conference on CBRNE SICC 2017 Proceedings. 2017.*
4. *J.Pérez-Díaz, L.Pascual M. Fernández, J.Domínguez, L. Amigo, K. Mazanec y J. Quiñones, Fast CBRN response and decontamination system at high scale: COUNTERFOG. 1st Scientific International Conference on CBRNE SICC 2017 Proceedings. 2017.*
5. *T. Martín-Pérez, F.J. Llerena-Aguilar, J.Pérez-Serrano, J.L. Copa-Patiño, J. Solivieri de Carranza, J.M. Orellana-Muriana, J.L. Pérez-Díaz. Eco- friendly air decontamination of biological warfare agents using «Counterfog» system. 1st Scientific International Conference on CBRNE SICC 2017 Proceedings. 2018.*
6. *Karel Mazanec, Miroslav Skoumal, José Luis Pérez Díaz. COUNTERFOG – Device for Large-Scale Fog Decontamination. In: CBRN PROTECT. Vyškov. 2017; 20017. ISBN 978-80-7231-413-3.*
7. *Angelov K. Mitova I., Pérez Díaz J. L. Analysis of Chemical Warfare Agents and Methods for Detection and Simulant Substances. V International Scientific and Technical Conference, Engineering, Technologies. Education. Security. Proceedings. Military Science and Security. 2017; Vol 1. ISBN: 2535-0315, e-ISBN: 2535-0323.*
8. *Stoyanov Z., Mitova I., Pérez Díaz J. L. Analysis of the Use of Radioactive Substances for the Creation of Pollution, their Detection and How they Can Be Simulated. V International Scientific and Technical Conference, Engineering, Technologies. Education. Security. Proceedings. Military Science and Security. 2017; Vol 1. ISBN: 2535-0315 ISBN: 2535-0323.*
9. *J.L. Pérez-Díaz. COUNTERFOG: A new fast response device for general CBRN episodes. CBNW, Chemical, Biological and Nuclear Warfare Magazine -2018/1.*

Área VI - C41

6A. Sistemas de información para C4I

Modelo multidimensional de control de vida para todas las clases de material basado en una plataforma de *Business Intelligence*

Muñoz Nuño, Francisco Javier[1,*] y Rodríguez Sánchez, Raúl[2]

[1] Mando de Apoyo Logístico del Ejército de Tierra, C/Prim 6-8, 28004 Madrid. fmunnun@et.mde.es: (MNF).

[2] ISDEFE, C/Beatriz de Bobadilla 3, 28040 Madrid. rrodriguez@isdefe.es: (RSR).

* Autor principal y responsable del trabajo: fmunnun@et.mde.es (MNF).

Resumen

El problema planteado, es el apoyo a la toma de decisión basado en la situación de los materiales del Ejército de Tierra (ET) para cualquier clase de material: I subsistencias, II vestuario y equipo, III carburantes-lubricantes, IV fortificación, V munición y explosivos, VII armamento, material y animales, VIII asistencia sanitaria y IX piezas de repuesto.

Dicho problema incluye aspectos tales como: 1) sobreutilización vs infrautilización: uso real de los materiales; 2) anticipación a las caducidades; 3) consumos vs caducidades; 4) necesidades de reposición; 5) evitar desmilitarizaciones no deseadas; 6) estado condición de materiales en territorio nacional y zona de operaciones.

El objetivo es conocer el estado de los materiales del ET de forma integrada, accesible, rápida y muy intuitiva mediante un sistema de analítica de datos de última generación, *Business Intelligence* (BI) con capacidad de autoservicio de información. Para ello el modelo multidimensional desarrollado permite analizar de manera homogénea cualquier clase de material (materiales heterogéneos), mediante dimensiones y medidas comunes.

Los resultados obtenidos han sido: 1) determinar - según su antigüedad (años) y su grado de uso (horas y kilómetros) alcanzado sobre el total previsible del material considerado- el grado de empleo del mismo, 2) poder conocer con anticipación suficiente la caducidad (o vida probable) de los materiales, así como, 3) el estado condición (operativo, operativo limitado, inoperativo, etc.) de los mismos y la potencia de fuego de los principales sistemas de armas.

La implantación del modelo afecta, diariamente, a la totalidad del material seriado del ET y ha permitido conocer y afrontar problemas en la fiabilidad del dato origen y ciertas barreras culturales por parte de los usuarios e interesados.

Este proyecto ha sido realizado por el Mando de Apoyo Logístico del Ejército de Tierra (MALE) en colaboración con Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España (ISDEFE).

Palabras clave

Business Intelligence, control de vida, caducidad, estado condición, Ejército de Tierra, Mando de Apoyo Logístico.

1. El problema fundamental

El problema que se plantea es el del conocimiento del estado de uso y control de vida para los diferentes materiales en servicio en el Ejército de Tierra. Dicho problema se manifiesta en distintas áreas ya sea durante la vida del material y su influencia en el aspecto mantenimiento y/o distribución de materiales, así como en su retirada de servicio.

Dichas actividades están realizadas por un conjunto de analistas pertenecientes a diversos organismos y niveles: desde el analista que estudia el estado operativo del material, a los que deciden si un material ya ha cumplido o no su vida útil para sacarlo del inventario disponible, o bien a los que programan su sustitución.

Hasta la fecha las herramientas informáticas utilizadas suministran la información mediante diversos informes estáticos, configurados según las necesidades del usuario, mayoritariamente generados durante el periodo nocturno y con la posibilidad de exportación de datos en hoja de cálculo. Posteriormente, cada usuario debe manejarlas hasta elaborar el informe deseado, cruzando múltiples informes o tablas hasta poder integrar y obtener una visión de conjunto sobre la situación completa del material. Adicionalmente cada vez que se desea actualizar la información se debe repetir dicho proceso de forma manual.

Las actividades incluidas en el diseño y creación de este modelo multidimensional de control de vida para acometer la resolución del problema planteado, están dentro de las etapas organizativas que intentan implementar procesos nuevos o mejorados e innovación tecnológica incluidas en la investigación y desarrollo, según el documento de Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2015).

2. Solución conceptual

Conceptualmente la solución debe contemplar los siguientes aspectos:

- Obtener el grado de uso, comparando el uso real que se está haciendo (n.º de horas, kilómetros recorridos, años consumidos) con respecto a la vida del material. Unificar en tantos por ciento la representación cartesiana para cualquier tipo de recurso, pudiendo comparar o juntar en un mismo gráfico cualquier tipo de recurso.
- Anticiparse a la caducidad de los materiales con tiempo suficiente, conociendo en forma de secuencia temporal la previsión de materiales que irán caducando (o llegando al final de su vida probable).
- Conocer en todo momento el estado operativo del material, así como la capacidad de fuego de los principales sistemas de armas que requieren de munición.
- Identificar, dentro de los informes obtenidos, para cada recurso, los elementos concretos que difieren en exceso de la nube global de datos o están fuera de límites. Estos casos puede indicar que el dato sea anómalo, en cuyo caso da una «bondad del dato» y permitirá corregirlo si es realmente un anómalo, para asegurar la calidad del dato.
- Disponer inicialmente de un conjunto de informes totalmente automatizados que puedan cubrir las necesidades tanto desde nivel teniente general (extremadamente visuales, sencillos e información

muy agregada) como hasta un analista logístico, donde el procedimiento de uso se base en simples filtros de información que se obtienen interactuando con los distintos campos: número OTAN de catálogo, tipo o tipos de materiales, artículos concretos (hasta nivel matrícula o número de serie), nivel de la organización donde se encuentra, etc. Permitir a los usuarios crear sus propios informes mediante simples operaciones de *drag and drop*.

- Facilitar al usuario (una vez obtenida la autorización de trabajo al sistema) un acceso lo más sencillo posible, donde simplemente navegando y clicando con el ratón pueda consultar toda la información que necesite en las pestañas disponibles de cada informe.

3. Desarrollo técnico

3.1. Plataforma de Business Intelligence

Una vez identificado el problema, los requisitos y la solución conceptual, se inició el estudio para determinar la mejor manera de llevar a cabo dicha innovación. El modelo ha sido desarrollado utilizando la plataforma *Analytics Utility for Business Intelligence* (anuBIs) establecida en el MALE desde el año 2016 y basada en una herramienta *commercial off-the-shelf* (COTS) de BI, con capacidad de autoservicio de información.

3.2. Dimensiones y medidas

Las dimensiones de análisis son los ejes que permiten analizar, filtrar y/o profundizar en cada Indicador de modelo multidimensional.

DIMENSIÓN	DESCRIPCIÓN
01 - UNIDADES	UCO donde el material esté asignado, presente, montado, etc. Nivel I, II, III, IV, V y unidad. Latitud y longitud de la posición geolocalizada de la unidad
02 - UNIDADES AGRUPACIÓN	UCO donde el material está asignado o presente. Brigada, OLC, AALOG y unidad
03 - MATERIALES	Jerarquías: clase-subclase-NOC, tipo material-familia MALE-NOC, voz-cabecera-NOC clase, subclase, NOC, familia de apoyo, precio estándar
04 - CONDICIÓN MATERIAL	Estado condición de material (10, 11,… 20, 30, 40, TR, etc.). Agrupación de estados de condición de material: operativo (10, 11.. hasta 29 inclusive) e inoperativo (30, 31.. hasta 39)
05 - TIPO MATERIAL	Tipo de material (plantilla, almacén o montado)
06 y 07 - SEGMENTACION KM / HORAS	Segmentación de los números de serie lote en según su 'KM % USO u 'HORAS % USO' vs. tiempo % vida probable' Código y descripción (A; B; C… / uso intensivo; uso intenso; óptimo…)
08, 09 y 10 - CONTROL TIEMPO / HORAS / KM	Control de vida de tiempo, km u horas (Si/No) identifica los controles de vida que aplican a los materiales

Tabla 1. Dimensiones del modelo

Las medidas son las métricas de cálculo representadas por valores numéricos (pueden agregarse, sumarse, promedio, etc.) o etiquetas (valores únicos «texto» no agregables marcados en azul), siendo las más relevantes las siguientes:

MEDIDA	DESCRIPCIÓN
FECHA CADUCIDAD **FECHA ENTRADA** **FECHA FABRICACION**	FC, FE y FF: fechas asociadas a cada n.º serie o lote (31/12/2019) y que a lo largo de la vida del material no deben ser cambiadas.

MEDIDA	DESCRIPCIÓN
FECHA VIDA PROBABLE	En caso de estar cumplimentada en SIGLE es la utilizada, en caso se estar a nulo la FVP se completa con la misma que la FC con objeto de simplificar los análisis para cualquier tipo de clase de material y en caso de que la FC también sea nula se completa con la fecha de fabricación sumada con la cantidad de vida que tenga en el control de vida de tiempo. En caso de que un material se le extienda la vida, la FC se mantiene inalterada en SIGLE y es la FVP la que se aumenta (31/12/2020).
KM / HORAS ACTUAL	Última anotación de filiación de km u horas (1.632 h). Se contabiliza sobre la UCO donde esté presente el material (no donde este asignado).
KM / HORAS ACTUAL PROMEDIO	Promedio de los hm u horas actuales del conjunto de n.º serie seleccionados.
KM / HORAS ACTUAL SUMA	Suma de los km u horas actuales del conjunto de n.º serie seleccionados.
KM / HORAS CANT VIDA	Cantidad de vida correspondiente al control de vida de km u horas (50.000 km).
KM / HORAS VIDA REMANENTE	Km u horas vida remanentes = horas cant vida – horas actual.
KM / HORAS % USO	Km % uso = 100*(km actual / km cantidad vida). Horas % uso = 100* (horas actual / horas cantidad vida).
KM /HORAS VIDA SUPERADO	Indicador que marca si el seriado-loteado ha superado su vida comparando la cantidad de vida con el uso actual (0=No; 1=Si).
KM / HORAS VIDA SUPERADO	Indicador que marca si el seriado-loteado ha superado su vida comparando la cantidad vida con el uso actual (0=No; 1=Si).
TIEMPO ANTIGÜEDAD (AÑOS)	Antigüedad (en años) = fecha actual – fecha fabricación (5,23).
TIEMPO CANT VIDA (AÑOS)	Cantidad de vida correspondiente al control de vida de tiempo en años (20).
TIEMPO VIDA REMAMENTE INTERVALO	Intervalo de tiempo en el cual se llegara a la FVP, siendo 'A' el año actual. Ejemplo: año actual=2017; FVP=2018 entonces; intervalo=A+3.(>=A+11).
TIEMPO VIDA REMAMENTE	Tiempo vida remanente (en años) = fecha vida probable – fecha actual (6,25 años).
TIEMPO % VIDA PROBABLE	Tiempo % vida probable = 100*(antigüedad / tiempo cantidad vida).
TIEMPO VIDA SUPERADO	Indicador que marca si el seriado-loteado ha superado su vida comparando la vida máxima con el uso actual (0=No; 1=Si).
%OPER (ASIGNADO) **%OPER (PRESENTE)**	$$\%OPER = \frac{\sum Cantidad\ con\ Condición\ Operativa\ u\ Operativa\ Limitada}{\sum Cantidad\ Total\ (en\ cualquier\ condición)}$$ Para este cálculo se excluye (no se contabiliza) el estado inútil, y se diferencia según se tenga en cuenta las cantidades asignadas o presentes. En caso de tener un divisor = 'nulo' el coeficiente tiene valor nulo.
COEFICIENTE USO HORAS **COEFICIENTE USO KM**	$$COEF.USO\ HORAS = \frac{Horas\ \%\ uso}{Tiempo\ \%\ Vida\ Probable};$$ $$COEF.USO\ KM = \frac{Km\ \%\ Uso}{Tiempo\ \%\ Vida\ Probable}$$ Coeficiente adimensional que permite comparar el uso del material vs vida probable ya consumida, y se diferencia según se tenga en cuenta 'km u horas' vs tiempo. En caso de tener un divisor = 'nulo' el coeficiente tiene valor nulo.
CANTIDAD ASIGNADA **CANTIDAD PRESENTE** **CANTIDAD MONTADA**	Cantidad de material asignado, presente o montada.
IMPORTE TOTAL	Importe total de la línea lote/serie calculado como cantidad presente * precio estándar (25.365,25 €).
Nº LOTE -SERIE	Identificativo del lote o serie (ET 106244; 01-SBS-95).

Tabla 2. Medidas del modelo

4. Implantación del modelo

4.1. Internalización del modelo en la organización

La difusión, internalización y superación de barreras organizacionales o culturales (Rodríguez-Sánchez, & Sols-Candela, & Diaz-Osto, 2018) para la implantación de esta nueva capacidad, así como la formación de los analistas y usuarios de dicho modelo, ha llevado consigo la realización de varias acciones e iniciativas:

- Múltiples reuniones de trabajo con los interesados (PMBOK, 2017) para lograr diversos objetivos, tales como validación, aceptación, difusión y presentación de resultados, entre otros.
- Utilización de canales directos de comunicación (teléfono, mail o presencial) entre la oficina de BI y los interesados.
- Impartición de varias ediciones del curso básico de usuario.
- Publicación de los informes predefinidos y toda la documentación de apoyo en el Portal SharePoint del MALE (http://colabora-et.mdef.es/areas/male/BIMALE/) alojado en la intranet del Ministerio de Defensa.
- Apoyo directo de consultoría a los analistas para la creación de nuevos informes o apoyo a la explotación de análisis/informes ya existentes.

4.2. Calidad del dato

El uso del modelo ha dado lugar a la identificación por parte de los analistas logísticos de resultados incoherentes o ilógicos, que han puesto de manifiesto casos en los cuales los datos en origen no eran correctos tanto en lo referente a datos básicos de vida máxima de los materiales como a datos de uso asociados a matriculas/lotes/seriados concretos.

- Tiempos de ciclo de vida, km de vida y horas de vida máximas incoherentes.
- Fechas de fabricación, fechas de caducidad y fechas de vida probable incorrectas.
- Anotaciones de hm u horas incoherentes/atípicos.

Esta situación ha dado lugar a dos acciones:

1. Solicitar a la Jefatura de Ingeniería una revisión y corrección de los controles de vida (tiempo, km y horas) de todos los materiales del ET, con el apoyo de los órganos logísticos centrales como cabecera técnica de los materiales.
2. Para aquellas matrículas/lotes/seriados con datos incoherentes, se ha solicitado a las unidades donde esté asignado el material una revisión y corrección de los mismos.

5. Resultados obtenidos

A partir del desarrollo e implantación realizada, los resultados obtenidos se traducen en una plataforma de BI capaz de generar de forma actualizada (frecuencia diaria) y automática: informes predefinidos, autoservicio de información (informes y consultas *self-service* creadas por los propios usuarios) y tablas dinámicas de análisis *ad hoc*, como apoyo a la toma de decisión de los analistas y mandos decisores implicados.

Se muestran las representaciones gráficas más relevantes utilizadas para cada uno de los bloques de análisis planteados inicialmente, con objeto de mostrar dichos resultados obtenidos en las figuras siguientes.

1) Análisis del grado de uso.

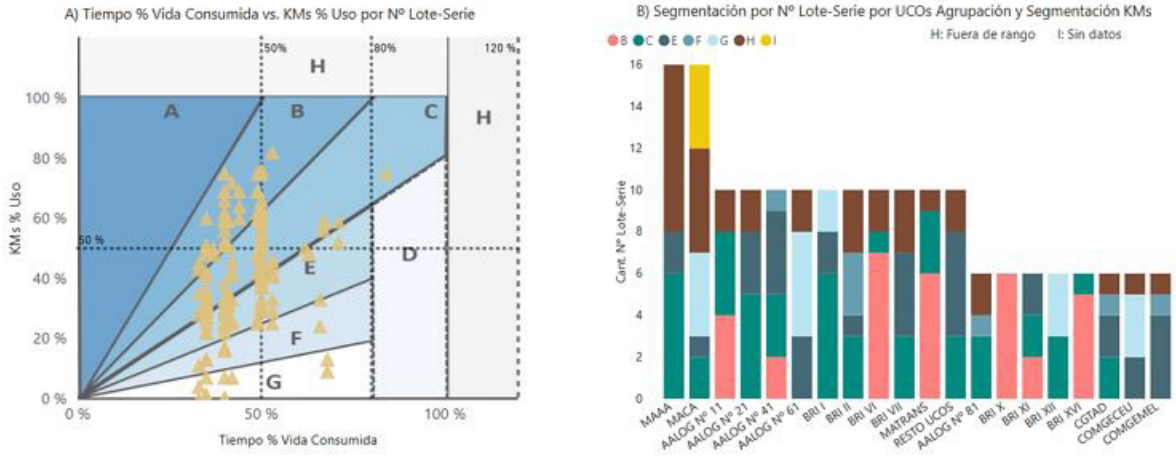


Figura 1. A) Grado de uso del material; B) Segmentación de los materiales por unidades.

NOC Desc	Nº Lote-Serie	KMs Actual	Coef. Uso KMs	KMs Cant Vida	KMs % Uso	Antigüedad	Cant Vida	% Vida Prob.	Segmentación KMs	Unidad
V ALTO BLN ESC GUEPARDO IVECO LMV LINCE		43.285	0,440	200.000	22 %	9,93	20,00	50 %	F	OP. EUTM MALI
V ALTO BLN ESC GUEPARDO IVECO LMV LINCE		43.210	0,560	200.000	22 %	7,88	20,00	39 %	E	GT LIBANO

Figura 2. Cantidad de material por año de vida probable.

2) Anticipación a la caducidad (vida probable).

Figura 3. Cantidad de material por año de vida probable.

3) Estado condición de los materiales y potencia de fuego.

Figura 4. Estado de la condición de un material para una unidad.

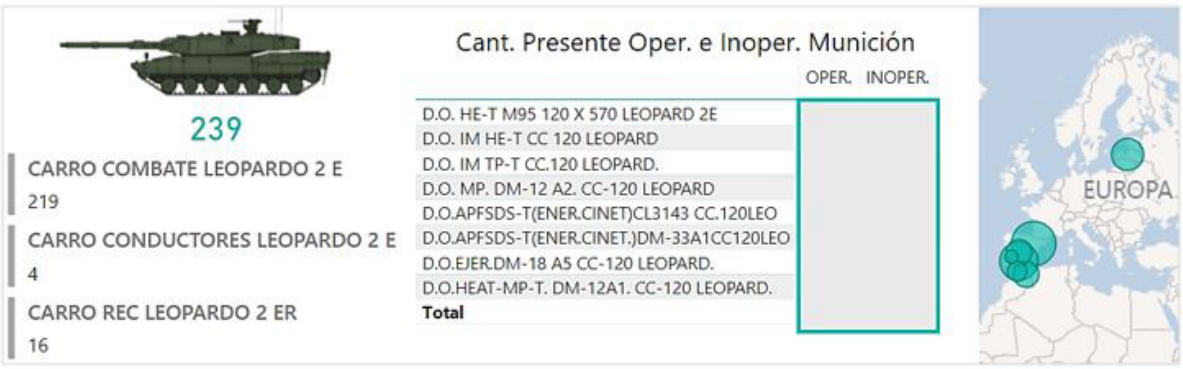


Figura 5. Potencia de fuego de un material.

6. Conclusiones

El sistema obtenido permite consultar de forma instantánea (segundos o milisegundos) todo el procesamiento de la información del casi millón de artículos (seriados o loteados) del inventario de ET actualizada en tiempo útil (diario), independientemente de la clase de material. Además es totalmente configurable según las necesidades de cada usuario, ya sea a través de hoja de cálculo conectada al modelo o con la herramienta de BI específica (gratuita y sin necesidad de adquirir licencia de usuario) que se utiliza para la realización de informes.

Por otra parte, esta metodología es fácilmente exportable a cualquier otro tipo de proceso de información, mediante la creación del correspondiente modelo multidimensional que contemple las necesidades del usuario.

Así pues, como ya se ha expuesto inicialmente, las actividades anteriormente descritas, entran de lleno en la innovación tecnológica del documento ETID 2015.

Agradecimientos

Por creer e impulsar este modelo todo nuestro agradecimiento a la Secretaría General Mando de Apoyo Logístico del Ejército de Tierra (SEGENMALE), así como a su Sección de Sistemas de Información (SESI), por liderar la mejora y facilitar, tanto los recursos como integración de este innovador modelo en la plataforma de analítica de datos anuBIs.

Referencias

1. *Rodríguez-Sánchez, R., & Sols-Candela, A., & Diaz-Osto. P (2018). The Implementation of a Business Intelligence Platform to Leverage the Army Logistics Support Command's Balanced Scorecard – A Case Study. 28th INCOSE International Symposium Washington, DC, USA.*
2. *Rodríguez-Sánchez, R., & Muñoz-Nuño, F. J. (2016). Modelo Predictivo para Pruebas de Vigilancia de Municionamiento basado en técnicas de Minería de Datos (Data Mining). IV Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, Murcia (Spain).*
3. *Project Management Institute (2017). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide), 6th edition.*

Impacto de las tecnologías disruptivas en los futuros sistemas de mando y control para la defensa y la seguridad

Pérez-Martínez, Félix

Grupo de Microondas y Radar, Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Information Processing and Telecommunications Center. E.T.S.I. de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid. Av. Complutense n.º 30. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid. fperez@etsit.upm.es (FPM).

Resumen

El fenómeno de la «transformación digital», la implantación masiva de las nuevas tecnologías de la información y comunicaciones (TIC), está cambiando la mayor parte de las actividades humanas y también lo hará con las del sector de la defensa y la seguridad. Los sistemas de mando y control (SC2) serán de los primeros en sufrir esta transformación.

En esta ponencia se analiza el impacto que la introducción de las tecnologías disruptivas que en estos momentos se consideran más prometedoras en el ámbito TIC tendrán sobre los SC2. Para ello, partiendo de los trabajos de Gartner y otros similares, se seleccionan y describen brevemente las principales tecnologías disruptivas susceptibles de ser incorporadas en los SC2 y se realiza un análisis especulativo sobre la estructura de las futuras arquitecturas y funcionalidades de la siguiente generación de SC2. Un aspecto esencial de este análisis es el impacto de los desarrollos tecnológicos realizados en los sectores civiles sobre la evolución de los sistemas militares y particularmente en los sistemas objetos de este trabajo.

Palabras clave

Tecnologías disruptivas, sistemas de mando y control, C4ISTAR, tratamiento masivo de datos, inteligencia artificial, redes cognitivas.

1. Introducción

La función de mando y control (C2 en el ámbito militar) es la base sobre la que se planean, desarrollan y ejecutan las misiones y operaciones; constituye uno de los componentes esenciales en las acciones militares y es responsable en buena medida del resultado de las mismas. En los actuales escenarios de conflicto, su ejercicio requiere unos sistemas de información y comunicaciones (más o menos complejos) que permitan/faciliten la recogida y procesamiento de la información y la transmisión de las órdenes.

Tal como muestra la figura 1, los SC2 se componen de: a) sensores que captan los datos e informaciones procedentes del teatro de operaciones; b) centros o unidades de mando y control que procesan los datos e informaciones disponibles y los convierten en información y conocimiento útil para el desarrollo de la misión; y c) actuadores que ejecutan las acciones necesarias para llevarla a cabo con éxito. Nadie cuestiona que en los futuros conflictos la adecuada obtención y utilización de la información será un factor esencial para asegurar el éxito de las acciones, es lo que se conoce como «superioridad de la información», obtenida mediante la aplicación intensiva de las TIC.

Figura 1. Infraestructura básica de un sistema SC2.

La «transformación digital», un fenómeno asociado al desarrollo e implantación de las nuevas TIC, está cambiando la mayor parte de las actividades humanas. Tras los temores y rechazos iniciales, ahora se percibe como una oportunidad para incrementar exponencialmente la eficiencia de los procesos, una oportunidad que de no aprovecharse dejará a las organizaciones y empresas fuera de juego en un nuevo escenario globalizado donde la rapidez, adaptabilidad y escalabilidad son imprescindibles para sobrevivir. El sector de la defensa y la seguridad no será la excepción y los S2C, por sus especiales características, serán los primeros en sufrir esta transformación.

En este trabajo, a partir de los trabajos de Gartner [1] y otros similares, se seleccionan y describen brevemente las principales tecnologías disruptivas susceptibles de ser incorporadas en los sistemas C2. Posteriormente se analizan las características básicas de estos sistemas y su evolución deseable a partir del análisis de algunos documentos de referencia de diversas fuentes: DoD de EE. UU., OTAN, sistema de observación y prospectiva tecnológica de la DGAM, web de las principales empresas suministradoras, etc. [2], [3] y [4] por ejemplo, para concluir con un análisis especulativo sobre el impacto que tendrán sobre las futuras arquitecturas y funcionalidades de las siguientes generaciones de SC2. Unas conclusiones de carácter general completan este trabajo.

2. Tecnologías TIC duales y disruptivas

La rapidez de introducción y desarrollo de las TIC, así como la capacidad de transformación que supone su aplicación, se explican a partir de alguna de sus características: a) rompen las barreras espaciales y temporales, mediante infraestructuras de telecomunicación que permiten operar en cualquier punto geográfico y en tiempo casi real; b) de la mano del *software*, flexibilizan y adaptan la operaciones adaptándolas a las circunstancias de cada momento; c) facilitan la interacción y aportan inteligencia adicional a las decisiones humanas; d) reducen los costes… y un largo etc. que las convierten en factores multiplicativos de las actividades humanas, simplificando e incrementando la eficacia de los procesos. Obviamente, la defensa y la seguridad no pueden ser ajenas a esta realidad.

Figura 2. Hiperciclo de Gartner para las tecnologías emergentes en el año 2017 [1].

El hecho de que la gestión de muchas actividades humanas requiera procedimientos de dirección y control implica la dualidad civil-militar de las tecnologías implicadas en los SC2. Es algo que se está incrementando, no sin reticencias, en los últimos años y que, en opinión del autor de este trabajo y por razones tecnológicas y económicas, es un fenómeno imparable.

Los «hiperciclos» de Gartner [1] son una previsión –bastante reconocida y prestigiada– de la evolución de las tecnologías emergentes. En la figura 2 se presenta el último disponible que corresponde al año 2017. Nótese que la mayor parte de las tecnologías incluidas son de aplicación a los sistemas C2 y que en los próximos diez años, si la previsión se cumple, estarán una buena parte de ellas disponibles para configurar unos sistemas radicalmente diferentes a los actuales SC2.

Estamos hablando de tecnologías como: realidad virtual y aumentada, seguridad definida por *software*, asesores cognitivos, computación cognitiva, aprendizaje máquina, aprendizaje profundo, asistentes virtuales, computación en el borde, decisiones aumentadas, espacios de trabajo inteligentes, «displays» volumétricos, interfaces computador-cerebro, computación cuántica, inteligencia artificial generalizada, comunicaciones 5G… Todas ellas son tecnologías de directa aplicación en SC2 pero que en el informe no se plantean para aplicaciones militares sino civiles.

Por otro lado, en la figura 3 se presentan algunas tecnologías que se están desarrollando muy rápidamente en el ámbito civil y cuya aplicación en el ámbito C2 es inmediata. En muy pocos años generarán lo que se conoce como ecosistemas 4.0 cuya característica es que son *inteligentes* y por ello, en buena medida pueden sustituir a las personas y, por tanto, superar sus limitaciones.

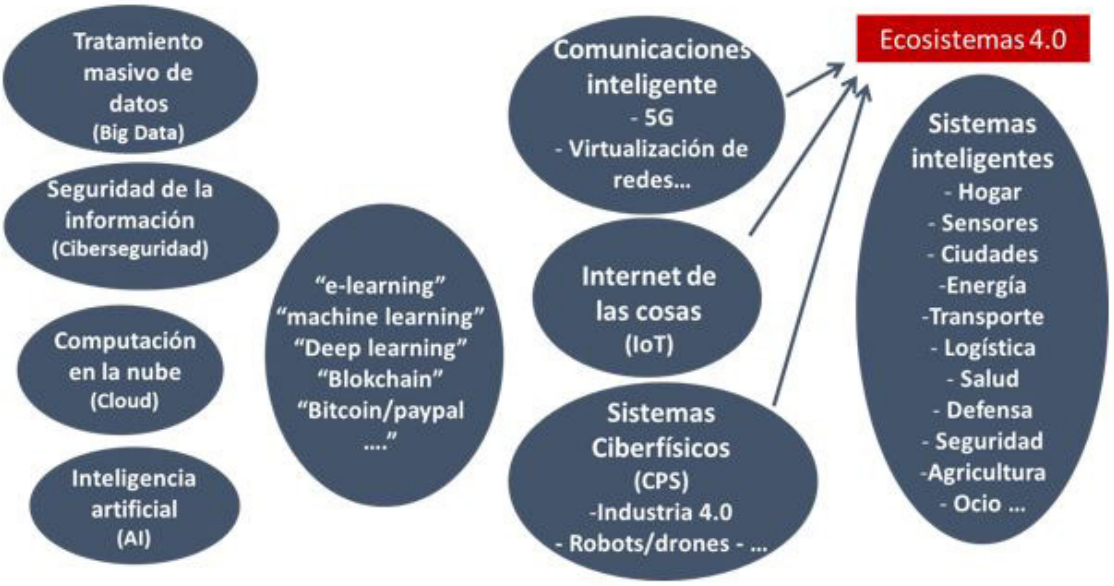


Figura 3. Algunas tecnologías/palabras clave para la sociedad digital… y los SC2.

3. Características de la próxima generación de SC2

En los últimos años el contexto de los conflictos ha evolucionado hacia una gran complejidad como consecuencia de múltiples factores: la globalización, los cambios demográficos y de entorno, la descomposición de algunos Estados, la propagación de ideologías y movimientos radicales, la aparición de nuevos entornos de conflicto –como el ciberespacio-, la escasez de algunos recursos… y un largo etc. Además de los conflictos *convencionales* han aparecido nuevos tipos como los *asimétricos*, de creciente sofisticación a medida que se facilita y abarata el acceso a las tecnologías emergentes, e *híbridos*, donde los enfrentamientos se libran simultáneamente en los ámbitos militar y civil. Todo lo cual implica unos

cambios muy significativos en la concepción en los equipos y sistemas que soportan las funciones de mando y control. Entre otros los que se describen a continuación.

Estructura descentralizada

Hasta ahora, cada una de las unidades y plataformas que operan en el campo de batalla han tenido su propio subsistema de mando y control, reportando sus acciones y recibiendo las órdenes desde centros de mando y control de un nivel superior, una estructura centralizada de mando y control en la que los flujos de datos y órdenes pasan necesariamente por los nodos de mayor nivel. En el futuro la estructura será descentralizada, en ella un conjunto de sensores –en muchos casos conectados entre sí para optimizar su operación– aportarán la información obtenida a un entorno de intercambio de información que hará llegar a los diferentes centros de mando aquella que sea relevante, tras procesarla, para transmitir así las órdenes al conjunto de actuadores para su ejecución.

Flexibilidad y adaptabilidad de las operaciones de mando y control

Como ya se ha expuesto, las fuerzas desplegadas en los entornos de conflicto se enfrentarán a situaciones poco previsibles y cambiantes. Los sistemas de mando y control, las comunicaciones y demás componentes deben caracterizarse por una gran flexibilidad de operación para adaptarse en cada momento a las circunstancias particulares en cada zona de operación. De ahí el interés de estudiar, y adoptar en su caso, soluciones técnicas desarrolladas antes en ámbitos civiles para responder a situaciones similares. Un ejemplo paradigmático –con importantes matices y diferencias– es Internet, la red de redes del ámbito civil, y los sistemas de gestión que en base a ella se están creando en las grandes corporaciones empresariales [5].

Transformación de arquitecturas orientadas a plataformas a arquitecturas orientadas a servicios

Otro cambio muy significativo está asociado al diseño e implementación de las arquitecturas. Hasta ahora era habitual orientarlas a las características propias de las plataformas involucradas. Por el contrario, en los próximos años se deberán diseñar basándose en la interoperabilidad de sistemas orientados a servicios. En estas arquitecturas se gestionan un conjunto de recursos que, a través de un interfaz de comunicación claramente definido, deben proporcionar servicios específicos a las aplicaciones que se lo soliciten.

Con estas arquitecturas se superan las limitaciones propias de las orientadas a las plataformas, tales como las dificultades de reutilización de equipos y sistemas, duplicidad de funciones entre sistemas diferentes, falta de compatibilidad entre versiones, carencias en la definición de interfaces, etc.

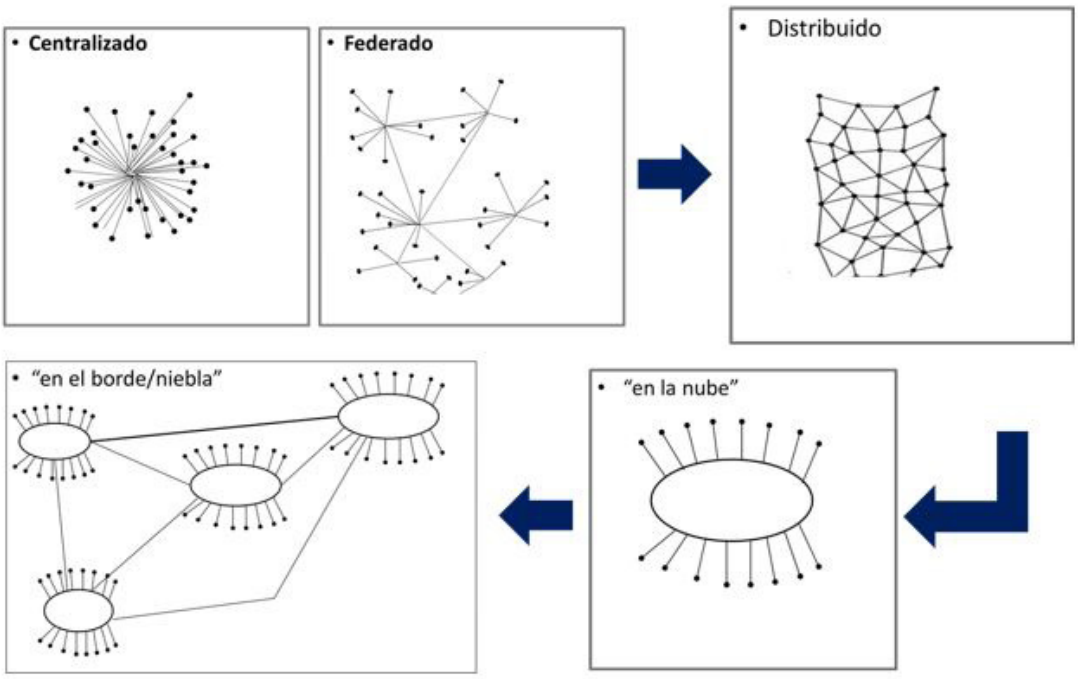


Figura 4. Arquitecturas de los SC2.

En la figura 4 se presenta la evolución de las arquitecturas de las redes de comunicación requerida por las diferentes técnicas de computación características de los futuros sistemas CIS. Inicialmente los sistemas eran centralizados, la necesidad de interconectarlos de una forma fácil e interoperable llevó al concepto de sistemas federado (término creado por la OTAN para resolver los enormes problemas que surgieron en las primeras misiones multinacionales con la integración de los diferentes sistemas C2). En el futuro nuevas arquitecturas de computación en el borde y en la niebla (*edge and fog computing*) permitirán el tratamiento masivo y eficaz de ingentes cantidades de datos. Será la antesala de un cambio mucho más radical: la computación cuántica (*quantum computing*) que hará uso de los estados cuánticos de partículas subatómicas para realizar operaciones con datos. Son arquitecturas que están implementándose muy rápidamente en el ámbito civil.

Escalabilidad, transnacionalidad y capacidad de interconexión externa

El concepto NEC, el de los futuros SC2 transnacionales, se aplica en los diferentes niveles y es escalable por agregación de infraestructuras de redes y sistemas de información, tanto propietarios como contratados, de forma permanente o eventual. Se extiende desde nivel político-estratégico hasta el nivel táctico. De hecho, puede concebirse como una «Intranet» militar, multinacional, evolutiva y basada en una federación de sistemas, sean nacionales, de la OTAN o de otros aliados. Además debe poder conectarse con el exterior, con las restricciones adecuadas, incluyendo *interfaces* de servicios entre naciones OTAN, agencias OTAN, naciones de coalición, ONG, etc. Un ejemplo es la arquitectura del sistema C2 de la Unidad Militar de Emergencias de España [6].

Incremento exponencial de las necesidades de transmisión de información y optimización del ancho de banda disponible

El desarrollo espectacular durante los últimos años de las capacidades de obtención de información de los nuevos sensores, unido al objetivo de asegurar que cada elemento del sistema de mando y control disponga de la información precisa en el momento adecuado, se traduce en un incremento exponencial del ancho de banda requerido. La experiencia, tanto en el ámbito civil como en el militar, demuestra que todo aumento de ancho de banda es rápidamente ocupado. De hecho, son las comunicaciones el cuello de botella de los actuales sistemas.

El espectro es un recurso limitado que todos los sistemas de comunicación se disputan. En el campo de operaciones su disponibilidad y adecuada utilización es un aspecto crítico para asegurar el éxito de la misión. El cada día más popular concepto de «control inteligente del espectro» recoge la necesidad de desarrollar técnicas y equipos capaces de optimizar el consumo del espectro, especialmente el espectro radioeléctrico, que debe compartirse con muchos usuarios y organizaciones cuyos sistemas soportan todo tipo de actividades.

Es necesario resaltar la importancia que tiene lo indicado en el párrafo anterior pues sin el suficiente ancho de banda es imposible conseguir la «agilidad» requerida por los futuros SC2. En la figura 5 se describe uno de los modelos conceptuales del C2 definido por la OTAN [7]. Puede comprobarse que

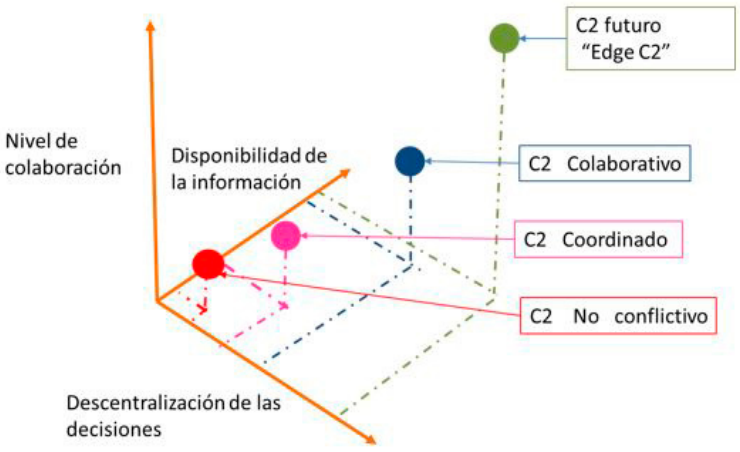


Figura 5. Modelo conceptual del C2 de la OTAN.

el ancho de banda es uno de los elementos esenciales para elevar el nivel de colaboración y con ello la eficacia de la función C2. El «*edge* C2» es el futuro e implica una distribución distribuida de decisión y derechos, patrones de interacción no restringidos y una amplia difusión de información. En todo caso, los futuros sistemas C2 pueden ocupar varias regiones en este continuo, dependiendo de la naturaleza de la misión.

Importancia de la calidad del servicio (QOS)

La calidad del servicio, o mejor la percepción de la satisfacción del usuario con el servicio utilizado, es una nueva característica exigida a las nuevas infraestructuras para los SC2. La tecnología permite, y el usuario exige, controlar y optimizar los diferentes segmentos de las comunicaciones y los complejos sistemas de información empleados. La fiabilidad y latencia exigidas en un futuro serán muy elevadas.

Utilización de tecnologías civiles

En la «sociedad gigital» o «del conocimiento», en la que la actividad económica y social es soportada por grandes y complejos sistemas de información y comunicaciones, es impensable concebir el desarrollo de los futuros SC2 sin basarlo en un elevado porcentaje en tecnologías ya desarrolladas y aplicadas a actividades civiles. Lo que no quiere decir que no sean necesarias nuevas tecnologías específicas o importantes modificaciones sobre las empleadas en unas aplicaciones que no tienen las restricciones de las utilizadas en el sector de la defensa y la seguridad.

4. Futuros sistemas de mando y control

Cómo todo ejercicio especulativo en ámbitos tecnológicos no es fácil acertar, pero lo cierto es que los análisis y las opiniones de muchos analistas convergen. Serán sistemas varios órdenes de magnitud más eficientes que los actualmente operativos y los retos que se precisa superar, entre otros, son los siguientes:

- ***Integración de tecnologías de análisis de datos, aprendizaje automático e inteligencia artificial*** para la obtención y valorización de la información disponible (incluyendo la monitorización masiva del entorno espacial y temporal de la crisis), detección temprana de los movimientos/ataques del adversario y despliegue de sistemas de respuestas automáticas.
- ***Desarrollo de plataformas escalables, robustas y seguras*** para captura/tratamiento de flujos de datos heterogéneos y espacialmente dispersos y generación/transmisión inteligente de las órdenes.
- ***Desarrollo de nuevas técnicas y redes de interconexión basadas en tecnologías cognitivas y subsistemas de gestión del conocimiento*** que incluirán la detección del estado emocional y análisis de la carga de trabajo de los combatientes en escenarios de crisis y acciones operativas.

5. Conclusiones

En uno de los párrafos del informe de Gatrner citado [1] se indica que «las tecnologías de inteligencia artificial serán las más disruptivas en los próximos 10 años debido al incremento radical de la potencia computacional, la disponibilidad de grandes cantidades de datos (casi infinitas) y los avances sin precedentes en redes neuronales profundas; esto permitirá que las organizaciones con tecnologías de inteligencia artificial aprovechen los datos para adaptarse a situaciones nuevas y resolver problemas que nadie ha encontrado anteriormente». La aplicación de este párrafo a los SC2 y el contenido de este trabajo, nos permite afirmar que, en los próximos años, los sistemas de C2 evolucionarán a gran velocidad y serán uno de los elementos básicos de la transformación digital en el sector de la defensa y la seguridad, además una buena parte de la tecnología utilizada se desarrollará en el ámbito civil. A la misma conclusión llega el Departamento de Defensa de los EE. UU. [8].

Referencias

1. *https://www.gartner.com/newsroom/id/3784363*
2. *Future of Command and Control. Concept Note 2/1. The Development, Concepts and Doctrine Centre of the Ministry of Defence UK. 2017. Disponible en https://www.gov.uk/government/collections/joint-concept-note-jcn*
3. *Network centric warfare. network enable capability. Monografías del Sistema de Observación y prospectiva Tecnológica (SEOP) del Ministerio de Defensa. Catálogo General de Publicaciones Oficiales. 2009. Disponible en https://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/Lists/Publicaciones/Attachments/10/monografia_sopt_3.pdf.*
4. *De Spiegeleire S., Maas M., Sweijs T. Artificial intelligence and the future of Defense. The Hague Centre for Strategic Studies (HCSS). 2017. Disponible en https://hcss.nl/report/artificial-intelligence-and-future-defense*
5. *Josh Bersin J., McDowell T., Rahnema A., Van Durme Y. The organization of the future: Arriving now. 2017 Global Human Capital Trends. 2017. Disponible en https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/human-capital-trends/2017/organization-of-the-future.html*
6. *Unidad Militar de Emergencias. Ministerio de Defensa de España. 2014. Disponible en http://www.ume.mde.es/Galerias/dossier/Descargas/dossier_2014_web.pdf*
7. *Presa C., Perking W. A. Air Warfare Communication in a Networked Environment. Joint Air Power Competence Center. NATO. 2017. Disponible en https://www.japcc.org/portfolio/air-warfare-communication-in-a-networked-environment/*
8. *Summary of the 2018 National Defense Strategy of The United States of America. 2018. Disponible en https://dod.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/2018-National-Defense-Strategy-Summary.pdf*

Control de sistemas de posicionamiento mediante BCI

Rodríguez Bermúdez, Germán[1,*], López Belchí, Alejandro[1], Serna Serrano, José[1], Alonso del Marre, Samanta[2] y Le Pellec, Gael[2]

[1.] Centro Universitario de la Defensa de San Javier, C\ Coronel López Peña s/n. Correo electrónico: german.rodriguez@cud.upct.es (GRB), alejandro.lopez@cud.upct.es (ALB), jose.serna@cud.upct.es (JSS).

[2.] École de l'air. Base aérienne 701. Chemin de Saint Jean. 13661 Salon De Provence. Correo electrónico: samanta.delmarre@ecole-air.fr (SDM), gael.le-pellec@ecole-air.fr (GLP).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: german.rodriguez@cud.upct.es (GRB).

Resumen

El presente trabajo muestra una potencial aplicación de los sistemas BCI (interfaz cerebro-ordenador) para el posicionamiento de elementos móviles con sistemas de desplazamiento automatizado, en particular se considera una novedosa aplicación en el ámbito aeronáutico-militar para tareas de reabastecimiento en vuelo. Se ha implementado la adaptación de un sistema BCI para el análisis en tiempo real de señales cerebrales, tanto de forma individual como colaborativa. Este sistema, tras un proceso de entrenamiento y adaptación al usuario, permite el control de sistemas mecánicos a la vez que se realizan tareas de vuelo. En el caso estudiado se ha empleado como sistema una guía lineal con servomotores, controlada vía *software*, habiendo modificado dicho *software* para permitir su comunicación con el sistema BCI (tanto de forma local como remota) así como el tratamiento de la información proporcionada por este último para convertirla en una señal de movimiento.

Palabras clave

Brain Computer Interface, guía, posicionamiento, electroencefalograma (EEG), control en tiempo real.

1. Introducción

El estudio del cerebro humano y las señales eléctricas que son generadas por el mismo han sido objeto de investigación a nivel mundial desde que, en 1924, Hans Berger grabara en Alemania por primera vez la actividad del cerebro humano. Con el devenir de los años, el estudio de estas señales no se redujo a una comprensión de las mismas sino que se amplió a sus potenciales usos. Un sistema de interfaz cerebro-ordenador (BCI) es una herramienta de interacción entre una persona y su entorno a través únicamente de la actividad cerebral. De hecho, permite la canalización de las fluctuaciones de la actividad cerebral, registradas a través de un electroencefalograma, con el fin de transmitir un mensaje [1].

Las aplicaciones potenciales de estos sistemas son innumerables. Por ejemplo, en el campo médico, el BCI puede ayudar a los discapacitados, ya que ofrece la capacidad de controlar un dispositivo externo, como una silla de ruedas o una prótesis, gracias a señales generadas por el cerebro, y, por lo tanto, puede incrementar su calidad de vida. Otro campo de aplicación directa del BCI es el entretenimiento. Los juegos y los entornos de realidad virtual están recibiendo gran atención por parte de los investigadores en este campo.

Dentro de las potenciales aplicaciones de estos sistemas se encuentran algunas directamente relacionadas con las Fuerzas Armadas [2]. Las computadoras y los seres humanos ya se están empezando a estudiar como partes complementarias de un mismo equipo: la Organización de Ciencia y Tecnología de la OTAN realizó un estudio en el que un humano y una computadora analizaron conjuntamente los datos de un sonar, reduciendo el tiempo de análisis y las confusiones cometidas [2].

Con la génesis de nuevas tecnologías y el desarrollo de las ciencias de la computación, la realidad se está poniendo al día con la ciencia ficción, y campos como el control mental o la telepatía están siendo seriamente explorados, planteándose preguntas como si en unos años, un piloto de una Fuerza Aérea podría pilotar un avión solo imaginando que lo hace.

Este trabajo presenta un experimento para controlar el movimiento de un sensor que permite medir la velocidad de una corriente de aire generada en el túnel de viento del Centro Universitario de la Defensa de San Javier [3], mediante el análisis de la actividad cerebral del participante. El objetivo del experimento es controlar el movimiento de una guía motorizada que monta el referido sensor hacia la izquierda o hacia la derecha, utilizando un sistema BCI que analiza la señal EEG y genera los comandos de movimiento a derecha e izquierda en tiempo real. Una posible aplicación militar de esta tecnología sería controlar un sistema *flying boom* en las maniobras de reabastecimiento de combustible aire-aire (ver figura 1). Uno podría imaginar la regulación de la posición del *boom* o pértiga retráctil mediante un sistema de guía lineal motorizada controlada por un sistema BCI. Esta tecnología permitiría al piloto mantener su avión en las condiciones de vuelo deseadas, posicionando las manos en los controles de vuelo, al tiempo que genera los comandos necesarios para controlar la posición de la pértiga a través de su EEG. De esta forma, podría realizar ambas tareas simultáneamente, reduciendo la tripulación de vuelo, al no ser necesario un agente exclusivo para controlar la pértiga.

En general, el sistema presentado en este trabajo permitiría controlar cualquier acción que requiera un movimiento de un sistema físico en 2 posibles direcciones mediante señales cerebrales. Por tanto, parece de gran interés reflexionar sobre una posible aplicación de los sistemas BCI a entornos militares actualmente inexplorados. Siendo conscientes del poco grado de madurez de estos sistemas en aplicaciones reales y que su horizonte temporal de aplicación es el medio-largo plazo, nos encontramos en una de las fronteras tecnológicas que, de ser superada, aquellas fuerzas armadas que hayan invertido en investigación en la misma se encontrarían en una posición ventajosa.

Figura 1. Modelo conceptual del C2 de la OTAN.

2. Diseño del experimento

2.1. Hardware

El sistema BCI presentado en este trabajo se ha implementado haciendo uso de un casco inalámbrico de la firma Neuroelectrics (figura 2a) de 8 canales con electrodos secos situados en F3, F4, T5, C3, Cz, C4, T6 y Pz según el sistema de referencia 10/20 por ser las zonas de interés para la tarea motora a imaginar (figura 2b). El propio casco incluye un sistema de adquisición y amplificación de señales de EEG con transmisor inalámbrico (*bluetooth*) que envía las señales a un ordenador para su posterior procesado.

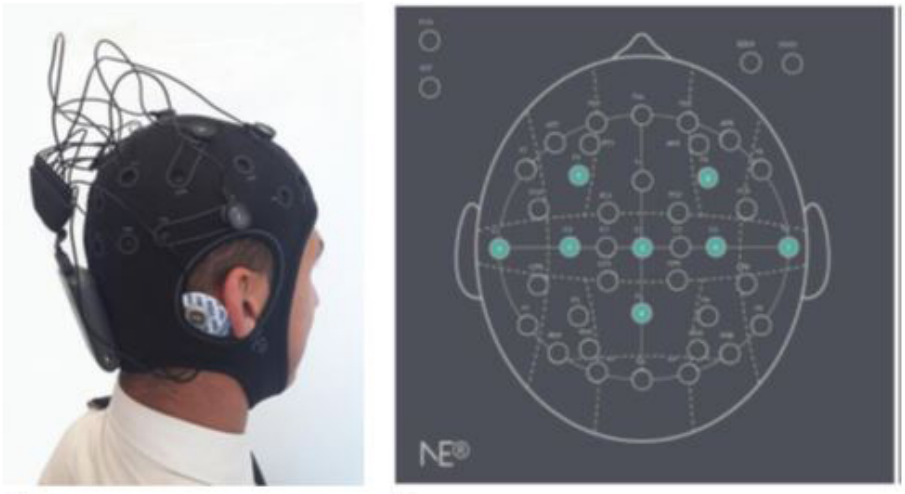


Figura 2. a) Equipo de adquisición de EEG y b) Ubicación de los electrodos según sistema de referencia 10/20.

Para la guía lineal motorizada se empleó una guía TopDirect SFU1605 de 300 mm de carrera con motor paso a paso NEMA23 modelo ST57H5605. La señal de alimentación del motor es proporcionada por el controlador de Leashine Technology Corporation DM 542. Este, a su vez, recibe la señal de control, de tipo PWM (*pulse width modulation*), de una placa Arduino Mega conectada al ordenador de control de la guía. En este ordenador existe un *software* desarrollado en entorno MATLAB *ad hoc* para este sistema mecánico que permite que un usuario comande la posición deseada de la guía y que se ha adaptado para su uso con el sistema BCI. El conjunto de la guía y sus elementos de control se muestra en la figura 3.

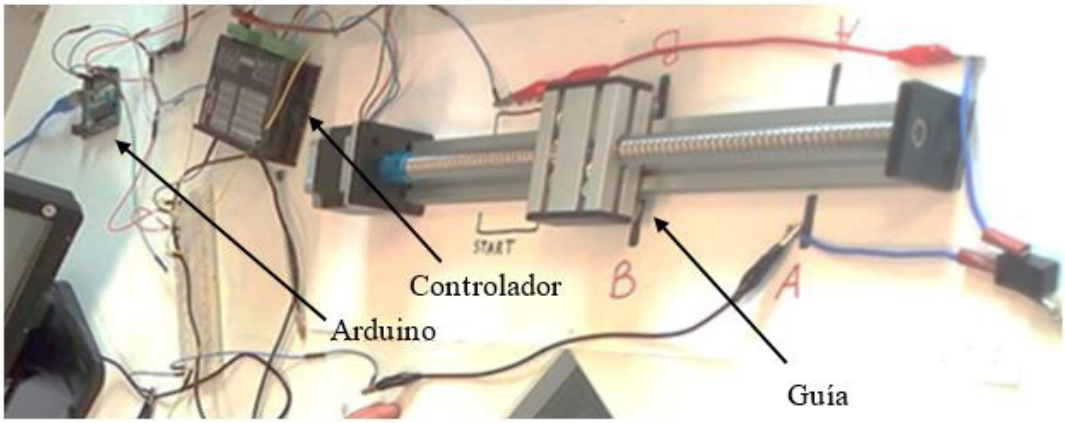


Figura 3. Elementos empleados para la guía lineal.

2.2. Protocolo del experimento y generalidades del proceso de las señales EEG para BCI

Cada usuario realizó una sesión de entrenamiento de BCI previa a los experimentos objeto de estudio. En esta sesión se hace uso de un *software* desarrollado en MATLAB en el CUD de San Javier. La sesión de entrenamiento se compone de 40 repeticiones (20 a derecha y 20 a izquierda) en las que el sujeto imagina que realiza un movimiento con las manos al lado que indica un monitor mediante flechas de forma aleatoria.

A partir de las señales EEG adquiridas se calculan los valores de las potencias en las bandas (regiones de la representación en frecuencia de las mismas) alfa (8-13Hz, 30-50mV) y beta (13-30Hz, 5-30mV) [4]. Las potencias referidas anteriormente serán lo que en la literatura especializada se conocen como características del experimento, por la naturaleza del mismo, al estar centrado en el movimiento de las extremidades, no se ha realizado un proceso más complejo de extracción de características. En un segundo paso, se procede a realizar un ajuste de pesos de un clasificador de las características anteriores para discriminar los movimientos realizados por el sujeto. Se ha empleado un clasificador LDA (*Linear Discriminant Analysis*) [1] para la sesión de control de la guía, que será el empleado, posteriormente, en los ensayos. Este tipo de clasificadores, que buscan una combinación lineal de las características para delimitar la frontera entre clases (en este caso movimiento a la derecha y movimiento a la izquierda) exige un proceso de entrenamiento para identificar los parámetros de las distribuciones normales en que se basa su formulación [1].

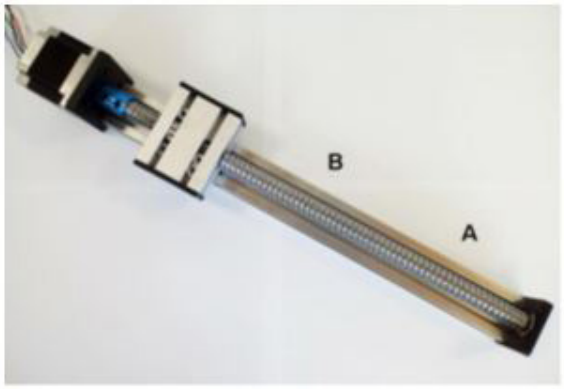


Figura 4. Guía con carro a controlar y puntos de referencia para el experimento.

Finalizada la sesión de entrenamiento, el sujeto se ubicaba frente a la guía (ver figura 4) que debía mover únicamente imaginando que usaba sus manos, pero sin realizar ningún movimiento. Su objetivo era mover la guía al punto A, posteriormente al B y, finalmente, a un punto medio entre A y B. Al ver el usuario en todo momento los movimientos que el sistema realizaba en base a sus señales cerebrales, tenía realimentación directa, con lo que este podía modular su forma de pensar para incrementar la eficiencia de todo el conjunto. El proceso de las señales cerebrales para discriminar el movimiento siguió el algoritmo comentado en el párrafo anterior, con la extracción de las potencias en las bandas alfa y beta y el uso del clasificador LDA previamente ajustado en la sesión de control.

2.3. Software y comunicaciones

Dado que se emplean *software* y computadoras diferentes para la adquisición de señales cerebrales y el movimiento de la guía, los comandos de control deben ser enviados desde la máquina que contiene el *software* BCI a la que realiza el movimiento físico del sistema. La figura 5 muestra un esquema general de la transferencia de datos entre las computadoras para implementar todo el sistema, siendo el PC1 el que soporta el BCI y el PC2 el que controla la guía. Es importante destacar que la comunicación entre ambos sistemas se produce por UDP.

En la figura 5 se puede observar que el *software* en el PC2 está desarrollado en Matlab y debe ser inicializado por el usuario. Este comanda el puerto serie (COM) en que se encuentra la guía lineal, la dirección IP de la computadora y el parámetro pulsos por revolución. Este último controla la velocidad y la precisión de movimiento de la guía. A mayor valor de este parámetro (máx: 25.600 pulsos/rev) se tiene una mayor precisión con un movimiento más lento, lo contrario para valores menores (mín: 400 pulsos/rev). Es importante hacer notar que este parámetro debe coincidir con el valor cargado en la configuración del microcontrolador Arduino para la generación de señales PWM. Una vez que los parámetros están convenientemente introducidos, se inicia el movimiento de la guía (*Start experiment* en PC2). El sistema lleva la guía a la posición inicial del movimiento, aparece una interface donde se muestra la posición de la guía y se queda a la espera de recibir la información postprocesada del sistema BCI. Esta información consiste en dos parámetros:

- el sentido del movimiento: derecha o izquierda,
- la intensidad del comando o distancia de movimiento: es el valor generado por el clasificador LDA comentado en el epígrafe 2.2. Este valor está normalizado para encontrarse en el intervalo [0,1]. Es importante destacar que en este experimento se han definido unos valores de decisión umbrales para generar el movimiento de la guía. Esto es, si la salida del clasificador lineal supera un valor umbral previamente definido en función de la respuesta del usuario en pruebas preliminares, se produce movimiento en la guía y si no supera dicho umbral mantiene su estado anterior de acuerdo con los datos recibidos. Este valor umbral es configurable por el usuario.

Una vez que la guía está preparada para iniciar el movimiento, el usuario inicializa el *software* del PC1 que gestiona el sistema BCI. En este caso el usuario selecciona si se trata de una sesión de entrenamiento (en cuyo caso no se hace uso de la guía) o de un ensayo real. El *software* obliga a que exista una sesión de entrenamiento anterior a la realización de un ensayo para el ajuste de los parámetros del sistema (clasificador). Durante el ensayo, el *software* del PC1 realiza las adquisición de señales EEG, su extracción de características y aplica el clasificador previamente ajustado, enviando, como se comentó anteriormente, los parámetros sentido e intensidad del movimiento al PC2 haciendo uso del protocolo UDP. Adicionalmente, este *software* presenta en pantalla la posición de la guía (el sujeto del ensayo no ve el *software* sino la guía, cuyo movimiento tiene que conseguir) y si se está generando señal de movimiento, esto permite al investigador tener conocimiento de las acciones realizadas por el sujeto desde una posición remota, sin tener que interferir visualmente ni generar molestias al usuario para poder ver la guía.

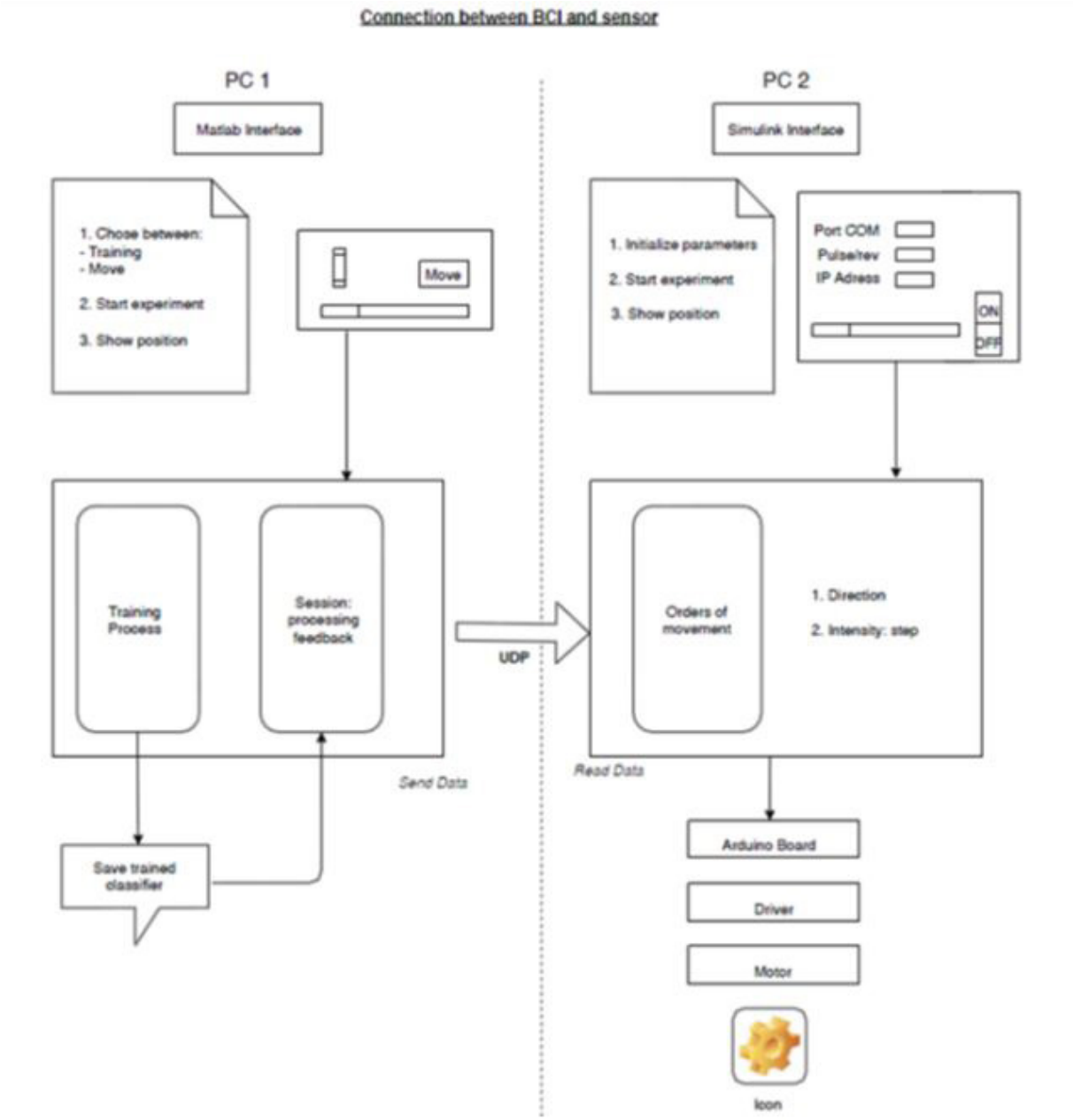


Figura 5. Esquema de transferencia de datos para mover el sensor.

3. Resultados

Con el paradigma presentado anteriormente se puede determinar si un sujeto realmente consigue controlar el movimiento y posicionamiento de un sistema motorizado mediante BCI, en particular, en el experimento realizado, el sujeto primero debe concentrarse en imaginar que mueve la guía desde la posición inicial hacia la derecha, posteriormente a la izquierda y, finalmente detener la guía en la zona central de la misma. Para realizar la referida secuencia de movimientos, el recorrido total realizado por el carro de la guía se ha calculado en 37 cm. El sistema se ha configurado con un valor del parámetro pulsos por revolución de 400 pulsos/rev, que corresponde a una velocidad lineal del carro de 6.125 mm/s. Con estos parámetros resulta que una secuencia perfecta se conseguiría en un tiempo aproximado de 1 minuto. Dado que el sistema se encuentra en una fase muy inicial de desarrollo se estableció un límite de 4 minutos para realizar toda la tarea por parte del usuario para considerar que el experimento se ha realizado satisfactoriamente.

La tabla 1 muestra los resultados de los dos sujetos que han realizado el experimento a fecha de publicación del presente trabajo. En esta tabla se indica, en la primera columna, los nombres de los sujetos, en la segunda, el éxito o fallo en la consecución de la tarea y, en las siguientes columnas, el tiempo desde el inicio del experimento hasta el paso por las diferentes estaciones objetivo del experimento (siendo los movimientos origen à B à A à B). Se puede observar la complejidad de la realización de la tarea dado que únicamente el primer sujeto, en su segundo ensayo, consigue realizar la tarea completa dentro del intervalo temporal previsto para ello.

		B	A	B
Gaël	X	1'36"		
	✔	27"	2'47"	3'24"
Sergio	X			

Tabla 1. *Resultados.*

Evidentemente, el sistema requiere una población mayor de sujetos experimentales antes de sacar conclusiones sobre su viabilidad, así como pruebas sistemáticas con diferentes tipos de clasificadores, ajustes de los mismos y el uso de técnicas de reajuste de los parámetros del sistema BCI en tiempo real, con la realimentación recibida del propio sistema en función del grado de consecución de los movimientos deseados. Sin embargo, el hecho de que un sujeto, con solo 2 ensayos, haya sido capaz de realizar la tarea satisfactoriamente, permite pensar de manera optimista sobre el potencial uso de esta tecnología para el control de sistemas mecánicos mediante BCI, una vez que el sujeto ha seguido una rutina de entrenamiento suficiente que se implementaría en fases de entrenamiento aeronáutico avanzado.

4. Conclusiones

Se ha presentado un sistema BCI para el movimiento en dos direcciones de un sistema mecánico motorizado. Este sistema ha sido realizado íntegramente (excluyendo el *hardware* asociado a la adquisición de señales EEG) en el Centro Universitario de la Defensa de San Javier, incluyendo la selección de los elementos del sistema mecánico, su interconexión, y el desarrollo de *software* específico para el movimiento del mismo, así como el *software* de procesado de las señales BCI y los algoritmos de entrenamiento y calibración del clasificador de características. El sistema hace uso de computadoras diferentes para la adquisición de señales BCI y el movimiento del sistema, comunicándose ambas mediante protocolo UDP, esto permitiría tener las computadoras en su ubicación óptima para la tarea a realizar (p.ej., una en la cabina de la tripulación y otra en las proximidades de una pértiga de reabastecimiento). En los ensayos iniciales aquí presentados, sin emplear técnicas avanzadas de selección de características (centrándonos solo en la potencia de las bandas alfa y beta) y con un único sistema de clasificación (LDA), los resultados parecen indicar que con entrenamiento suficiente los sujetos podrían ser capaces de controlar este tipo de sistemas.

Esta línea de trabajo se está continuando con la realización de los ensayos en un mayor número de sujetos y la implementación de diferentes clasificadores. Adicionalmente, existe una versión beta del sistema que permite la realización de BCI cooperativo, en el cual dos sujetos intentan realizar la tarea simultáneamente y, únicamente cuando las señales de ambos sujetos permiten discernir la misma orden, esta se ejecuta.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Academia General del Aire (España) y la École de l'Air (Francia) la oportunidad de participar en el programa de intercambios internacionales para tareas de investigación de los alféreces alumnos de la École de l'Air.

Referencias

1. *Maureen Clerc, Laurent Bourgain, Fabien Lotte. Brain-Computer Interfaces 1 – Foundations and Methods. Inria Sophia-Antipolis, University of Lorraine, Inria Bordeaux; 2016.*
2. *Patrick A. Cutter, Major. The shape of things to come: the military benefits of the brain – computer interfaces in 2040. Clinical Laboratory Science, USAF, 2015.*
3. *J. Serna, A. López-Belchí, F. J. Sánchez, Velasco, Capacidades del Túnel Aerodinámico del Centro Universitario de la Defensa de San Javier. En Asorey-Cacheda, R. et al., Actas: III Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2015. Ed. Centro Universitario de la Defensa de Marín, pp. 801-808, 2015.*
4. *Saeid Sanei. Adaptive processing of brain signals. University of Surrey, 2013.*

Extreme Learning Machine aplicado a sistemas BCI basados en imaginación de movimiento

Martínez Albaladejo, Francisco José[1,*], Rodríguez Bermúdez, Germán[2] y Bueno Crespo, Andrés[3]

[1 y 3] Grupo de Investigación en Bioinformática y Computación de Alto Rendimiento (BIO-HPC), Universidad Católica San Antonio de Murcia, España.

E-mail: fjmartinez@ucam.edu y abueno@ucam.edu

[2] Centro Universitario de la Defensa de San Javier, España.

E-mail: german.rodriguez@cud.upct.es

* Autor principal y responsable del trabajo (FJMA).

Resumen

En los sistemas BCI se han aplicado muchos enfoques en las etapas de extracción y clasificación de características. En la etapa de técnicas de extracción de características se han realizado un amplio número de métodos para diseñar sistemas BCI, tales como CSP (*Common Spatial Pattern*), parámetros de Hjörth, AAR (*Adaptive Autoregressive Coefficients*), PSD (*Power Spectrum Density*) o transformadas Wavelet. Sin embargo, no todas las características extraídas tienen información relevante, pues en ocasiones la información puede ser redundante, lo que provoca una bajada en el rendimiento del clasificador y un incremento innecesario de la complejidad y de la carga computacional del mismo. Por ello, es habitual reducir el vector de características obtenido de forma previa a su clasificación.

Por otra parte, como es aceptado en [1] se considera la señal de EEG un sistema dinámico caótico. Además, una señal EEG es caótica en otro sentido, porque su amplitud cambia aleatoriamente con respecto al tiempo. Esto tiene una implicación clara en los sistemas BCI, pues los usuarios no generan la misma señal en cada sesión, ni en cada iteración de control en la misma sesión y ni siquiera la señal es la misma a lo largo del periodo de imaginación de movimiento (MI).

Este artículo tiene por objetivo probar el ELM con señales de referencia en BCI para compararlo con técnicas de clasificación estándar. Se pretende tener en cuenta el curso temporal de las señales. Para ello se han empleado tres métodos de extracción de características ampliamente conocidos: PSD, Hjörth y AAR. Estos datos se han combinado mediante tres técnicas diferentes para tener en cuenta la variación temporal de las señales: ventana central, promediado y concatenación. Los resultados muestran que estos nuevos descriptores mejoran el rendimiento del ELM con respecto a las técnicas clásicas.

Palabras clave

BCI: *Brain Computer Interface*, AAR: *Adaptative Autorregresive Coefficients*, ELM: *Extreme Learning Machine*, PSD: *Power Spectrum Density.*

1. Introducción

En los sistemas BCI se usan métodos de reducción de la dimensionalidad con técnicas como el análisis de componentes principales (PCA) o de análisis de componentes independientes (ICA) [2]. Otro enfoque utilizado es seleccionar características con algoritmos genéticos u otras estrategias como la selección secuencial hacia atrás o selección secuencial hacia adelante.

Con respeto a la etapa de clasificación de patrones se han aplicado una gran variedad de clasificadores lineales y no lineales como, por ejemplo: modelos de mezclas gaussianas [3]; LDA [4]; SVM [5]; clasificador k-NN o las RNA. Es importante destacar que en los últimos años, las metodologías de clasificación lineal de señales EEG para BCI propuestas son cada vez más rápidas, además de automáticas y adaptativas, además tienen pocos requisitos computacionales [6].

a. Objetivo

Probar métodos lineales de extracción de características ampliamente conocidos en BCI tales como PSD, Hjörth y AAR tanto de forma individual, como generando diferentes combinaciones entre ellas, junto con un *Extreme Learning Machine* (ELM) como clasificador de sistemas BCI basados en imaginación de movimiento (MI). La revisión de la literatura científica nos indica que esta combinación no se ha realizado con profundidad.

2. Desarrollo

2.1 Señales utilizadas

Para este experimento se han utilizado el conjunto de datos II.B de la BCI *Competition* IV [7]. El conjunto se compone de señales EEG de 9 sujetos diestros que tenían una visión normal. Las pruebas las realizaron sentados en un sillón mirando un monitor situado a un metro de distancia y cada usuario realizó cinco sesiones, de las cuales dos eran sin realimentación y tres con realimentación.

2.2 Simulaciones

Se han extraído características mediante tres técnicas ampliamente conocidas para aplicaciones BCI: PSD (en las bandas μ (8-12 Hz) y β (13-30Hz) [8]), parámetros de Hjörth (actividad, movilidad y complejidad) y AAR de orden 6 de acuerdo con otros trabajos previos [1, 6, 9]. Estos métodos son algunos de los métodos lineales más comunes de extracción de características [10]. Sin embargo, es habitual probar solo uno o dos al mismo tiempo en sistemas BCI y no tres. El hecho de implementar tres métodos, es debido a que en este trabajo, se intenta comprobar si el ELM es capaz de explotar la información complementaria que pueden aportar diferentes técnicas de extracción de características.

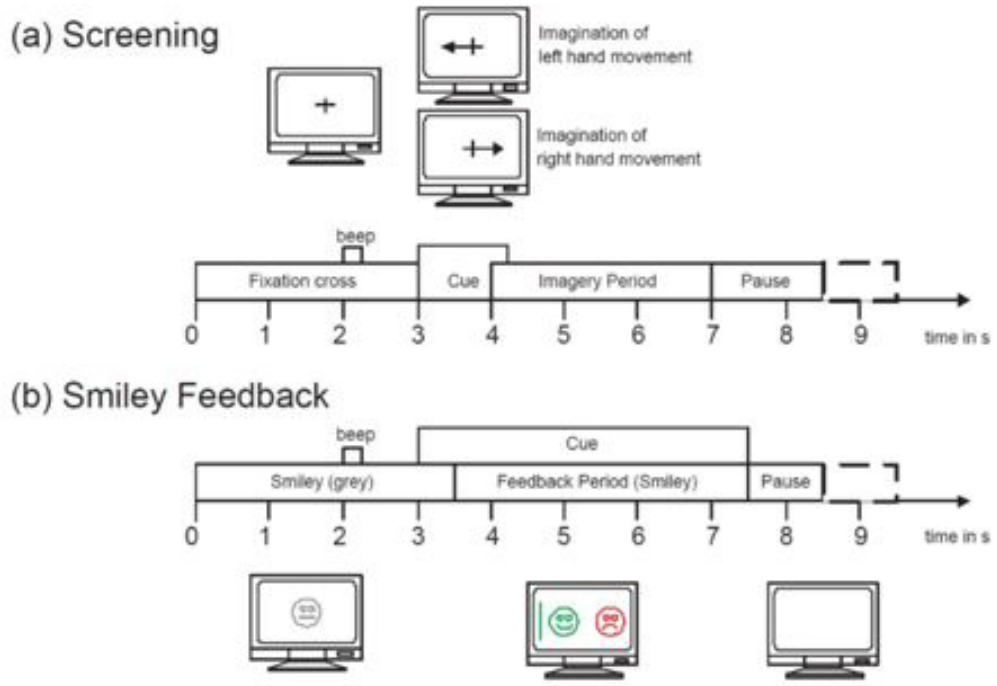


Figura 1.

Tal y como se muestra en la figura 1, los paradigmas de MI por lo general necesitan varios segundos en los que el usuario debe imaginar el movimiento a realizar, sin embargo, las señales EEG cambian a lo largo de ese periodo porque son no estacionarias. Para tener en cuenta esta información temporal, es habitual dividir el periodo MI en segmentos. Seguidamente, se calculan las características en cada uno de ellos y, finalmente se fusionan en un vector único. Es importante observar que dentro de cada segmento, las señales se consideran estadísticamente estacionarias. Para este trabajo se han desarrollado tres enfoques diferentes para fusionar las características obtenidas en un vector único:

- Ventana central: las características se han calculado desde una ventana de 2 segundos ubicada en el centro del periodo MI.
- Promediado: el periodo MI se ha dividido en cuatro ventanas de 1 segundo y las características obtenidas en cada ventana se han promediado en cada prueba.
- Concatenación: el periodo MI ha sido dividido en cuatro ventanas de 1 segundo y las características obtenidas en cada ventana se concatenan en solo vector en cada prueba.

Las características obtenidas en todos los casos componen un vector (D). Teniendo en cuenta que PSD proporciona 2 características, Hjörth (H) proporciona 3 características, AAR proporciona 6 características por cada ventana y que hay 3 canales de EEG, el tamaño de D cambiará en función de la estrategia elegida para obtener el vector final. En particular se toma D = 33 para la ventana central, D = 33 para el promediado de características y D = 132 para la concatenación de características. En este experimento se prueba el ELM con cuatro kernels diferentes para todos los sujetos, estos son: lineal (l), sigmoide (s), gaussiano (g) y una combinación para cada capa de lineal-sigmoide-gaussiano (lsg), ver figura 2.

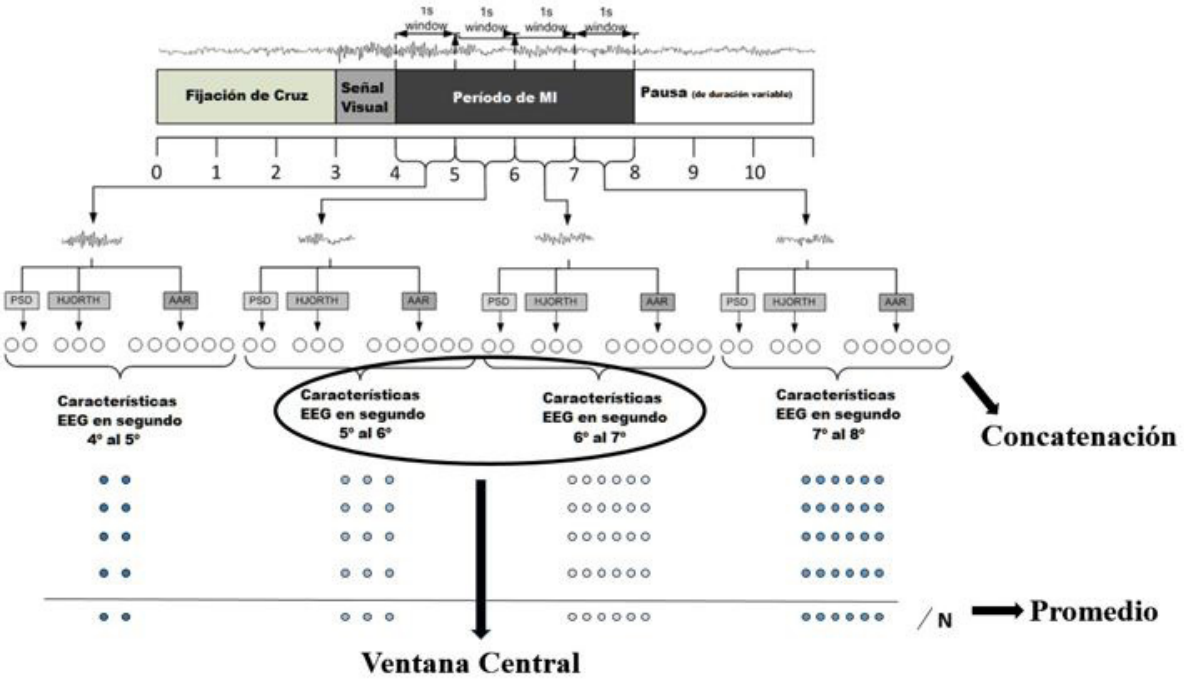


Figura 2.

Para hacer una evaluación de forma precisa y justa de los diferentes enfoques de clasificación, este trabajo usa un procedimiento de *Leave One Out* (LOO-CV) que evita cambios no deseados de la selección aleatoria del conjunto de entrenamiento y del conjunto de prueba, ver figura 3.

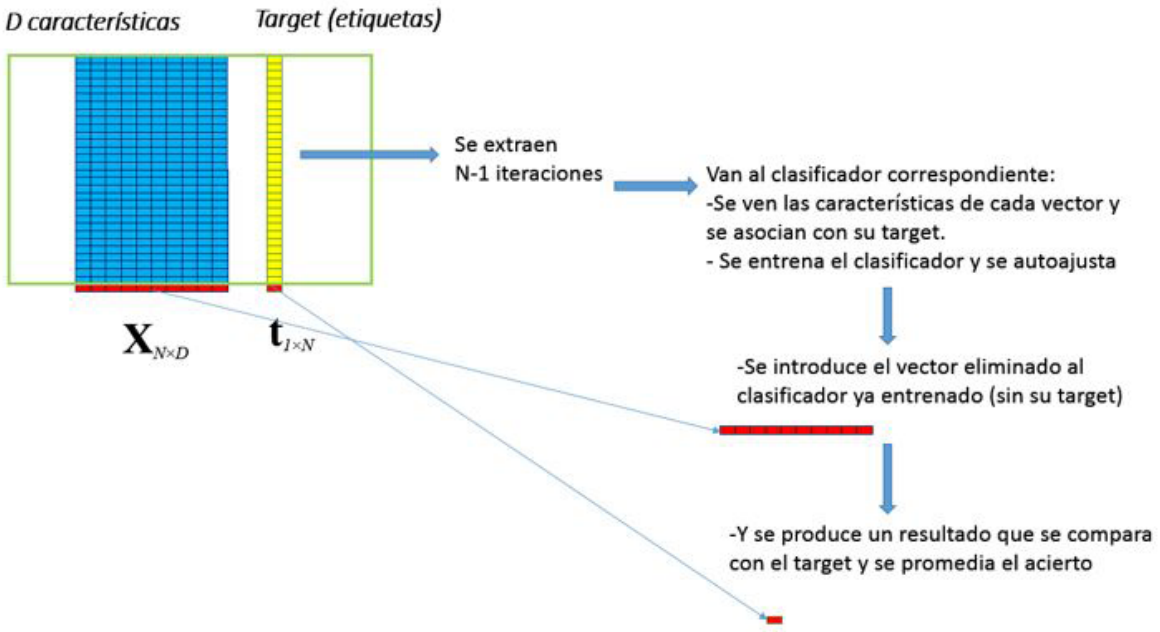


Figura 3.

3. Resultados

Se muestran a continuación los resultados de precisión de clasificación mediante LOO-CV, utilizando PSD, Hjörth y AAR como métodos de extracción de características, concatenándolas y aplicando cuatro núcleos diferentes (l, s, g y lsg) para el ELM.

	Kernel utilizado Lineal (l) método de extracción			Sigmoide (s) método de extracción			Gaussiano (g) método de extracción			Todos (lsg) método de extracción		
	PSD Máximo	HJÖRTH Máximo	AAR Máximo	PSD Máximo	HJÖRTH Máximo	AAR Máximo	PSD Máximo	HJÖRTH Máximo	AAR Máximo	PSD Máximo	HJÖRTH Máximo	AAR Máximo
USUARIO1	,703	,640	,698	,614	,588	,619	,675	,612	,670	,650	,593	,676
USUARIO2	,475	,515	,593	,528	,517	,522	,507	,517	,530	,518	,509	,532
USUARIO3	,595	,525	,495	,528	,521	,488	,573	,493	,490	,548	,523	,485
USUARIO4	,930	,843	,753	,877	,801	,700	,873	,851	,780	,909	,841	,773
USUARIO5	,700	,620	,620	,668	,591	,567	,698	,617	,656	,682	,616	,625
USUARIO6	,653	,618	,563	,639	,576	,537	,666	,593	,554	,656	,590	,564
USUARIO7	,635	,570	,578	,583	,527	,550	,585	,517	,565	,598	,529	,584
USUARIO8	,680	,670	,675	,639	,658	,572	,637	,702	,651	,664	,668	,663
USUARIO9	,688	,688	,618	,645	,612	,571	,666	,653	,623	,662	,653	,614

Tabla 1

	Kernel utilizado											
	Lineal (l) método de extracción			Sigmoide (s) método de extracción			Gaussiano (g) método de extracción			Todos (lsg) método de extracción		
	PSD Máximo	HJÖR-TH Máximo	AAR Máximo	PSD Máximo	HJÖR-TH Máximo	AAR Máximo	PSD Máximo	HJÖR-TH Máximo	AAR Máximo	PSD Máximo	HJÖRTH Máximo	AAR Máximo
USUARIO1	,605	,478	,503	,569	,516	,525	,595	,509	,523	,597	,512	,517
USUARIO2	,523	,550	,525	,501	,499	,526	,508	,494	,531	,500	,507	,524
USUARIO3	,520	,528	,450	,505	,479	,477	,520	,506	,503	,509	,484	,499
USUARIO4	,848	,543	,550	,813	,543	,563	,850	,527	,541	,829	,531	,557
USUARIO5	,533	,578	,500	,518	,540	,509	,510	,579	,476	,511	,535	,492
USUARIO6	,588	,450	,500	,535	,518	,497	,545	,519	,516	,534	,519	,488
USUARIO7	,540	,500	,550	,539	,498	,554	,534	,500	,551	,553	,481	,577
USUARIO8	,675	,583	,525	,635	,576	,533	,657	,579	,563	,651	,591	,551
USUARIO9	,613	,550	,615	,552	,548	,576	,582	,546	,585	,561	,516	,582

Tabla 2

	Clasificación media		
	Concatenación	Ventana central	Promedio
	Máximo	Máximo	Máximo
USUARIO1	,758	,705	,613
USUARIO2	,553	,573	,553
USUARIO3	,539	,523	,509
USUARIO4	,930	,888	,845
USUARIO5	,738	,698	,588
USUARIO6	,669	,595	,563
USUARIO7	,637	,593	,578
USUARIO8	,728	,729	,667
USUARIO9	,689	,700	,668

Tabla 3

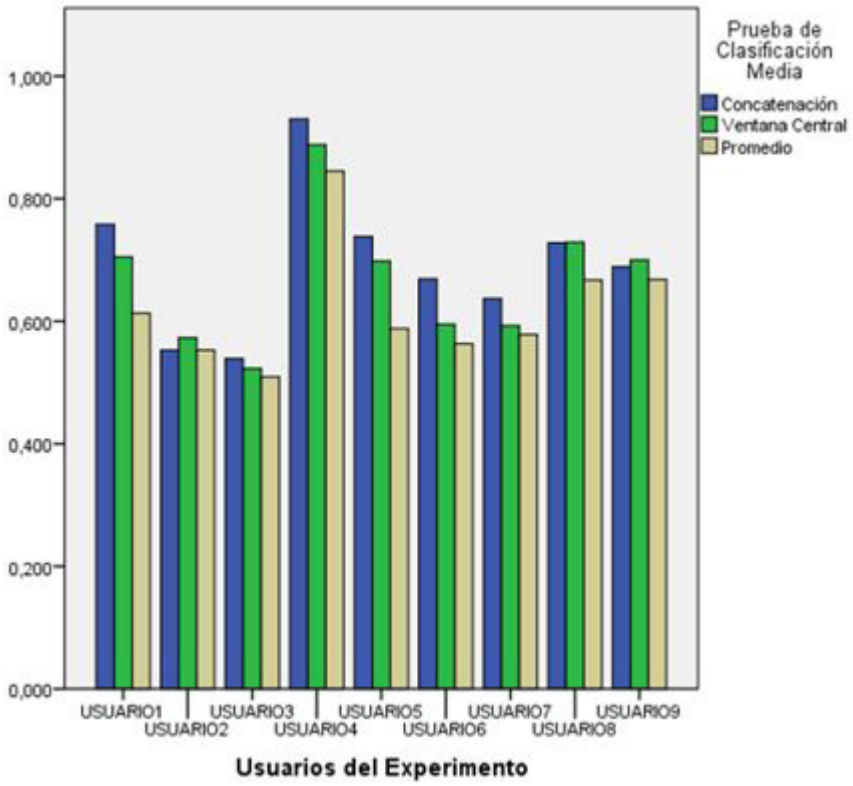


Figura 4.

4. Resultados y discusión

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos de precisión de clasificación de LOO-CV y su desviación correspondiente para diferentes métodos de extracción de características (PSD, Hjörth y AAR), utilizando concatenación y cuatro núcleos diferentes l, s, g y lsg para el ELM.

La tabla 2 presenta los resultados obtenidos y su desviación correspondiente utilizando los mismos métodos de extracción de características, los mismos kernels para el ELM, pero bajo el enfoque de ventana central.

Otras dos tablas no incluidas muestran los resultados de clasificación LOO-CV obtenidos y su desviación correspondiente para los mismos métodos de extracción de características, los mismos núcleos para el ELM, pero bajo un enfoque de promediado de características, así como presentan los resultados obtenidos de precisión de clasificación de LOO-CV y su desviación correspondiente para todas las características calculadas y usadas a la vez, combinadas mediante concatenación, ventana central y promediado y cuatro núcleos l, s, g y lsg para todos los sujetos.

El ELM selecciona las características más relevantes, ajustando los pesos artificiales de la red neuronal, por lo tanto, se convierte en un método adecuado para ser aplicado en sistemas BCI basados en MI. En particular, como se muestra en la tabla 3 y en la figura 4, los mejores resultados se obtienen concatenando las características obtenidas bajo PSD, Hjörth y AAR. Es importante destacar también que, con respecto al kernel, en general, el lineal es el que obtiene los mejores resultados de clasificación.

5. Conclusiones

En este artículo se han extraído características mediante el uso de tres técnicas diferentes (PSD, Hjörth y AAR) y se han combinado bajo tres diferentes enfoques (ventana central, promediado y concatenación

de características). Estas han sido clasificadas utilizando ELM con cuatro núcleos diferentes lineal (l), sigmoide (s), gaussiano (g) y una mezcla de ellos (lsg).

Explora cuál de las configuraciones de ELM sería conveniente para este tipo de problemas. En este caso, se emplearon señales estándar extraídas del conjunto de datos IIb del BCI *Competition* IV y se implementaron tres métodos de extracción de características muy usados en BCI como son: PSD, AAR y Hjörth. Seguidamente, tras establecer dos ventanas de 1 segundo para la extracción de las características, se definieron tres estrategias de combinación de las mismas: ventana central; promediado y concatenación. La clasificación se realizó primero, utilizando las características de cada uno de estos métodos combinados según las estrategias de combinación enumeradas y probando 4 núcleos diferentes para el ELM: l, s, g y lsg. Y segundo, utilizando las características de todos los métodos extraídas a la vez y combinadas según las estrategias de combinación vistas. Nuevamente se probaron otra vez los 4 kernels para el ELM.

Los resultados muestran que el ELM ofrece bajos resultados utilizando solo un método de extracción de características, independientemente de las estrategias de combinaciones empleadas y del núcleo implementado. Sin embargo, se observa una mejora de los resultados de precisión en clasificación mediante el uso de todas las características extraídas al mismo tiempo, al combinarlas y clasificarlas. Por lo tanto, el ELM es capaz de explotar la información complementaria que aportan los tres métodos de extracción de características implementados.

Además, el ELM selecciona las características más relevantes ajustando los pesos de la red neuronal artificial. Esto explica que los mejores resultados se obtuviesen mediante la concatenación de todas las características calculadas. De esta forma, el ELM se convierte en un método adecuado para ser aplicado en sistemas BCI basados en imaginación de movimiento. Por último, atendiendo a los resultados obtenidos, cabe destacar que es el kernel lineal (l) el que obtiene mejores resultados [11,12].

Referencias

1. *Rodríguez-Bermúdez G, Garcia-Laencina PJ. Analysis of EEG signals using nonlinear dynamics and chaos: a review. Applied Mathematics & Information Sciences. 2015;9(5):2309.*
2. *Gupta, S. and Saini, EEG features extraction using PCA plus LDA approach based on L1-norm for motor imaginary classification - IEEE Conference Publication [Internet]. [citado 3 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/7238424/*
3. *Nicolas-Alonso LF, Gómez-Gil J, Nicolas-Alonso LF, Gómez-Gil J. Brain Computer Interfaces, a Review. Sensors. 31 de enero de 2012;12(2):1211-79.*
4. *McFarland DJ, Wolpaw JR. Sensorimotor rhythm-based brain-computer interface (BCI): feature selection by regression improves performance. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. septiembre de 2005;13(3):372-9.*
5. *Lima CAM, Coelho ALV, Eisencraft M. Tackling EEG signal classification with least squares support vector machines: A sensitivity analysis study. Computers in Biology and Medicine. 1 de agosto de 2010;40(8):705-14.*
6. *Rodríguez-Bermúdez G, Sánchez-Granero MÁ, García-Laencina PJ, Fernández-Martínez M, Serna J, Roca-Dorda J. Testing the Self-Similarity Exponent to Feature Extraction in Motor Imagery Based Brain Computer Interface Systems. Int J Bifurcation Chaos. 30 de diciembre de 2015;25(14):1540023.*
7. *Wang Y, Zhang Z, Li Y, Gao X, Gao S, Yang F. BCI Competition 2003--Data set IV: an algorithm based on CSSD and FDA for classifying single-trial EEG. IEEE Trans Biomed Eng. junio de 2004;51(6):1081-6.*
8. *Pfurtscheller G, Brunner C, Schlögl A, Lopes da Silva F. Mu rhythm (de) synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks. NeuroImage. 1 de junio de 2006;31:153-9.*

9. *Rodríguez-Bermúdez G, García-Laencina PJ. Automatic and adaptive classification of electroencephalographic signals for brain computer interfaces. J Med Syst. noviembre de 2012;36 Suppl 1:S51-63.*
10. *Bashashati A, Fatourechi M, Ward RK, Birch GE. A survey of signal processing algorithms in brain-computer interfaces based on electrical brain signals. J Neural Eng. junio de 2007;4(2):R32-57.*
11. *Martínez-Albaladejo FJ, Bueno-Crespo A, Rodríguez-Bermúdez G. Testing Extreme Learning Machine in Motor Imagery Brain Computer Interface. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 1 de enero de 2017;33(5):3103-11.*
12. *Rodríguez-Bermúdez G, Bueno-Crespo A, José M-AF. Classifying BCI signals from novice users with extreme learning machine. Open Physics. 2017;15(1):494–500.*

Traffic Guard: diseño de algoritmos de visión artificial para la detección de movimiento

Vigara, Rubén[1,3,*], Guerra, Román[2], Barroso Seano, Jesús[2], Lozano Albalate, Mª Teresa[1], Lozano Rojo, Álvaro[1,3], Oller Marcén, Antonio Miguel[1,3], Otal Germán, Antonio[1,3], Rodríguez Rodríguez, Marcos[1,3], Velasco Cebrián, Mª Pilar[4], Barreras Peral, Álvaro[5]

1. Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza (CUDZ). Academia General Militar, Crtra. Huesca s/n, 50090 Zaragoza. Correo electrónico: rvigara@unizar.es (RV), maytelo@unizar.es (MTLA), alozano@unizar.es (ALR), oller@unizar.es (AMOM), aotal@unizar.es (AOG), marcos@unizar.es (MRR).
2. Lector Vision, SL. C/ La Granja 30, 28108 Alcobendas, Madrid. Correo electrónico: roman.guerra@lectorvision.com (RG), jesus.barroso@lectorvision.com (JBS).
3. I.U.M.A. Universidad de Zaragoza. c/ Pedro Cerbuna,12, 50009 Zaragoza.
4. Dpto. de Mat. Apl. a las TIC, E.T.S. Ing. y Sist. de Telecomunicación Univ. Politécnica de Madrid. c/ Nikola Tesla s/n, 28031 Madrid. Correo electrónico: pvelasco@etsist.upm.es (MPVC).
5. Universidad Internacional de La Rioja. Av. de la Paz, 137, 26006 Logroño, La Rioja. Correo electrónico: alvaro.barreras@unir.net (ABP).

Email:

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: rvigara@unizar.es (RV).

Resumen

El uso de sistemas de visión por computador (CV) permite automatizar múltiples tareas relacionadas con la seguridad. Dentro de los sistemas inteligentes de transporte (ITS) existen en la literatura diversos sistemas diseñados para monitorización del tráfico rodado por visión artificial. Sin embargo, si se intenta buscar sistemas físicos instalados y operativos, se aprecia que los sistemas actuales no funcionan bien, salvo en condiciones favorables (ausencia de sombras, iluminación favorable, no oclusión, etc.). El proyecto *Traffic Guard* tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de CV, eficaz incluso en condiciones desfavorables, capaz de contar vehículos y de clasificarlos por tipos (motos, coches y camiones/autobuses). El sistema proporciona además un cálculo de la velocidad del vehículo que puede ser altamente fiable con una adecuada calibración, proporcionando cálculos y alertas sobre la dirección del tráfico, colas de vehículos, etc. El resultado del proyecto ha sido incorporado por Lector Vision SL a su catálogo de productos y se encuentra actualmente en avanzada fase de comercialización. Aunque su origen y aplicaciones inmediatas están orientadas hacia el ámbito civil, las técnicas y algoritmos desarrollados tienen aplicación directa en el ámbito de la defensa y la seguridad.

Palabras clave

ITS, visión artificial, detección, seguimiento y clasificación de vehículos.

1. Introducción

El concepto de *visión artificial* o *visión por computador* (CV) surge del intento por dotar a las máquinas de capacidades similares a las relacionadas con el mecanismo sensorial de la visión [1]. Desde un punto de vista histórico, podría considerarse que las primeras aplicaciones se dieron en los inicios de la década de 1920 en el contexto de la prensa escrita y ante la necesidad de transmitir imágenes de calidad a grandes distancias en cortos espacios de tiempo [2]. En cualquier caso, la aparición de los ordenadores y la generalización de su uso conllevaron el nacimiento de lo que actualmente se denomina *procesado digital de imágenes* y cuyos ámbitos de aplicación se han multiplicado desde los años 70 del pasado siglo [3].

Uno de los ámbitos en los que las técnicas de CV juegan un papel fundamental es el de los *sistemas inteligentes de transporte* (ITS); entendidos como la incorporación de tecnologías provenientes de la electrónica, las telecomunicaciones y la computación tanto a los vehículos como a las vías de comunicación [4]. La importancia de las técnicas de CV en el ámbito de los ITS se debe a las siguientes razones principalmente [5]:

1. Preeminencia de la información visual sobre otros tipos de información perceptual.
2. Gran cantidad de información que recogen las secuencias de vídeo.
3. Fácil instalación, manejo y mantenimiento de los equipos.
4. Mejora de la relación precio-rendimiento.

La detección, reconocimiento y seguimiento de objetos relacionados con el tráfico y, en particular, de vehículos es uno de los principales campos de trabajo dentro de los ITS; cuyas aplicaciones varían desde el mero análisis estadístico del tráfico hasta la detección de comportamientos irregulares, retenciones de tráfico o accidentes [5]. En este sentido, unos de los dispositivos más utilizados son los llamados *aforadores*: sistemas dedicados a la monitorización de determinadas porciones de la vía, contabilizando y clasificando los vehículos que circulan por ellas. Los aforadores actualmente en uso utilizan diferentes tecnologías (radar, espiras inductivas, etc.). Sin embargo, hay una carencia de sistemas comerciales fiables que realicen estas tareas usando técnicas de CV. Diversos trabajos [6] señalan los múltiples retos asociados a las técnicas de detección basadas en CV debido a aspectos como la gran variabilidad en la apariencia de los vehículos y su dependencia respecto de la ubicación de la cámara, la complejidad del manejo de elementos como la iluminación o las condiciones atmosféricas cambiantes, la interacción entre vehículos y sus posibles cambios de trayectoria, el elevado coste computacional, etc.

El proyecto de I+D+i *Traffic Guard*, desarrollado por Lector Vision SL pretende acabar con la carencia mencionada en el párrafo anterior, desarrollando un producto comercial fiable para monitorización del tráfico mediante técnicas de CV. Lector Vision SL es una empresa dedicada a la CV aplicada a los ITS especializada en lectura de matrículas, y *Traffic Guard* surge como una oportunidad para ampliar su catálogo de productos. Si bien en el presente artículo nos vamos a centrar en

los algoritmos de detección de movimiento que están incluidos en el *software* del proyecto, *Traffic Guard* es un proyecto mucho más amplio que incluye también desarrollo de *hardware* propio (cámaras), *software* de gestión (centro de control), etc. El desarrollo de los algoritmos ha sido llevado a cabo en colaboración con Lector Vision SL por un equipo de investigadores del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza.

2. Sistemas inteligentes de transporte (ITS)

Como ya se mencionó en la introducción, los ITS incluyen todas aquellas técnicas de información y computación puestas al servicio del control y gestión del tráfico de vehículos por carreteras. Estas técnicas incluyen aspectos de desarrollo de *hardware* (típicamente en el diseño de las cámaras y las computadoras que constituyen un sistema de CV, así como la transmisión de datos a los centros de control) junto con otros más propios de *software* como es el desarrollo de algoritmos informáticos que procesen y analicen los datos que proporciona el dispositivo de visión artificial.

En esta sección, se presentan con mayor amplitud algunos de los problemas fundamentales a los que se enfrentan los ITS centrándose exclusivamente en el segundo aspecto arriba mencionado, esto es, el de los algoritmos encargados del análisis de la información que proporciona la grabación de los vehículos en la carretera.

2.1. Detección de vehículos

Este problema consiste fundamentalmente en detectar los objetos móviles en un vídeo. Esto equivale a ser capaz de distinguir a estos de otros elementos del vídeo que por ser inmóviles se los considera como fondo (*background*). Algunos de los métodos más comunes para resolver este problema se comentan a continuación.

(a) Sustracción de fondo (background subtraction): consiste en eliminar del vídeo aquello que permanece inmóvil a fin de captar lo que se mueve. Este método requiere que la cámara permanezca inmóvil durante la grabación. La idea del método consiste en sustraer de cada fotograma una imagen que se usa como fondo (figura 1 a) y b)). Este fondo puede construirse bien manualmente (tomando una imagen de la carretera con ausencia de coches) o bien mediante algún procedimiento matemático como puede ser efectuar la media de una secuencia de fotogramas consecutivos. Una vez realizada esta diferencia (figura 1 c)), los valores que superan un cierto valor umbral se consideran provenientes de píxeles en el fotograma pertenecientes a un objeto en movimiento (figura 1 d)). A pesar de su simplicidad, este método presenta varios inconvenientes. Uno de ellos es que el fondo sufre modificaciones durante el periodo de grabación, debido a aspectos como el cambio de luminosidad o el cambio en las condiciones meteorológicas a lo largo del tiempo. La solución de este problema conlleva la necesidad de ir actualizando la imagen que se utiliza como fondo con frecuencia y criterio a determinar por el diseñador del algoritmo. Por otro lado, si un vehículo queda detenido en la calzada el tiempo suficiente, corre el riesgo de que el algoritmo pase a considerarlo fondo y por tanto deje de detectarse. Otro inconveniente estriba en la ambigüedad a la hora de fijar un valor umbral con el que decidir si un píxel de la imagen pertenece al fondo o no.

(b) Diferencia de fotogramas (frame differencing): este método consiste en hacer la resta de los valores de las intensidades entre dos fotogramas consecutivos a fin de observar diferencias. Donde las haya, se supondrán provenientes de algún elemento móvil. Se trata del método más directo para hacer desaparecer los objetos inmóviles conservando solo las trazas de los vehículos en movimiento. Es tanto más eficaz cuanto más patentes sean las diferencias de imagen que se produzcan en el tiempo. De esto último se deduce que su principal inconveniente es la no detección de vehículos que se encuentran quietos o se mueven lentamente. De nuevo se requiere que la cámara permanezca inmóvil durante la grabación o, en caso de contar con una imagen no estática, deben incorporarse algoritmos de estabilización de imagen.

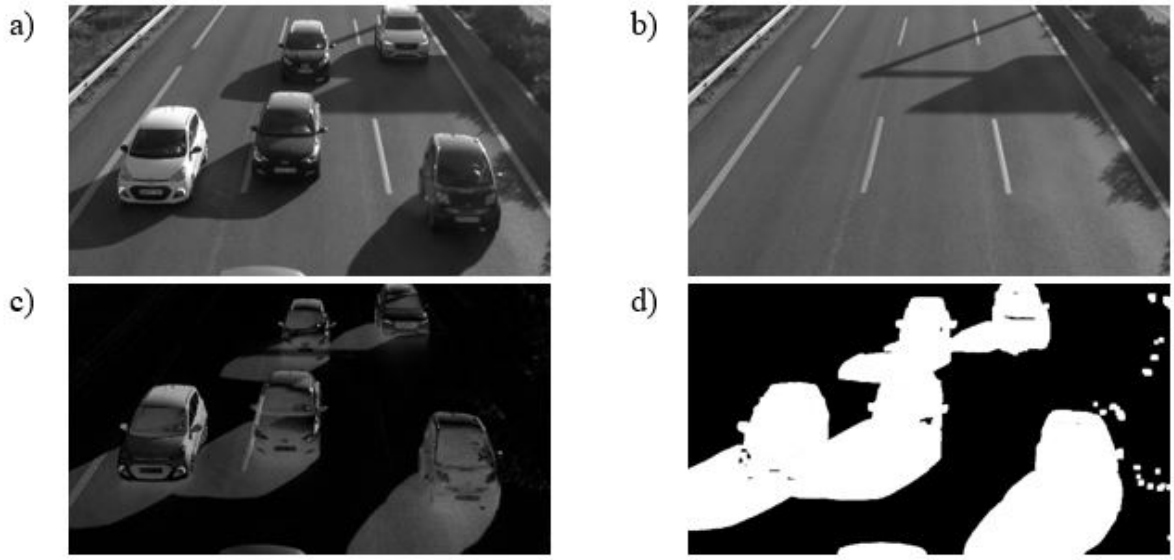


Figura 1. Ejemplo de procesado de imagen por sustracción de fondo. Al sustraer la imagen de fondo b); del fotograma original a); se obtiene la imagen c); tras umbralizar y aplicar sucesivas erosiones y dilataciones de la región blanca se obtiene la imagen d), donde las manchas blancas representan las zonas donde se ha detectado movimiento. Se observa cómo las sombras provocan que vehículos distintos queden unidos.

Un problema en la detección de vehículos que es transversal para los anteriores métodos es el de la eliminación de oclusiones [8]. Por oclusión se entiende el solapamiento de objetos desde el punto de vista de la cámara. Como consecuencia de ello, la detección de vehículos yerra en tanto que varios vehículos se detectan como uno solo. Las dos causas principales de este problema son la perspectiva de la cámara y la presencia de sombras. Los problemas de perspectiva se resuelven usualmente mediante la instalación de varias cámaras. Sin embargo, se han dedicado bastantes esfuerzos a intentar resolver el problema de eliminación de sombras considerando que se dispone de las imágenes bajo una única perspectiva. Las sombras, además de poder agrupar varios vehículos como una única forma en movimiento, pueden introducir grandes distorsiones en los cálculos del tamaño de los vehículos si el sistema detecta como un objeto en movimiento al vehículo junto con su sombra, especialmente en las primeras y últimas horas del día. Para ello se proponen diversos métodos para declarar cuándo una región continua de píxeles representa una sombra. Algunas técnicas buscan caracterizar una sombra en términos de algunas cantidades físicas de la imagen tales como la irradiancia y la reflectancia [9], otros intentan caracterizar la textura de alguna parte del fondo (como puede ser el asfalto de la carretera) a fin de identificar el asfalto con independencia de que esté o no a la sombra [10]. Finalmente, otros trabajos tratan de caracterizar sombras en términos de algunas cantidades asociadas al color como el brillo y la saturación.

2.2. Clasificación de vehículos

Una vez detectado un vehículo se pretende clasificarlo según una tipología previamente establecida. Esta clasificación se realiza gracias a la extracción de la imagen de unas características que tomadas en conjunto sirvan para clasificarla. Algunos ejemplos de estas características son el color o la intensidad del objeto que se ve, la figura que lo define o la textura de la imagen; esta última relacionada con la homogeneidad de la intensidad del color. Las características anteriores difieren conceptualmente en que algunas son de tipo puntual (como puede ser el color) mientras que otras son de tipo global (como puede ser la figura).

Otro tipo de características de interés para la clasificación de vehículos son las características de tipo local. Se denominan características locales a aquellas que involucran la información en un entorno del punto. Es decir, la idea común a todas ellas es la de convertir una imagen de tamaño fijo en un vector de números llamado

descriptor o *vector de características* que se genera atendiendo a los valores de cada punto de su imagen y a lo que cada uno de ellos tiene inmediatamente a su alrededor. Ejemplos de estos descriptores son LBP (*Local Binary Patterns*), que se generan a partir de la intensidad de una imagen en escala de grises. Básicamente se considera el valor de un píxel y se realiza una comparación con los ocho (si el píxel no está en el borde de la imagen) valores de su entorno. Si el valor del píxel central es superior al de aquel con el que se compara se anota un 1, y se anota 0 en el caso contrario. Así se tiene un vector de ocho componentes binarias (ceros y unos), que equivale a un byte de información. Se calcula el número correspondiente en base 2 (que estará entre 0 y 255) y con esto se tiene el valor LBP del píxel central. Se recorre toda la imagen haciendo este proceso y finalmente se construye un histograma con el cual obtener un descriptor de la imagen. Una vez que se tienen los descriptores de imagen se decide si corresponde con algún tipo de vehículos mediante algún algoritmo clasificador, basado generalmente en técnicas de inteligencia artificial como las redes neuronales.

2.3. Seguimiento de vehículos

Una vez que un vehículo ha sido detectado en un determinado fotograma, se desea estimar cuál va a ser su posición en el fotograma siguiente. El filtro de Kalman [1] es un algoritmo que dada una característica captada en un determinado fotograma proporciona una región en el fotograma siguiente (cuanto más pequeña mejor) en la que se espera encontrar (con un determinado nivel de confianza prefijado) la característica en cuestión. Otra técnica usada para el seguimiento de vehículos es la del flujo óptico. El flujo óptico busca captar el desplazamiento tridimensional de un objeto observando los cambios en los niveles de intensidad de la imagen bidimensional [7]. Sin embargo, en el desarrollo teórico del flujo óptico se asume que cualquier cambio de intensidad se debe a movimiento, lo que puede inducir a error [1].

3. Requisitos del sistema *Traffic* Guard

Los vídeos que se analizan con el algoritmo del proyecto *Traffic Guard* provienen de una cámara de tráfico fija instalada en pórticos, generalmente en vías interurbanas. Estas cámaras proporcionan imágenes de vehículos frontales y/o traseras. El algoritmo se ha implementado para adaptarse a dos situaciones sutilmente distintas, una de enfoque monocarril (figura 2 a) y c)) y otra de enfoque multicarril (figura 2 b) y d)). El modo de enfoque monocarril busca integrarse con un código paralelo de lectura de matrículas perteneciente a un producto comercial ya en uso denominado *Traffic Eye*. En estas circunstancias, el algoritmo puede hacer un procesamiento más rápido de la imagen, pero tiene el problema de que el vehículo está presente en pocos fotogramas del vídeo.

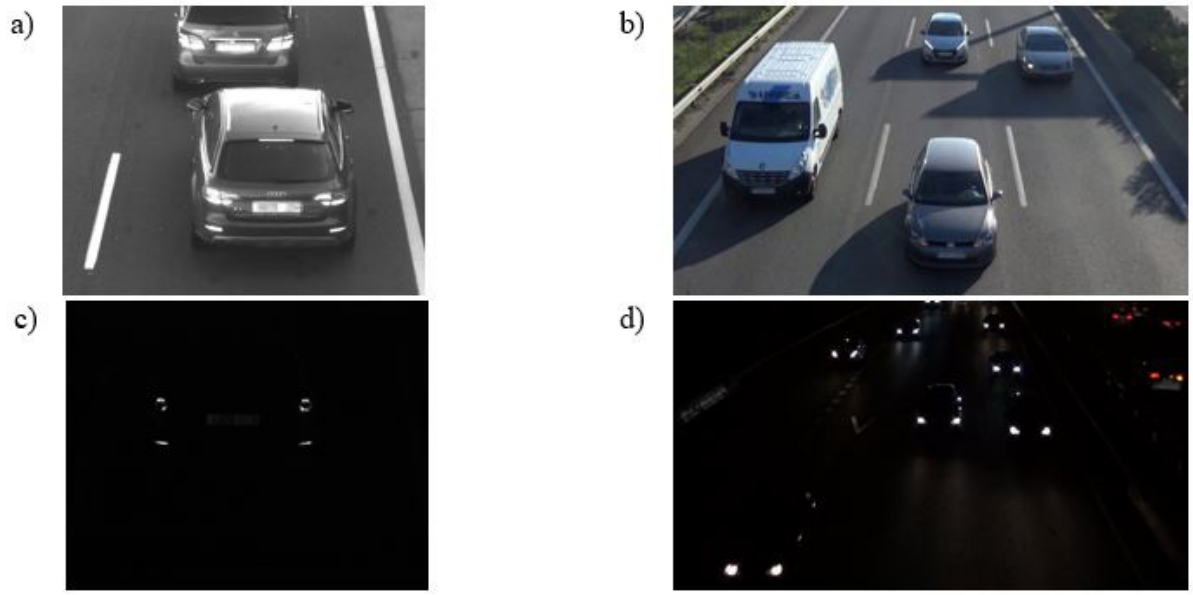


Figura 2. Ejemplo de fotogramas en perspectiva monocarril (izquierda) y multicarril (derecha).

El modo de enfoque multicarril busca obtener una visión global del tráfico en una zona (posiblemente en ambos sentidos). Este modo de vigilancia global de la carretera se comercializará con el mismo nombre del proyecto (*Traffic Guard*). Al tener una perspectiva más lejana que el modo monocarril, en este modo el número de fotogramas en los que es detectado cada vehículo es mucho mayor que en el modo monocarril. Sin embargo, a cambio de manejar más información por cada vehículo, al ser mucho mayor el área a vigilar el procesado de estos fotogramas será más lento que en modo monocarril.

Ambos modos se prevé que funcionen ininterrumpidamente de manera independiente de las circunstancias meteorológicas (sol, nubes, lluvia, nieve, niebla, etc.), circunstancias viales (tráfico fluido, denso, retenciones, etc.) u hora del día (con luz solar o de noche). El algoritmo debe ser capaz de detectar y contar los vehículos que circulen por la zona vigilada, clasificando los vehículos en tres categorías: motocicletas, turismos y vehículos pesados (camiones o autobuses). Finalmente, el algoritmo debe calcular la velocidad de los vehículos detectados.

Por tanto, el algoritmo de *Traffic Guard* debe tener en consideración todos los inconvenientes mencionados en la sección 2. Al tratarse de una cámara instalada al aire libre sobre un pórtico, no son descartables vibraciones de la imagen causadas por el viento. Por otro lado, la gestión de sombras debe ser eficaz independientemente de la hora del día y de la orientación de la cámara. Como el sistema debe ser eficaz también en secuencias nocturnas, cabe la posibilidad de que el tratamiento de las imágenes nocturnas requiera un enfoque completamente distinto al de las diurnas. De este modo, el algoritmo debe decidir en qué momento se debe utilizar el modo diurno o el nocturno. Al tratarse de un sistema que funciona en tiempo real, la velocidad de proceso es clave y el algoritmo tiene que estar altamente optimizado. Aunque en la versión para perspectivas monocarril el procesamiento de cada fotograma es más rápido, en ese caso el algoritmo debe compartir recursos con el *software* de lectura de matrículas, con lo que también cuenta con recursos más limitados. Finalmente, se prevé que el sistema pueda ser instalado por personal no cualificado, de modo que la dificultad de configuración e instalación debe ser mínima.

4. Resultados

El algoritmo diseñado está plenamente operativo (figura 3). Al igual que hace con el resto de sus productos, Lector Vision SL ha desarrollado distintas herramientas de *software* con objeto de testear la fiabilidad del algoritmo. Estas herramientas permiten obtener estadísticas fiables sobre el rendimiento del sistema en las más variadas circunstancias (día o noche, en seco o con lluvia, tráfico fluido o denso, perspectiva multicarril o monocarril, etc.). El porcentaje de detección en todas las circunstancias se sitúa en torno al 99 %, y los falsos positivos por debajo del 1 %. La clasificación es correcta en la gran mayoría de los casos y prácticamente todos los errores de clasificación corresponden a vehículos mixtos (furgonetas), que en ocasiones son clasificados como turismos y en ocasiones como vehículos pesados. En cuanto al cálculo de la velocidad de los vehículos, en pruebas preliminares se han contrastado los resultados del algoritmo con velocidades capturadas por radar en una secuencia de 50 vehículos, y el error medio es inferior al 4 %. Aunque este error no es válido para equipos que requieren una gran exactitud, como los que se utilizan para imponer sanciones por exceso de velocidad, es perfectamente aceptable a la hora de obtener información estadística sobre el uso de la vía o enviar alertas ante vehículos de velocidad anormalmente elevada o reducida. Además, por las características de la prueba realizada cabe pensar que existe bastante margen de mejora y que, con una calibración adecuada, el sistema será capaz de calcular velocidades con gran exactitud.

El producto *Traffic Guard* fue presentado en marzo de 2018 en la feria *Intertraffic Amsterdam*, una de las ferias más importantes del mundo en el campo de la infraestructura, gestión del tráfico, seguridad y aparcamiento. Lector Vision SL ya está comercializando la nueva versión de *Traffic Eye* con *Traffic Guard* incorporado, existiendo equipos ya en funcionamiento en España y en Argentina. La versión independiente de *Traffic Guard* (perspectiva multicarril) está en las últimas fases de pruebas previas a su comercialización. *Traffic Guard* está permitiendo a Lector Vision SL ofrecer un producto novedoso que le diferencia de la competencia, por lo que puede considerarse que el proyecto ha sido un éxito.

Figura 3. El algoritmo en acción: detección y conteo de vehículos.

5. Conclusiones y líneas futuras

El presente trabajo muestra un claro ejemplo de éxito de colaboración público-privada entre el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza y Lector Vision SL. Mediante la aplicación de técnicas de CV se ha logrado diseñar, desarrollar e implementar un producto fiable y novedoso dedicado a la monitorización del tráfico que actualmente funciona con éxito en España y en el extranjero.

El *know-how* que se ha obtenido como resultado de este proyecto puede ser aplicado a muy diversas situaciones relacionadas con el ámbito de la defensa y la seguridad. Así, es evidente que es posible aplicar estas técnicas a otros problemas de monitorización de puntos de interés a partir de imágenes de vídeo. Por ejemplo:

- Detección, seguimiento y conteo de peatones.
- Control de acceso en instalaciones.
- Seguimiento de vehículos o peatones en áreas restringidas.
- Procesado de imágenes obtenidas desde UAV.

Así mismo, la CV y el *Deep Learning* pueden aplicarse a la detección automática de amenazas a infraestructuras críticas o zonas restringidas en escenarios de conflicto, así como la automatización de la selección de objetivos de fuego (*targeting*).

Agradecimientos

El *software* del proyecto se ha desarrollado en el marco de un contrato de transferencia entre el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza y la Empresa Lector Vision SL, y ha sido financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI).

Referencias

1. *Pajares G, de la Cruz, J M. Visión por computador. Imágenes digitales y aplicaciones. Madrid: RaMa; 2007.*
2. *González R C, Woods, R E. Digital image processing. Upper Saddle River: Prentice Hall; 2002.*
3. *Szeliski R. Computer vision. Algorithms and applications. London: Springer; 2010.*
4. *Hsieh J-W, Yu S-H, Chen Y-S, Hu W-F. Automatic Traffic Surveillance System for Vehicle Tracking and Classification. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2006;7(2): 175-187.*

5. *Zhang J, Wang F-Y, Wang K, Lin W-H, Xu X. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2011;12(4): 1624-1639.*
6. *Sun Z, Bebis G, Miller R. On-road vehicle detection: A review. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2006;28(5): 694–711.*
7. *V. Kastrinaki, M. Zervakis, K. Kalaitzakis. A survey of video processing techniques for traffic applications, Image and Vision Computing 2003;21: 359–381.*
8. *H. Asaidi, A. Aarab, M. Bellouki. Shadow ellimination and vehicles classification approaches in traffic video surveillance context, Journal of Visual Languages and Computing 2014;25: 333—345.*
9. *J. Stauder, R. Mech, J. Ostermann. Detection of moving cast shadows for object segmentation, IEEE Trans. Multimed. 19991(1): 65–77.*
10. *A. Leone, C. Distante. Shadow detection for moving objects based on texture analysis, Pattern Recognition 2007;40: 1222–1233.*
11. *M. Weinmann, Visual Features-From Early Concepts to Modern Computer Vision.*

6B. Comunicaciones tácticas

La evolución y estado actual de los proyectos piloto Galileo-PRS, a bordo del buque de investigación oceanográfica «Hespérides»

Sánchez Mayorga, Jaime Luis[1]* , Rengel Ortega, Juan Antonio[2], Suarez Moreno, Luis Miguel[3], Carballo Rodríguez, Alejandro[4]

[1] Tcol. E.A. Jefe Unidad Espacio de la DGAM, jsanmay@ea.mde.es

[2] CF. Jefe de proyecto investigación IHM-3, jerenortega@fn.mde.es

[3] Investigador INTA-DGAM en el IHM-3, suarezml@INTA.es

[4] Director técnico proyecto piloto Galileo-PRS DGAM, acarrod1@et.mde.es

* Autor principal y responsable del trabajo; jsanmay@ea.mde.es

Resumen

El presente trabajo se enmarca en el contexto de prospectiva tecnológica e industrial de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) perteneciente al Ministerio de Defensa (MINISDEF). Dicho trabajo está relacionado con la validación de la señal del servicio público regulado (PRS) de Galileo en situaciones y ambientes complejos, así como en medir su robustez y fiabilidad. Galileo es un sistema de navegación por satélite de la Unión Europea (UE) que aportará la autonomía de navegación por satélite requerida, tal y como reflejan los documentos de política y estrategia espaciales de la UE. El servicio Galileo-PRS, de marcado interés para la comunidad de seguridad y defensa de la UE, es el motor de la prospectiva mencionada y la razón de los estudios de validación de su señal para las necesidades de los usuarios finales de las Fuerzas Armadas. Dentro de las actividades científicas llevadas a cabo por el buque de investigación oceanográfica (BIO) «Hespérides» en las campañas antárticas, se incorporaron los proyectos piloto para: a) identificar e impulsar la capacidad tecnológica e industrial para el desarrollo de receptores y, b) efectuar la medición y validación de la señal, en latitudes extremas. El objetivo del presente artículo es describir la evolución de los proyectos piloto Galileo PRS de la DGAM en las campañas antárticas 2016, 2017 y 2018, en colaboración con el IHM de la Marina, conocidos como Galileo-PRS IHM (I, II, y III), para lo que se abordarán: a) la descripción de los principios de partida para analizar la señal Galileo-PRS, b) la descripción de las plataformas tecnológicas empleadas, c) una exposición de los resultados obtenidos, d) la descripción de la evolución del grado de validación obtenido y e) una explicación del estado del arte de los receptores empleados para ello.

Palabras clave

Validación, señal PRS, Galileo, navegación por satélite, plataformas, Hespérides, antártica.

1. Introducción

Esta publicación presenta los resultados del proyecto Galileo-IHM 3, en la campaña antártica 2017-2018, continuación de los proyectos Galileo-IHM 1 y 2, de las campañas antárticas anteriores.

Se emplearon equipos y receptores GNSS, para evaluar la señal PRS, mediante su adquisición y grabación con el receptor PRESENCE (GMV y Tecnobit) en las bandas L1 (GPS), E1B (Galileo OS, *Open Service*/servicio abierto) E1B y E1A (PRS, *Public Regulated Service*/servicio público regulado), y la inter-comparación de las señales OS/PRS de Galileo con las de GPS.

La campaña se realizó a bordo del buque científico BIO Hespérides, partiendo desde Punta Arenas (Chile) el 23 de febrero de 2018 hacia las islas Shetland del Sur, y regresando el 04 de marzo de 2018 al puerto de Ushuaia (Argentina), diez días antes de lo previsto debido a la dolorosa pérdida en la mar de uno de nuestros compañeros, el CF Francisco Javier Montojo.

El periodo de tiempo comprendido entre el 05 y el 14 de marzo se empleó para la grabación y análisis de señal PRS en territorio de la Argentina continental, lo que permitió realizar posteriormente, y en post-proceso, navegación en fase con señal exclusivamente PRS.

Se realizaron análisis estáticos y dinámicos. La evaluación de los datos obtenidos es dependiente del tipo de análisis realizado: a) en el análisis estático se evaluó la dispersión de la solución PVT (posición, velocidad y tiempo), caracterizando las medidas de pseudo-rango en función de la constelación y el sistema utilizado, así como las relaciones señal a ruido (C/No); b) en el análisis dinámico se evalúa el error de PVT con adquisición de señal PRS exclusivamente, en derrotas conocidas, como caso de interés para los futuros usuarios del servicio PRS. Adicionalmente y como elemento de referencia para realizar un seguimiento eficiente de todo el espectro GNSS (*Global Navigation Satellite System*) se utilizó el receptor NET-G5 de TOPCON.

En la última fase de la campaña, se realizaron pruebas de posicionamiento dinámico a bordo de un vehículo con el fin de obtener escenarios reproducibles grabados en entornos de operación de alto valor comercial y estratégico para Galileo, tales como diferentes áreas del cono sur.

El estudio contiene un análisis en estático y otro en dinámico, con los que se analizó de forma particular cada uno de los escenarios grabados. A su vez cada estudio comprende diferentes secciones en los que los resultados fueron evaluados conforme a las medidas obtenidas y al cálculo de la PVT.

2. Desarrollo

2.1. Análisis estático

Estuvo condicionado por la operación del buque BIO Hespérides y las condiciones de la mar para el desembarco, por lo que las ventanas de tiempo elegidas, no siempre fueron óptimas ni en el número de satélites a la vista ni en su geometría. Se evaluaron cuatro escenarios, grabados en tierra firme:

a) Península Byers (grabado el 24/02/18): campamento sin infraestructura fija en isla Livingston.

b) Base Gabriel de Castilla (grabado el 26/02/18): base antártica española en isla Decepción.

c) Base Eduardo Frei (grabado el 27/02/2018): base chilena permanente en isla 25 de mayo.

d) Base O'Higgins (grabado el 28/02/2018): base chilena permanente en península antártica.

a) Península de Byers

Es el empleo del receptor TOPCON, se optó por usar las coordenadas conocidas de vértices geodésicos. Su duración fue de aproximadamente 4.500s. El procedimiento seguido para la caracterización de los errores de medida se describe a continuación.

Conocida la posición del usuario, se procedió a la corrección de cada época de medida (e.g. un segundo), correcciones atmosféricas, de órbita y de reloj, para obtener las componentes de la medida no asociada a la geometría (e.g. la corrección de reloj de usuario, que afecta por igual a las medidas de las constelaciones).

Típicamente se optó por compensar con la mediana de las componentes no geométricas, que se revela como la solución más robusta, si bien presenta problemas en escenarios de baja disponibilidad.

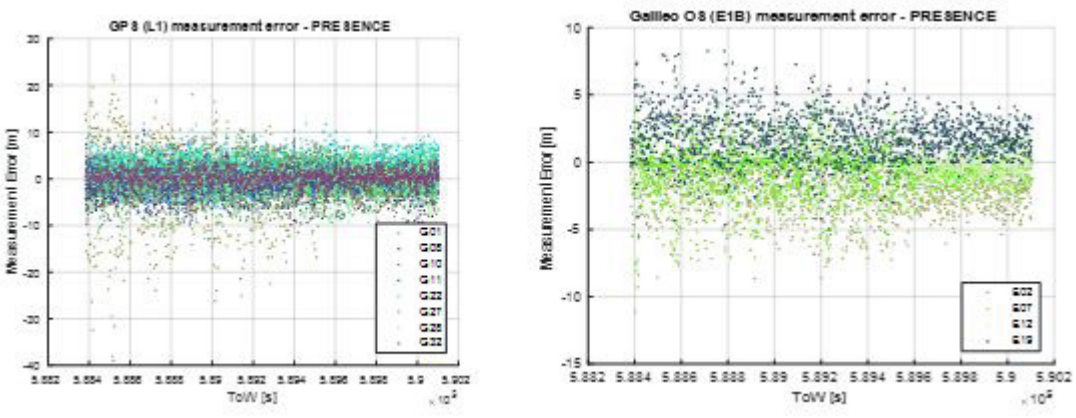


Figura 1. Evolución del error de pseudorango (GPS L1) / GalOS E1B - PRESENCE (Byers).

En las figuras 1, 2 y 3, se muestra la distribución de errores en el receptor PRESENCE para GPS, Galileo OS (E1B) y Galileo PRS (E1A) durante el periodo de simulación. Las figuras 4 y 5 muestran la misma distribución, obtenida con el receptor TOPCON, para GPS y Galileo OS (E1B).

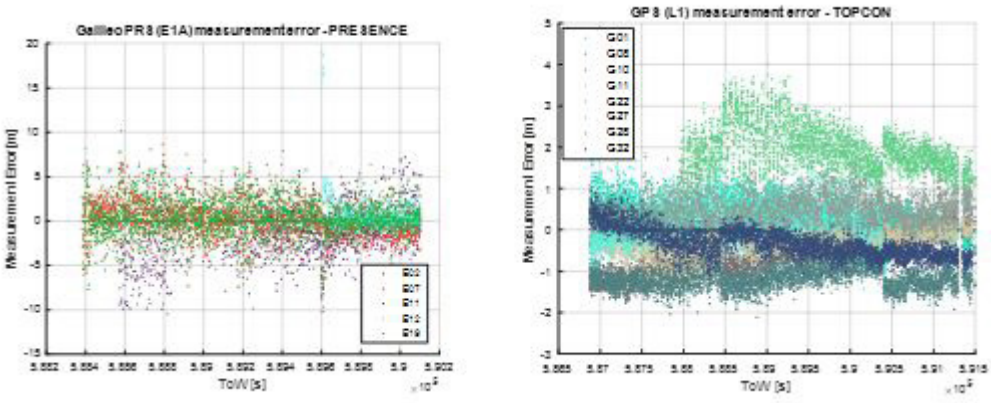


Figura 2. Evolución del error de pseudorango (GalPRS E1A) & PRESENCE & (GPS L1) – TOPCON (Byers).

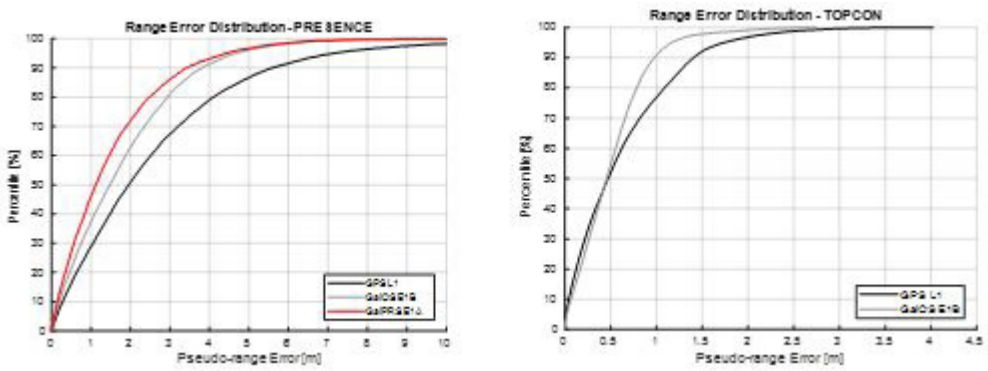


Figura 3. Distribución de errores de pseudorango en receptor PRESENCE y TOPCON (Byers).

La dispersión de los errores de medida para Galileo es menor que en el caso de GPS, por lo que la extrapolación de resultados de sus series temporales no es sencilla; se optó por la representación en términos de distribución. Así obtenemos una idea clara tanto en términos absolutos como relativos.

	GPS L1 [m]		**GalOS E1B [m]**		**GalPRS E1A [m]**	
Perc. [%]	**PRESENCE**	**TOPCON**	**PRESENCE**	**TOPCON**	**PRESENCE**	**TOPCON**
50	1.91	0.47	1.47	0.47	1.01	N/A
68	2.73	0.71	1.96	0.61	1.67	N/A
90	5.51	1.43	3.82	0.98	3.17	N/A
95	7.41	1.86	4.84	1.22	4.83	N/A

Tabla 1. Percentiles relevantes para error de pseudo-rango en PRESENCE y TOPCON (Byers)

Las medidas de E1A disponen de mejor estadística que las de E1B, por haber sido obtenidas procesando la banda lateral superior (emulando una BPSK), mientras que en E1B procesamos ambos lóbulos (BOC completa) [REF_1].

Esto arroja una diferencia de 3dB entre ambas señales, y por ello las prestaciones del receptor TOPCON resultan mejores que las obtenidas con PRESENCE, tanto en GPS como en Galileo OS E1B, algo dentro de lo esperado, teniendo en cuenta las condiciones de medición[1].

Para caracterizar la calidad de las medidas debemos evaluar la relación señal a ruido o C/No, medida en dBHz. La figura 4 muestra la distribución para los distintos sistemas y servicios en el receptor PRESENCE, pero no se muestran datos del receptor TOPCON, dado que la C/No no es un parámetro que el receptor vuelque por defecto en los ficheros RINEX de salida[2].

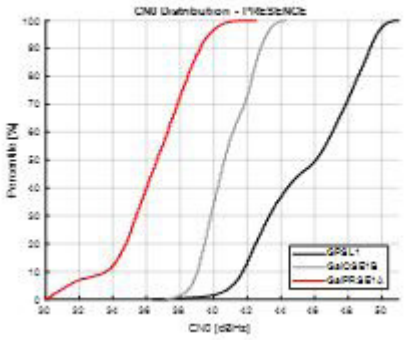


Figura 4. Distribución de C/No en receptor PRESENCE (Byers).

En la figura 5, se identifica un patrón que muestra la diferencia de C/No entre medidas GPS y Galileo. En particular, para un mismo percentil las medidas GPS y Galileo OS E1B están separadas hasta por 5

1 a) La calidad de la medida depende directamente de varios factores relativos al seguimiento de la señal en el lazo, tales como el ancho de banda del DLL o el espaciado de correlación. Estos dos parámetros se encuentran muy relajados en el caso del PRESENCE para maximizar la robustez en el seguimiento de la señal GNSS.
b) Durante el proceso de validación de las medidas de fase en el receptor PRESENCE (posterior a la campaña antártica), se detectó un desplazamiento en la marca de tiempo del receptor. Esto se tradujo en un incremento de los errores de medida y en particular de las medidas de pseudo-rango.
c) El receptor PRESENCE genera medidas de forma independiente, únicamente evaluando el retardo de código existente en cada momento. Es muy probable que el receptor TOPCON realice acondicionamiento de las medidas, así como chequeos cruzados, apoyándose tanto en medidas de fase como de otras bandas (e.g. banda L5/E5).

2 RINEX son las siglas en inglés de *Receiver INdependent EXchange*. Se trata de un formato de ficheros de texto orientado a almacenar, de manera estandarizada, medidas proporcionadas por receptores de sistemas de navegación por satélite, como GPS, GLONASS, EGNOS, WAAS o Galileo.

dBHz. No obstante, el error de medida en Galileo OS es notablemente menor que en GPS, considerando que las señales de Galileo OS contienen características que no existen en las señales de GPS. Este punto queda abierto a análisis futuro.

Un método de validación razonable consistiría en la comparación directa con valores del receptor TOPCON, si bien el valor de C/No exacto depende también de la configuración del lazo de seguimiento, potencialmente distinto en cada receptor[i].

Durante la mayoría del tiempo de observación en modo *only* especialmente, el número de líneas de vista disponibles fue inferior a 4 (se toma el dato del número de satélites pues la geometría en términos de DoP, no pueden ser calculados y es difícil dar una representación visual de cada suceso. En la figura 5 podemos ver cómo el número de satélites Galileo presentes es igual o inferior a 3, y que no permite dar una solución de mínimos cuadrados hasta casi el final del escenario.

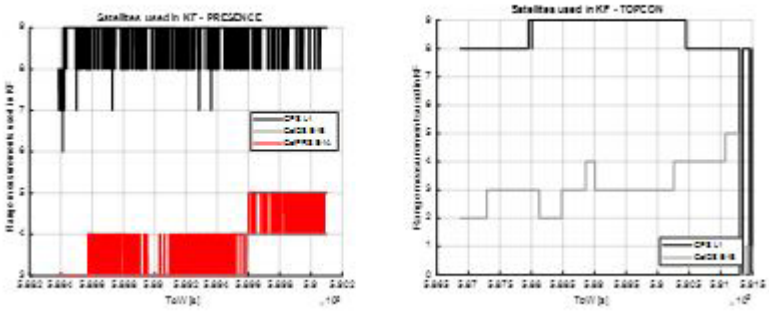


Figura 5. Número de satélites utilizados en solución PVT – TOPCON y PRESENCE (Byers).

En la figura 6 se muestran las diferentes soluciones PVT con ambos receptores, considerando GPS L1 combinado con Galileo OS E1B (que, por motivos de geometría, da las mejores prestaciones), así como Galileo OS E1B, con PRESENCE y TOPCON, y Galileo PRS E1A solo con PRESENCE, cuyas prestaciones son notablemente peores, como es de esperar dada la baja visibilidad.

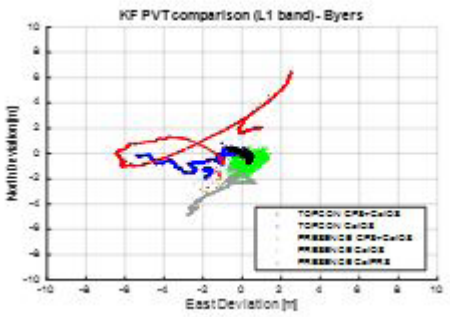


Figura 6. Soluciones de PVT para distintas combinaciones de sistemas de navegación (Byers).

2.2. Análisis dinámico

En esta sección evaluaremos uno de los distintos escenarios grabados con la plataforma PLATRS a bordo del BIO Hespérides, desde el centro de comunicaciones (CECOM). Se grabaron hasta cuatro escenarios diferentes, incluyendo la grabación de señal binaria en la Argentina continental:

- Trayecto 23/02/18: desde Decepción a Byers, con escala en Base Rey Juan Carlos.

- Trayecto 25/02/18: desde Decepción a Caleta Cierva (península antártica).
- Trayecto 04/03/18: vuelta desde las islas Shetland del Sur a Ushuaia.
- Trayecto 11/03/18: El Calafate - Parque Nacional del Chaltén.

De duración variable, se pudieron prolongar incluso días. El escenario desde las islas Shetland del Sur a Ushuaia, con prácticamente 92 horas de grabación de datos, a causa del estado incompleto de la constelación Galileo, intercala fases donde el cálculo de una solución solo Galileo PRS no es posible.

Decepción a Byers, con escala en Base Rey Juan Carlos. Se partió de la Base Antártica Española (BAE) del Ejército de Tierra «Gabriel de Castilla» en isla Decepción hacia la BAE «Juan Carlos I» en isla Livingston. Durante sus 64.000 segundos ininterrumpidos (casi 18 horas), permitió la *caracterización de los errores de medida,* calculados para el receptor PRESENCE basándose en la trayectoria de referencia calculada con el receptor TOPCON (figura 7).

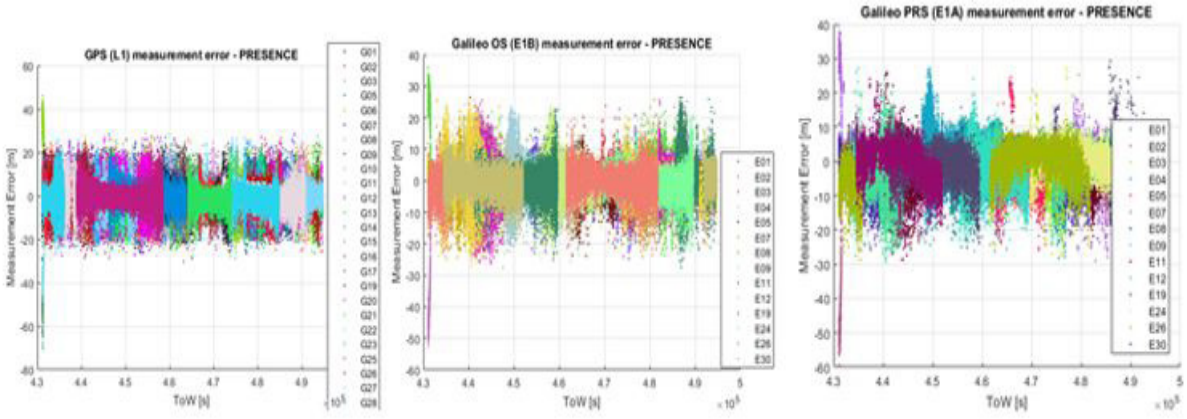


Figura 7. Evoluciones de error de pseudorango (GPS/GalOS/GalPRS) – PRESENCE (23/02/18).

Sin diferencias respecto de los escenarios estáticos, el procedimiento consistió en la obtención de los errores de medida con una posición variable, calculada por el recetor TOPCON. La posición es imprecisa con errores de metros, se identifican ráfagas de medidas de pseudo-rango erróneas (en inglés, *outliers*) dispares de las previstas para el uso de un equipo de posicionamiento diferencial [REF_3].

Las limitaciones previamente descritas pueden observarse en la figura 7 y en la tabla 2. Se demuestra que este análisis de caracterización puede hacerse en todo entorno, siempre y cuando la trayectoria o posiciones de referencia sean fiables.

En la figura 8 se muestran las distribuciones de C/No para el escenario actual con el receptor PRESENCE en consonancia con los ejemplos anteriores, si bien las curvas son más «suaves» al promediar un volumen de datos mayor.

Perc. [%]	GPS L1 [m]	GalOS E1B [m]	GalPRS E1A [m]
50	2.11	1.93	2.29
68	3.22	2.92	3.27
90	7.39	6.41	6.41
95	10.16	8.92	8.62

Tabla 2. Percentiles relevantes para error de pseudo-rango en PRESENCE (23/02/18)

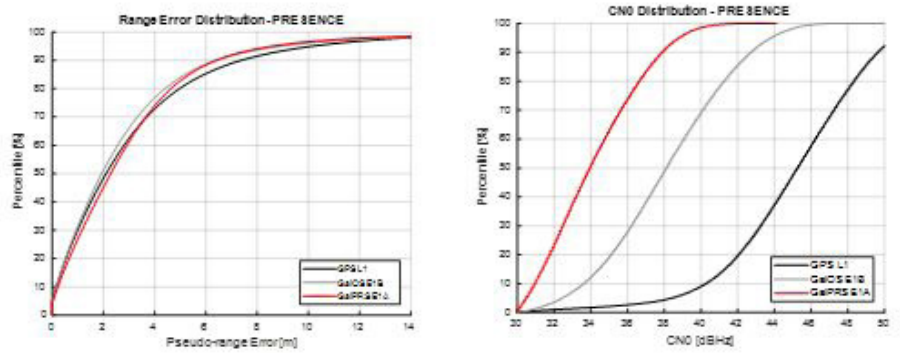


Figura 8. Distribución de errores de pseudorango y C/No en receptor PRESENCE (23/02/18).

2.3. Análisis de resultados PVT

El análisis de PVT a bordo del BIO Hespérides es visual, en base a la cartografía de Google Earth (figura 9: recorrido desde la isla de Decepción a isla Livingston,), primero a BAE Rey Juan Carlos I y luego hasta el campamento Byers.

Figura 9. Visualización del trayecto en Google Earth (23/02/2018).

Al cruzar la trayectoria de referencia calculada con el receptor TOPCON, con el posicionamiento relativo del equipo PRESENCE, la única variable es la de este receptor, y la solución PVT TOPCON es la única de referencia GPS + Galileo para todos los casos.

Como vemos en la figura 10, la visibilidad es buena, oscilando entre 4 y 6 líneas de vista Galileo disponibles, salvo un periodo de 5.000 s entre ToW = 450.000 s y ToW = 455.000 s donde el número cae a 2-3. Se espera que las soluciones Galileo *only* (E1B/E1A) se comporten bien, salvo donde el comportamiento sea impredecible, por efecto de la calidad de las medidas recibidas [REF_4].

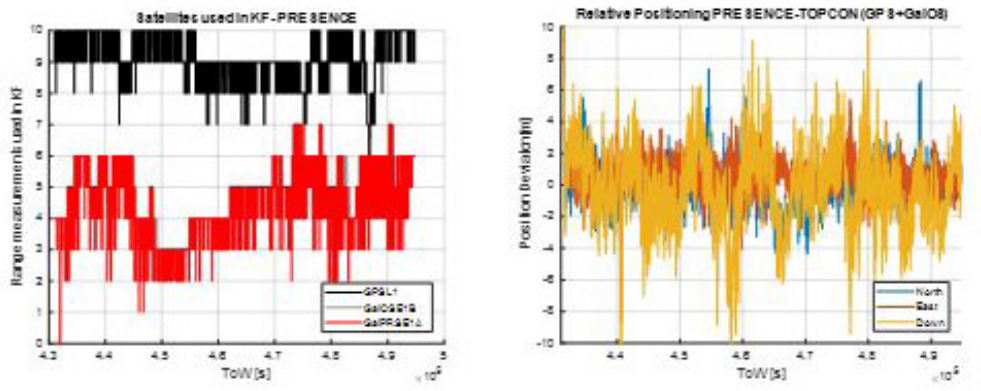


Figura 10. Satélites utilizados solución PVT y Posicionamiento relativo PRESENCE-TOPCON (GPS+GalOS) – Serie Temporal – PRESENCE.

La figura 11 muestra la distribución de dicho posicionamiento relativo, donde en efecto se confirma que la discrepancia entre ambos receptores es menor a 2 m en valor absoluto el 95 % del tiempo para las componentes asociadas a la discrepancia horizontal (Este/Norte).

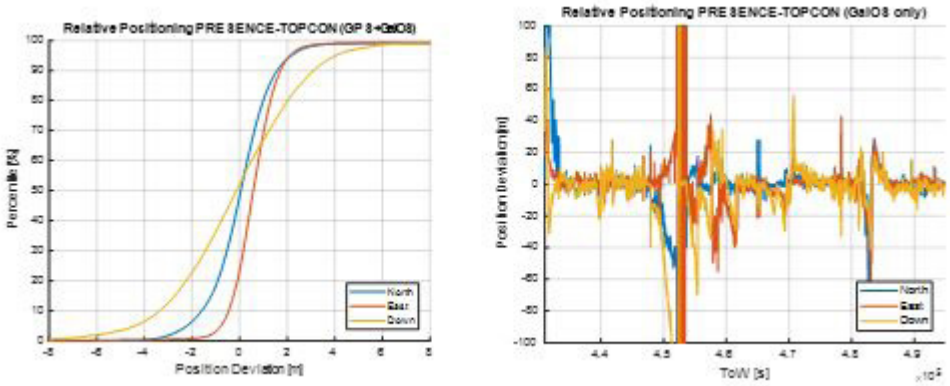


Figura 11. Posicionamiento relativo PRESENCE-TOPCON (GPS + GalOS) – Histograma y Galileo OS only.

La figura 11 representa la discrepancia entre soluciones TOPCON (GPS + GalOS) y PRESENCE (GalOS), con un comportamiento nominal razonable, excepto en periodos con errores superiores a los 50 m en cada componente, para un pseudo-rango, pero con 3 o menos satélites a la vista. De forma análoga al caso anterior, se distribuyen estos errores globalmente a lo largo del escenario para cada componente en horizonte local (figura 12).

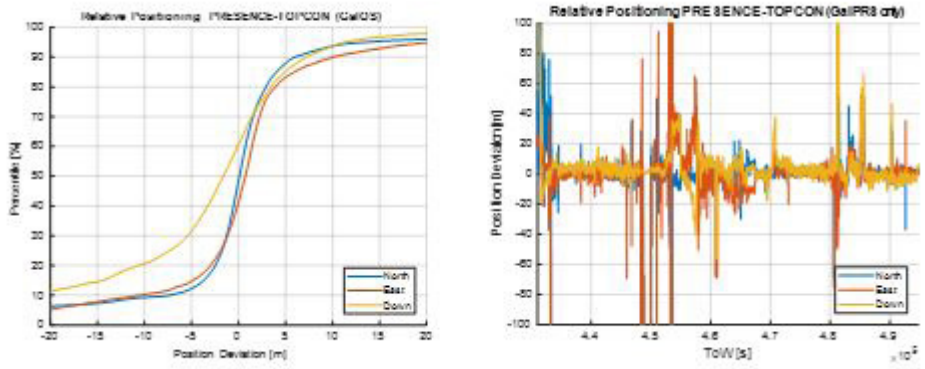


Figura 12. Posicionamiento relativo PRESENCE-TOPCON (GalOS) y (GalPRS) – Histogramas.

Si consideramos un 10 % del escenario bajo condiciones de no disponibilidad (85 % del tiempo), el error es de las componentes horizontales (Este/Norte) cae por debajo de los 5 m; un resultado razonable frente a la solución conjunta GPS + Gal OS. De forma idéntica, la figura 12 muestra la serie temporal de la solución Galileo PRS y el histograma de distribución de discrepancia de componentes entre el TOPCON y PRESENCE PRS *only*.

3. Resultados y líneas tecnológicas futuras. Galileo IHM 4

A lo largo del documento, se han presentado los resultados de la campaña antártica Galileo-IHM 2018, dentro de las actividades descritas para el proyecto piloto de la DGAM, PLATRS. En particular, se han analizado las prestaciones del receptor PRESENCE, en términos absolutos (comparando con un vértice geodésico o midiendo desviaciones de posición) y en relativos, respecto del receptor TOPCON NET-G5 incorporado en la misma plataforma de medida.

Se constata que las prestaciones se mantienen estacionarias en ambos casos, aún con ciertas particularidades, debido a las condiciones de la grabación, que producen una dispersión mayor en los resultados [REF_5].

El análisis se ha enfocado desde el punto de vista de la medida, para mostrar su impacto en la solución de navegación. No obstante, el análisis de prestaciones finales en términos de PVT para el usuario y su comparativa respecto a otros sistemas (i.e. GPS) solo podrá realizarse una vez la constelación Galileo se encuentre completa.

La ejecución del proyecto piloto, resulta extraordinariamente útil para la mejora en tiempo de procesado del receptor (SW y FW), para la definición de las estrategias tecnológicas PRS a seguir, y se han identificado los siguientes puntos a ser cubiertos en versiones futuras del presente trabajo:

- En los escenarios procesados con RINEX (i.e. grabados en tiempo real), las medidas PRS se generan en banda lateral única (BLU). La señal Galileo PRS, como una BPSK centrada en 1.590,42 MHz (banda superior), facilita el procesado de la señal y la lógica de enlaces en picos secundarios, en detrimento de una pérdida de 3dB en la calidad de la señal. Se espera que, a corto plazo, se pueda mejorar la calidad de la señal PRS (E1A), alcanzando mejores prestaciones en términos de error de medida y C/No que la señal OS (E1B) [REF_6].
- En diversos escenarios, se han observado diferencias entre OS y PRS superior a los 3 dB, que podrían deberse a un ajuste del ancho de banda en el *front-end* del receptor, y que deberá ser tratado con el fabricante [REF_6].
- La versión actual del receptor PRESENCE cubre el uso de señal PRS, si bien deben resolverse algunas cuestiones, que permitan trabajar con datos y pilotos indistintamente, lo que debe traducirse en una mejora de precisión y flexibilidad. Los escenarios aquí mostrados no incluyen este aspecto, por ser resultados post-correlación.
- Medidas de fase PRS. En el presente documento solo han sido procesadas medidas de pseudo-rango y Doppler. En la versión actual del receptor, falta de validar la medida PRS E1A. Análisis típicos de fase, podrían ser incluidos en futuras versiones del documento.
- Refinamiento de las técnicas de readquisición de satélites. Mayor robustez de recuperación frente a desvanecimientos de la señal.
- Mejoras en el arranque autónomo de la señal PRS. Actualmente una nueva unidad de adquisición PRS se encuentra implementada, a falta de ser integrada en el receptor.

4. Agradecimientos

Debemos agradecer la ejecución del proyecto piloto a todos aquellos que han facilitado las campañas antárticas de 2017 y 2018, a las autoridades que las han permitido, y a los hombres y mujeres que han estado involucrados en su desarrollo, tanto desde tierra, en su preparación, como a bordo del BIO Hespérides, en su ejecución.

Reconocimiento especial a nuestro querido compañero, marino y científico CF Javier Montojo, «Monti» con quién planificamos abordar esta publicación y concebimos entre los autores de la misma, y a quién dedicamos el resultado final de este trabajo cuyas señas de identidad le son muy propias: marino, científico, español con perspectiva universal y talante de entrega y servicio a los demás.

Referencias

1. *Ávila-Rodríguez JA (2008) On generalized signal waveforms for satellite navigation, PhD thesis, Munich, June 2008.*
2. *Lohan ES, Lakhzouri A, Renfors M (2006b) Complex double-binary-offset-carrier modulation for a unitary characterization of GALILEO and GPS signals. IEE Proc Radar Sonar Navig 153(5):403–408.*

3. *Bonhoure B, Boulanger C, Marechal J (2010) Long-term and multi-receiver GPS/ Galileo GIOVE mixed PVT experimentation. In: Proceedings of ION GNSS 2010, Portland, OR, US, 21–24 Sept 2010, pp. 3309–3319.*
4. *Pérez E, Thombre S, Valkama M, Lohan S, Syrjälä V, Detratti M, Hurskainen H, Nurmi J (2010) Local oscillator phase noise effects on GNSS code tracking. InsideGNSS Magazine 52–62 (November 2010).*
5. *Borre K, Akos DM, Bertelsen N, Rinder P, Jensen SH (2007) A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach. Birkhäuser, New York.*
6. *Pérez E, Thombre S, Valkama M, Lohan S, Syrjälä V, Detratti M, Hurskainen H, Nurmi J (2010) Local oscillator phase noise effects on GNSS code tracking. InsideGNSS Magazine 52–62 (November 2010).*

Segmento radiocomunicaciones de la I3D

Fornet Ruiz, Jaime José[1,*]

[1] Centro de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CESTIC). Arturo Soria 289, 28033 Madrid. Correo electrónico: jforru1@mde.es (JF).

* Autor principal y responsable del trabajo: jforru1@mde.es (JF).

Resumen

El Ministerio de Defensa está realizando un gran esfuerzo en el proceso de modernización de las FAS mediante la puesta en marcha de una estrategia de la información que permita afrontar su tratamiento eficaz, eficiente y seguro como un recurso estratégico, sustentado por las tecnologías de la información y las comunicaciones. Dentro de todos los procesos puestos en marcha, en línea con la modernización del Ministerio de Defensa, se encuentra la creación de una nueva infraestructura integral de información para la defensa (I3D) que desde su concepción se ha revelado como herramienta crítica de la modernización de las FAS, tanto desde su perspectiva operativa como desde la perspectiva de racionalización de los recursos humanos y técnicos que posee el Ministerio de Defensa. La nueva red I3D deberá asegurar la provisión de servicios CIS/TIC (por *Communication and Information Systems*/tecnologías de información y comunicaciones) a los diferentes tipos de usuarios del Ministerio de Defensa en todos los emplazamientos, plataformas y puestos de trabajo. Así mismo, deberá permitir el acceso a los usuarios desde emplazamientos y ubicaciones no pertenecientes al Ministerio de Defensa (redes y usuarios remotos) así como la interacción de usuarios del Ministerio de Defensa con otras organizaciones, nacionales e internacionales, a través de pasarelas y puntos de interconexión debidamente asegurados y normalizados. Para ello la nueva I3D dispondrá de una infraestructura de telecomunicaciones terrestres (ITT), una infraestructura de telecomunicaciones vía satélite (ITS) y una infraestructura de telecomunicaciones inalámbricas (ITI). A su vez, la ITT incluirá un segmento de radiocomunicaciones (basado en radioenlaces) y un segmento de cableado (basado en fibra óptica) que agregará el segmento radio en el terrestre.

El objetivo de este artículo se centra en el segmento de radiocomunicaciones que a partir de la migración tecnológica de la red actual se integrará en la nueva I3D haciendo uso de las tecnologías más modernas y avanzadas que actualmente se disponen.

Palabras clave

Radioenlaces, comunicaciones, redes, CIS/TIC.

1. Introducción

a. Escenario actual

Actualmente el Ministerio de Defensa dispone de dos redes extendidas (WAN, acrónimo de *Wide Area Network*) que proporcionan servicios de telecomunicaciones y que conforman dos infraestructuras tecnológicas independientes, físicamente separadas:

1) Red de propósito general (WAN PG, red contratada a operadores comerciales).
2) Red de mando y control (WAN C2, red propia con algunos servicios externalizados) que proporciona servicios al Ministerio de Defensa.

La Orden DEF/2639/2015, de 3 de diciembre, establece la Política de Sistemas y Tecnologías de Información y Comunicaciones del Ministerio de Defensa. Esta Política CIS/TIC proporciona una visión global e integral de los recursos del Ministerio de Defensa en esta materia, basada en las misiones y operaciones y en las capacidades operativas del Ministerio de Defensa, poniendo énfasis en la prioridad de las capacidades CIS/TIC para las FAS y en su normalización para asegurar la interoperabilidad.

En su artículo 6.2 se recogen los ejes estratégicos de actuación, entre los que se encuentra: «avanzar hacia una única infraestructura integral de información para la defensa (I3D), gestionada por el Centro de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CESTIC)».

La infraestructura única CIS/TIC del Ministerio de Defensa proporcionará un entorno de servicios CIS/TIC asegurando el tratamiento único de la información a la que accedan los usuarios de un modo ágil, seguro, fiable y sin discontinuidades. Esta infraestructura integrará las capacidades CIS/TIC actuales y futuras del Ministerio de Defensa y será el resultado de un proceso de transición desde la situación actual que será recogido en el Plan Estratégico CIS (PECIS). En el escenario actual, existe una gran diversidad de redes de telecomunicación (WAN y LAN), CIS/TIC de usuario que transmiten, procesan y almacenan la información del Ministerio de Defensa. Esta situación provoca serias disfunciones, redundancias y limitaciones en el acceso a la información, dificultando su gestión y multiplicando las necesidades de redes y sistemas de telecomunicaciones y de recursos de procesamiento y almacenamiento[1].

En consecuencia, ante esta situación es imprescindible la integración, convergencia y unificación de las infraestructuras CIS/TIC existentes en una misma infraestructura que permita una gestión más óptima de la información requerida por los usuarios, así como la unificación de la obtención de recursos y contratación de servicios CIS/TIC.

Por otro lado, y en el ámbito de la Administración General del Estado, la Estrategia TIC, aprobada en el Consejo de Ministros del 2 de octubre de 2015, contempla un nuevo modelo de prestación de servicios más racional, articulado en torno a la idea de servicios compartidos, de carácter obligatorio y sustitutivo de los anteriormente existentes, salvo singulares excepciones, y a la idea de infraestructuras comunes en el ámbito de las tecnologías de la información y las comunicaciones, sin perjuicio de potenciar los servicios sectoriales de cada Ministerio.

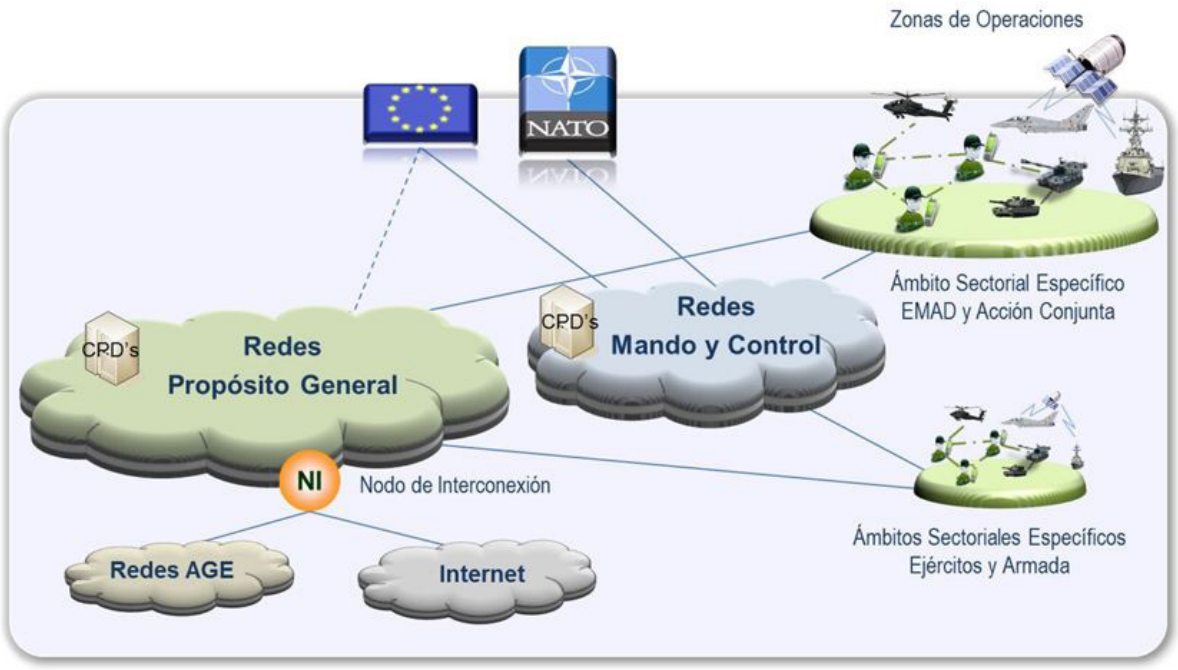


Figura 1. Escenario actual.

Por lo tanto, los servicios CIS/TIC transversales a todo el Ministerio de Defensa, declarados de uso compartido en la Administración General del Estado (AGE), deben converger con los principios y objetivos de la citada Estrategia TIC.

b. Escenario objetivo

Una vez superado el paradigma de la segregación de las redes de telecomunicaciones de PG y C2, se desea impulsar una estrategia común para la evolución de los servicios de telecomunicaciones del Ministerio de Defensa que permita definir una nueva y única infraestructura integral de información para la defensa (I3D). La I3D proporcionará unos servicios de transporte de telecomunicaciones transversales para todos los sistemas de información del Ministerio de Defensa. Adicionalmente, la I3D deberá disponer de la arquitectura adecuada para dar servicio a los emplazamientos de mayor sensibilidad para el ejercicio del mando y control militar y sus funciones asociadas, y a la vez dar servicios CIS en base a una WAN multipropósito (WAN MP) totalmente explotada y mantenida en base a un modelo de servicio por el Ministerio de Defensa.

Adicionalmente a lo descrito hasta ahora para el ámbito exclusivamente nacional, se deberá mantener, a su vez, el cumplimiento de las necesidades y requisitos demandados por la NATO SECRET WAN, y de las necesidades de interconexión e intercambio que provenientes de esta se demanden.

La transición desde la situación actual hasta la prevista se llevará a cabo mediante la convergencia de las dos redes WAN existentes, propia y alquilada, hacia una infraestructura única que integre ambas, con un modelo de red mallada[2], asegurando la comunicación continua y permanente en caso de fallo temporal de algún enlace de la misma. Así mismo, la infraestructura única dispondrá de un núcleo protegido que asegure la supervivencia de determinados servicios CIS/TIC, con el alcance necesario que posibilite el funcionamiento del sistema de mando y control militar, incluso en situaciones adversas o ante cualquier tipo de incidente que afecte a la misma[1].

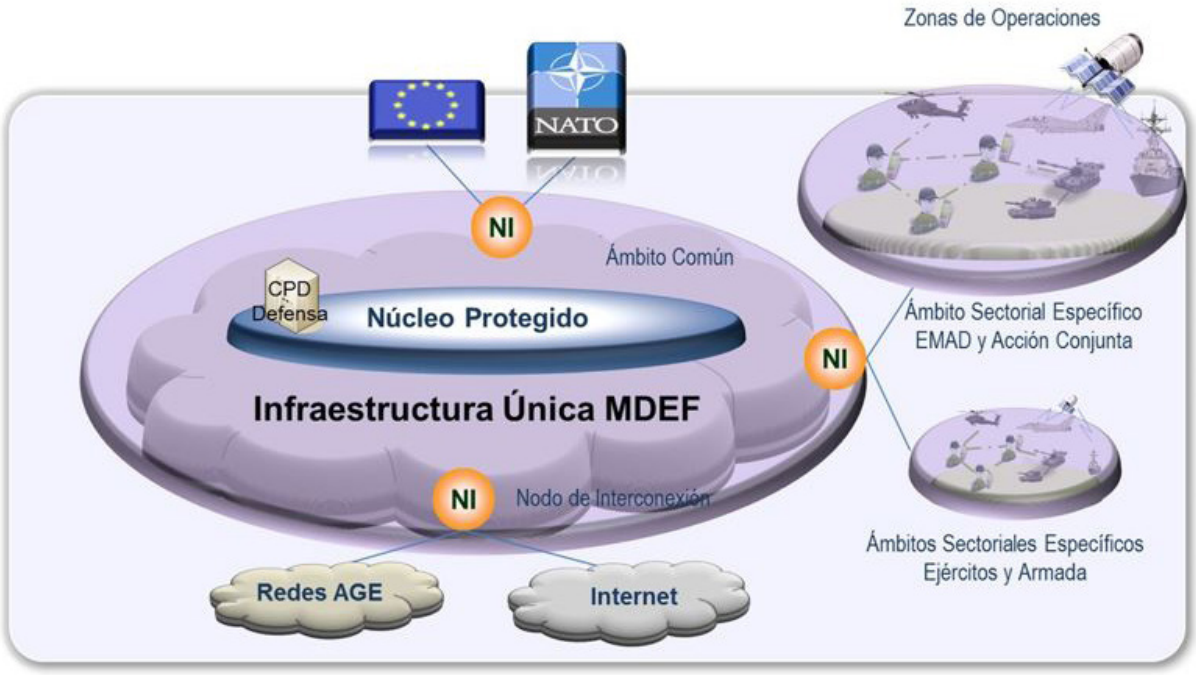


Figura 2. Escenario objetivo.

2. Características principales

2.1. Generales de la I3D

Las principales características que se han identificado para la I3D son:

- Se estructurará en un núcleo protegido y otros nodos de ámbito común en el resto de la infraestructura.
- El número de puntos de presencia se reduce respecto al actual en las dos redes debido a que alguno de ellos pasan a formar parte de la red general de la Administración, como ya hemos comentado.
  - Se estima inicialmente en unos 400 aproximadamente.
  - El acceso de los centros principales será a 10 Gbps como mínimo.
  - El acceso de los restantes centros será a 1 Gbps como mínimo.
- Se basará en transmisión óptica, en configuración de malla fotónica. Se contemplará el uso de OTN (en inglés *Optical Transport Network*) para adaptar comunicaciones con interfaces antiguas[3].
- Sobre la capa óptica existirá una capa de red IP/MPLS.
- Existirán ubicaciones que se comunicarán en todo o en parte por radioenlaces debido a sus características.

2.2. Particulares de los radioenlaces

Los radioenlaces tienen un papel importante en las redes de agregación de las redes móviles actuales. Pese a su progresiva sustitución por enlaces de fibra óptica debido a su mayor capacidad, siguen teniendo mucha relevancia actualmente, especialmente en zonas remotas de difícil despliegue de fibra, y habilitando la cobertura de banda ancha móvil a zonas actualmente no viables económica o técnicamente para la introducción de la fibra óptica.

Los incrementos de capacidad en los nuevos sistemas y su evolución futura 5G, están tirando de la evolución de la tecnología de los radioenlaces de microondas, que se prevé siga siendo competitiva para ofrecer soluciones de cada vez mayor capacidad con la ventaja de ser desplegables de forma muy rápida.

A continuación se mencionan algunas de las evoluciones y áreas de mejora de las radiocomunicaciones previstas en el medio plazo:

- Esquemas de modulación por encima de 2.048 QAM (e incluso por encima de 4.096 QAM) y anchos de canal superiores a 56 MHz (112 MHz).
- LOS-MIMO en frecuencias medias/altas.
- Capacidades de tráfico superiores a 1Gbps en bandas tradicionales.
- Capacidades por encima de 10Gbps en banda E y por encima de 5Gbps en banda V.
- Solo full-packet MW, objetivo <2 saltos a fibra.
- Intensificación de sistemas *Full Outdoor* y radioenlaces duales para esquemas N+0 compactos.
- ACM + H-QoS = balanceo de alta capacidad y disponibilidad.
- Funcionalidades L3 IP/MPLS.
- PtP y PMP alta capacidad para aplicaciones de red.
- SDN/NFV: gestión unificada de radios. Modelos de información abiertos. Control dinámico centralizado de MBH. Progresiva virtualización de funciones.

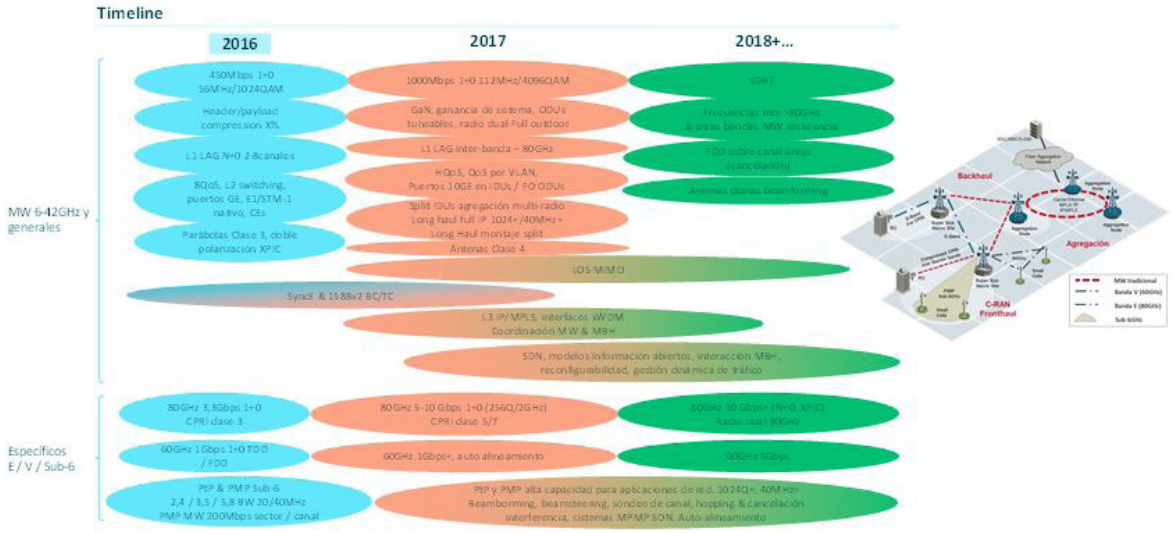


Figura 3. Evolución tecnológica de los radioenlaces.

Teniendo en cuenta estos factores se ha elaborado un Catálogo de Arquitecturas de Referencia y/o Objetivo que se puedan aplicar una vez que la fase de diseño terrestre esté finalizada y se conozcan los emplazamientos finales que estarán dotados de radioenlaces.

Para la elaboración de este catálogo se ha realizado previamente una consulta a la industria sobre las soluciones actuales que son posibles de implementar, tanto en fibra óptica como en tecnologías de radiocomunicaciones, atendiendo a los estándares más altos de calidad y prestaciones técnicas.

3. Evolución tecnológica

Las redes actuales del Ministerio de Defensa están construidas a partir de segmentos verticales (silos) construidos por elementos de red cuyo *software* y *hardware* está diseñado para la misión específica que deben satisfacer. Con el tiempo, la extensión incremental de las capacidades de red a partir de la adición de nuevos elementos que coexisten con tecnologías obsoletas ya desplegadas, ha producido un aumento exponencial de la complejidad del despliegue, operación y mantenimiento.

Para aliviar esta situación de complejidad, un grupo de operadores, lanzó el grupo de estandarización de las tecnologías de virtualización de red *Network Functions Virtualization Industry Specification Group* (NFV ISG) en octubre de 2012, con el objetivo de habilitar la provisión dinámica de funciones de red, construidas como funciones *software* desacopladas del *hardware* que corren sobre servidores de propósito general[4].

Por otro lado, SDN (*Software Defined Networking*) es una tecnología que permite desacoplar los planos de control y gestión del plano de datos de red, y convierte en señalización gran parte de las operaciones que tradicionalmente se han realizado a través de los operadores de servicios y señalización, simplificando fuertemente la gestión y operación de red.

Existe consenso en la industria que NFV y SDN tendrán un papel fundamental en la transformación de las redes de comunicaciones futuras, para construir redes flexibles y eficientes a través de:

- Una mejora en la interoperabilidad.
- La simplificación de la operación y mejora de la agilidad, sustituyendo gestión por señalización a través de la capacidad de programar la red.
- La coordinación entre capas, para optimizar el transporte del tráfico por la capa más adecuada y evitar vacancias en red.
- Una infraestructura homogénea, permitiendo incrementar la capacidad de forma flexible y sencilla.

4. Conclusiones

El Ministerio de Defensa tiene como objetivo que su modelo de gestión de CIS/TIC sea flexible, combine aspectos de múltiples marcos de referencia y normas, proporcione un lenguaje común y homogéneo y contenga orientaciones para mejorar la eficacia, la eficiencia y la seguridad de la información.

El diseño de la red I3D se basa en las tecnologías disponibles a día de hoy, que son las que permitirán soportar los servicios prestados de la forma más eficiente posible. Sin embargo, el despliegue de la I3D no será inmediato y existirá un periodo relativamente largo hasta que sustituya a las infraestructuras actuales.

Las consultas realizadas a fabricantes de radioenlaces y a las empresas integradoras de servicios de telecomunicaciones por radiocomunicaciones ha puesto de manifiesto la tendencia de que existe un cambio de paradigma en marcha, pero vino también a poner claramente de manifiesto que aún no está claro el alcance que tendrá ese cambio, ni cuáles serán los desarrollos tecnológicos que se impondrán cuando maduren esas tecnologías. Todo ello conforma un escenario incierto en donde no resulta posible definir con suficiente claridad los medios técnicos idóneos para satisfacer las necesidades de equipamiento en el periodo de migración tecnológica a la nueva I3D.

Por tanto, se deberá estar expectante a la evolución de las nuevas tecnologías y arquitecturas que podrían incorporarse al diseño de la red en busca de mayores capacidades, mayor flexibilidad o una gestión más eficiente de las infraestructuras y servicios, con el propósito de abordar la migración de la actual red hacia la I3D de forma que obtengamos una red moderna con los más altos estándares de calidad que pueda mantenerse en operación durante muchos años y con muy altas prestaciones.

Referencias

1. *Instrucción 58/2016, de 28 de octubre. Arquitectura Global de Sistemas y Tecnologías de la Información y Comunicaciones del Ministerio de Defensa (AG CIS/TIC). Boletín Oficial del Ministerio de Defensa (BOD Núm. 216) Sec. I. Pág. 26211, apartado 4.4.1.*
2. *Instrucción 33/2018, de 6 de junio. Plan Estratégico de los Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones del Ministerio de Defensa. Boletín Oficial del Ministerio de Defensa (BOD Núm. 111) Sec. I. Pág. 14360.*

3. *Timothy P. Walker, Optical Transport Network (OTN) Tutorial. International Telecommunication Union (ITU).*
4. *ETSI NFV White paper, Oct. 2012: https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf*

Smallsats y constelaciones en órbita baja: aplicaciones para la defensa y seguridad

Lamelas, Guillermo[1], Nodar López, Diego[1], Durban García, Pablo[2*] y Alonso, Eduardo[2]

[1] Alén Space.

[2] Everis Aeroespacial y Defensa.

* Autor principal y responsable del trabajo: *pablo.durban.garcia@everis.com*

Resumen

El paradigma de la tecnología satélite, accesible únicamente a naciones o empresas con grandes recursos, ha cambiado radicalmente en los últimos años.

Reduciendo tamaño y requerimientos de fiabilidad se habilita un significativo abaratamiento del desarrollo, fabricación en serie y lanzamiento de un satélite. Actualmente, más de 800 pequeños satélites han sido lanzados y los desarrollos activos indican que, en el futuro, esta cantidad se multiplicará sustancialmente. Se trata de un cambio de paradigma: en lugar de un satélite tradicional de órbita geoestacionaria, varios satélites en órbita baja operando como constelación, lo cual permite multiplicar la cobertura de servicio, reduciendo el riesgo de un único punto de fallo y el coste del servicio. Este nuevo modelo tiene alto interés en el campo de las comunicaciones en diversos ámbitos como el militar, el de la seguridad o el de las emergencias.

Este artículo pretende explorar aplicaciones del paradigma *NewSpace* en el campo de la defensa y la seguridad, así como sus potenciales aplicaciones (comunicaciones tácticas, Internet de las cosas en el mundo militar (MIL-IoT), monitorización del espectro, guerra electrónica, etc.).

Palabras clave

SATÉLITE, PICOSAT, SMALLSAT, RADIO, ISR, IOT, MIL-IOT, NEWSPACE.

1. Introducción: el paradigma *NewSpace*

Desde que a mediados de los años 50 se comenzara la carrera espacial, la industria espacial ha nacido y crecido bajo el empuje de los gobiernos y sus agencias espaciales: comunicaciones, observación de la tierra, etc. Esto comenzó a cambiar a principios del siglo XXI, cuando las compañías privadas toman el relevo de gobiernos y agencias nacionales.

En 1999 el reducido tamaño del estándar CubeSat [1] impedía *de facto* utilizar electrónica calificada para espacio. Esto motivó la rotura de la espiral de coste que había dominado hasta entonces el desarrollo de los sistemas espaciales (el lanzamiento –incluyendo el seguro– tiene un coste muy elevado) lo que obliga a una elevada vida útil. Esto implica, utilizar componentes electrónicos calificados para espacio (coste varias veces superior a otras industrias) e introducir redundancia multi-nivel, lo que conlleva mayor coste y un aumento considerable de la masa/tamaño del satélite que, de nuevo, aumenta el coste del lanzamiento. Además, la complejidad de dichos sistemas implica tiempos de desarrollo y fabricación de varios años y la utilización de tecnología probada pero anticuada.

La utilización de electrónica de consumo reduce fiabilidad y tiempo de vida, pero permite romper este círculo. A costa de asumir menor fiabilidad se reduce masa y tamaño y, por lo tanto, coste; tanto de los componentes utilizados como del lanzamiento. Esto tiene dos consecuencias directas positivas:

1. Aprovechar el desarrollo que está teniendo la electrónica de consumo, mejorando la miniaturización y aumentando las prestaciones.
2. La reducción de costes permite fabricar y lanzar muchos satélites por el mismo precio que uno convencional, por lo que ya se habla de constelaciones.

Son estas constelaciones las que han permitido la gran revolución. Aún con una fiabilidad unitaria menor, se distribuye el riesgo, hablando de fiabilidad del sistema. Además, las constelaciones conllevan otras mejoras: aumentan el tiempo de revisita [2] y permiten reemplazar satélites originales por nuevos con mejores instrumentos. Adicionalmente, se logran niveles de fiabilidad razonables para cada satélite manteniendo unos costes contenidos (puesto que los costes se disparan cuando se persiguen fiabilidades próximas al 100 % [3]).

2. Smallsats y el sector defensa - seguridad

Las capacidades espaciales (comunicaciones, observación, inteligencia, navegación, etc.), de alto interés e importancia para el mundo de la defensa y seguridad, no son en absoluto ajenas a la evolución descrita. El modelo *NewSpace* aplicado al mundo de la defensa y seguridad aporta ventajas y posibilidades fuera del alcance de sistemas tradicionales, a los cuales vienen a complementar.

2.1. Mejora de parámetros técnicos clave

- Menores pérdidas: reducir la distancia de 36.000 a 500 km entre terminal y satélite mejora el margen del radioenlace en aproximadamente 37dB y permite reducir la potencia del transmisor y

la directividad de las antenas. Se reduce así el consumo-peso-tamaño del terminal que porta una persona, vehículo o munición.

- Menor latencia: por la misma razón anterior, el parámetro latencia, clave para aplicaciones en tiempo real, se reduce significativamente.

Órbita		GEO	MEO	LEO
Altura	km	36.000	10.000	500
Retardo	ms	239	67	3
Pérdidas de enlace	dB	173	162	136

Tabla 1: Principales diferencias GEO-MEO-LEO. Adaptado de [4]

- Mejora de la cobertura: por encima de 65ºN y por debajo de 65ºS, se tienen dificultades para comunicar con un satélite GEO. La existencia de constelaciones puede ofrecer cobertura y servicio global aumentando las capacidades ofrecidas [7].
- Capacidad para mover grandes volúmenes de datos a grandes distancias. Abandonando el modelo tradicional (*bent-pipe*), una constelación ofrecería la posibilidad de establecer enlaces de alta capacidad intersatélite y, por tanto, un enlace virtual entre dos puntos de la geografía terrestre, separados por miles de kilómetros, proporcionando incluso velocidades mayores que la fibra en grandes distancias (> 6.000km). Además se evitan así estaciones de anclaje en tierra permitiendo una mayor seguridad, al eliminar puntos débiles y de potencial ataque del sistema [7].

2.2. Mayor robustez y resiliencia: principal ventaja

Desde la primera guerra del Golfo (1991), en la que apareció el concepto de *Connected Battlefield*, las comunicaciones satelitales se constituyen en un elemento vital, puesto que, a priori, están siempre disponibles, incluso cuando todas las demás posibilidades (fibra, 4G/5G, radioenlaces,…) fallan. El requerimiento de poder desplegar rápidamente y operar en zonas remotas, conlleva la necesidad de una infraestructura propia de comunicaciones.

Diversos países han demostrado ya [14] o están desarrollando la capacidad de destruir o inhabilitar un satélite GEO. En palabras de la secretaria de la US Air Force «nuestros satélites son casas de cristal construidas para un mundo sin piedras» [8]. La destrucción de un satélite por parte de un enemigo tendría un impacto enorme; esa posibilidad ya no parece tan remota.

El paradigma de un sistema distribuido formado por pequeños satélites constituye una respuesta de alto interés. Permite desarrollar y desplegar constelaciones persistentes que puedan operar en modo degradado: un servicio ofrecido por múltiples satélites incrementa la resiliencia frente a ataques electrónicos (interferencia) o físicos (misil tierra-espacio). La pérdida de un satélite degrada el servicio pero no lo interrumpe. Además, la necesidad de interferir múltiples señales en el cielo simultáneamente obliga a reducir la potencial cantidad de energía aplicada en cada uno de ellos. La relación entre el coste de un satélite tradicional y el coste de atacarlo, hoy día, favorece claramente al atacante. En una constelación de pequeños satélites esta ecuación se invierte de manera radical.

2.3. Mayor capacidad de respuesta operativa

Desde 2007 el US-DoD viene desarrollando el concepto de *Operationally Responsive Space* (ORS) centrado en poder aumentar, expandir y reconstituir rápidamente capacidades de comunicación e inteligencia satelital, solicitados por el combatiente a nivel táctico, sin necesidad de aprobación a niveles estratégicos.

Históricamente las decisiones relacionadas con la gestión de infraestructura satélite (diseño, lanzamiento, operación, gestión, asignación de recursos…) se toman a un nivel estratégico y centralizado y en plazos de años/meses. *Responsive Space* pretende cambiar esto, permitiendo al combatiente decidir cuándo y cómo necesita usar la capacidad e, incluso, la posibilidad de decidir el despliegue de dicha ca-

pacidad espacial: lanzamiento de constelaciones de pequeños satélites dedicadas a operaciones militares concretas (unidades en *stock* que son lanzadas bajo demanda para dar servicio a zonas y operaciones determinadas en marcos temporales similares a los que tarda la fuerza en desplegarse).

«Constellations of nano/microsatellites could be sufficiently affordable to allow applications against a specific mission need in a limited geographical area» [9].

Para lograr este objetivo es fundamental mejorar un elemento clave de la cadena de valor del sector *NewSpace*: la capacidad y coste de los lanzadores y la posibilidad de realizar lanzamientos en plazos muy cortos y desde localizaciones diversas y seleccionables [10].

3. Aplicaciones y servicios en el mundo militar

3.1. Aplicaciones ISR

Kestrel Eye es un demostrador impulsado por el *US Army - SMDC*. El primer microsatélite (53 kg, 27U, 500 km de altura) fue lanzado en 2017. Su objetivo es servir imágenes del terreno (1,5 m de resolución), directamente y a demanda del combatiente. La principal ventaja no es tanto la calidad sino la posibilidad de recibirlas directamente, en cuestión de minutos y con una infraestructura mínima [5].

Otro ejemplo reciente de aplicación ISR apoyada en satélites de pequeño tamaño es el lanzamiento en marzo de 2018, por parte de la Royal Air Force – UK, del mini-satélite Carbonite-2. Con 100 kg de peso y orbitando a 500 km de altura, proporcionará vídeo 4K e imágenes con una resolución de 1,5 m. Como característica a destacar está la posibilidad de proporcionar imágenes para su análisis en cuestión de minutos y en el futuro enviar vídeo directamente al piloto de un caza.

3.2. Internet of (Battlefield) Things - IoBT

Un campo que ha despertado gran interés en general y en particular en el sector satélite es el concepto IoBT. La traslación al mundo militar del concepto IoT permite el acceso, agregación, distribución y análisis de multitud de datos procedentes de sensores de todo tipo en la zona de operaciones y en actividades de soporte (logística, mantenimiento, etc.). Se abren así múltiples aplicaciones que permiten, al igual que en el mundo empresarial, gestionar, optimizar y transformar la gestión de escenarios que involucran gran número de activos y procesos altamente complejos. A continuación se enumeran algunos servicios de interés (adaptado de [11]):

- Seguimiento y transporte de activos , incluyendo munición.
- Optimización de suministros, hasta el nivel de combatiente.
- Guiado de paracaídas.
- Lectura de sensores biológicos o químicos.
- Sistemas de seguridad en aeronaves y buques.
- Sistemas de *geofencing*.
- Seguimiento y gestión remota de tropa y combatientes individuales, hasta el nivel de parámetros vitales individuales.
- *Crowdsensing*.
- Un elemento clave en el mundo IoT son las comunicaciones que, en el ámbito militar, deben ser:
- Seguras (véase los problemas generados por aplicaciones utilizadas por militares que acababan publicando en Internet información útil para el adversario y que han motivado la prohibición del Pentágono de usar aplicaciones personales de *tracking* en zonas críticas).
- Robustas e independientes de la infraestructura local.

Es aquí donde aparece la infraestructura satélite y, en particular, el uso potencial de constelaciones de pequeños satélites, aprovechando que las comunicaciones IoT se caracterizan, en general, por bajos

requerimientos de ancho de banda y por requerir terminales de muy pequeño tamaño. Las estructuras de *smallsats* posibilitan la captación y diseminación de información de sensores, sin necesidad de disponer de infraestructura terrena. Es viable, por tanto, el diseminar en una zona un conjunto de sensores a los que se ofrece una salida vía satélite usando una constelación de *smallsats*.

4. Propuestas tecnológicas

4.1. Posibles servicios picosat de interés para la defensa / seguridad

En el volumen de un nanosatélite de 1U (10x10x10 cm), es posible acomodar 8 picosatélites 1P (5x5x5 cm). Con una cara (5x5 cm) expuesta al sol se genera una potencia de Pgen=369mW@BoL. Considerando un transmisor de Ptx=100mW y 50 % de eficiencia, queda disponible 45 % de potencia para el resto del sistema Psys=169mW=45mA@3V7. El picosat trabajaría en VHF con una antena de moderado tamaño y ganancia. Aplicando la ecuación de Friis, se obtiene en la estación de tierra una relación portadora/ruido de CNR=42dB y una tasa binaria de R=2175bps. En un pase de 10 minutos es posible transferir hasta V=1274 Kb.

PARÁMETRO	GEOMETRIA		1P	2P
flujo solar	Φ	mW/cm2	100	100
área célula solar	A	cm2	13,7	27,3
eficiencia célula	eff		0,27	0,27
potencia generada	Pgen	mW	370	737
potencia disponible	Psys	mW	170	338
potencia transmisor	Pt	dBm	20	23
antena transmisión	Gt	dB	2	2
frecuencia	f	MHz	240	240
distancia	d	km	500	500
perdidas propagación	L	dB	-134	-134
antena recepción	Gr	dB	12	12
potencia recibida	Pr	dBm	-100	-97
figura de ruido RX	NF	dB	1,5	1,5
data rate	R	bps	2175	3075
symbol rate QPSK	SR	sps	1088	1538
ancho de banda	B	Hz	1294	1830
CNR	CNR	dB	41,4	42,9
EBN0 BER=10^6 QPSK	EbN0	dB	11,0	11,0
tiempo pase	t	min	10	10
volumen información	V	kB	1274	1802

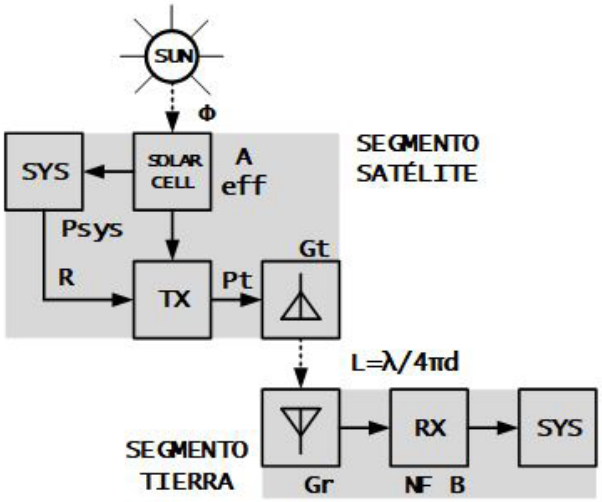


Figura 1. Modelo del enlace descendente de un PicoSat y resumen prestaciones mejor caso.

Un picosatélite 2P expone un área de 10x5 cm al sol y doblando la potencia del transmisor Ptx=200mW aún se dispone de 338mW para el resto del sistema. La tasa de transferencia y volumen de información se incrementa un 50√%, a R=3075bps y V=1.800kbytes respectivamente. Cuatro satélites 2P pueden acomodarse en el volumen ocupado por 1U.

Incorporando al picosatélite 1P un transpondedor lineal o digital a partir de los cálculos anteriores, se describen y estiman las prestaciones *mejor caso* en posibles servicios:

- Tres canales de voz para comunicaciones en tiempo real utilizando CODEC de voz de 700bps (libre de patentes), o siete canales de voz usando un CODEC de 300bps. El despliegue de una constelación permite tener disponibilidad de enlace 24 h dentro de la huella típica de diámetro de 3.000 km de una órbita LEO.
- Servicios IoT están basado en trasferencia de paquetes cortos transmitidos lentamente. La utilización de EIRP reducidas permite terminales muy económicos, incluso desechables. Como ejemplo: en un único pase, la retransmisión de 17.400 paquetes de 70bits y 15 segundos, unos 400 paquetes simultáneos.

- Para observación de la tierra es posible transferir una única imagen de moderada-alta calidad en cada pase. Una adecuada organización de la constelación permite una frecuencia de adquisición y entrega cada 10 min con una latencia (retraso) entre ambas menor de 12 h.
- En un servicio de navegación y posicionamiento el principio de funcionamiento estaría basado en un único satélite en posición conocida y dos medidas relativas entre navegante y satélite: frecuencia Doppler observada (velocidad) y tiempo de vuelo de la señal (distancia). De ambas medidas se extrae la latitud/longitud sobre la superficie de la tierra. El tiempo de ida y vuelta se mide con la emisión de una secuencia pseudoaletoria binaria y un correlador en el receptor. El error en la medida está relacionado con el tamaño del satélite; más área expuesta al sol permite incrementar la potencia del transmisor y la tasa de bit. El satélite se localiza previamente desde la estación de tierra con idéntico procedimiento, y su posición es difundida al navegante mediante la baliza. Un ejemplo de implementación es el sistema GlobalStar de Loral/Qualcomm.
- Un servicio de navegación pasiva basada en múltiples transmisores abordo de picosatélites LEO en posición conocida, permite situar al navegante utilizando únicamente un receptor. Es necesaria infraestructura de tierra, pero evita delatar al navegador su posición al activar su transmisor. Es la configuración clásica usada por GPS, Galileo y otros.
- El servicio de vigilancia es el dual del servicio de navegación pasiva. La persona u objeto (vehículo, munición) a ser monitorizado porta un transmisor con un identificador. Esta identificación es repetida por múltiples satélites en posición conocida hacia igual número de estaciones de tierra equipadas con un receptor. Mediante trilateralización se determina la posición del objeto. Este servicio está siendo proporcionado comercialmente por SARSAT COMSAT para rescate en el mar y por ARGOS para el seguimiento de animales, boyas oceánicas y otros bienes con terminales ultraligeros (20 g).

4.2. Análisis de espectro radioeléctrico desde un smallsat

La monitorización de espectro radioeléctrico es una de las aplicaciones para la que los pequeños satélites tienen más utilidad: inteligencia de señal (*Signal Intelligence* - SIGINT).

La inteligencia de señal engloba distintas actuaciones entre las que se encuentran: caracterización de señales radioeléctricas (*Electronic Intelligence* -ELINT- técnica), localización de origen de dichas señales (ELINT operativa), demodulación de señales de voz y datos de comunicaciones humanas (*Communications Intelligence* -COMINT-) y decodificación de comunicaciones entre dispositivos con transmisión de telemetría (*Foreign Instrumentation Signals Intelligence* -FISINT-).

La utilización de *smallsats* es aceptable para caracterizar señales e incluso para demodular y decodificar comunicaciones, siempre que se conozca de antemano ciertas características de las mismas. Además, el uso de constelaciones permite disponer de un sistema distribuido con unos tiempos de revisita muy altos y facilidades de actualización en caso de necesitar nuevas capacidades. La localización de señales con *smallsats* presenta más limitaciones, relacionadas principalmente con las dimensiones físicas de los satélites y la precisión que se puede obtener. Para realizar esto existen diferentes métodos utilizando varias antenas ya sea en un único satélite o distribuidas en varios: comparación de amplitud, comparación de fase y diferencia de tiempo. A continuación se estudian dos posibles arquitecturas de un sistema para análisis de espectro radioeléctrico con *smallsats*: un único satélite con varias antenas integradas o varios satélites en formación.

En el primer caso el sistema contaría con un único satélite, por lo que sería sencillo y de muy bajo coste. Integraría varias antenas en la banda objetivo del análisis con diferentes diagramas de radiación y un sistema de procesado de señal basado en radio definida por *software* (SDR), que permite trabajar con todas las antena simultáneamente. Se trata de un sistema realizable con la tecnología actual y que tendría capacidades para analizar las características de las señales recibidas (frecuencia, ancho de banda, tipo de modulación…) y decodificar la información que en ellas hubiera. La localización de las señales podría hacerse por comparación de amplitud, sin embargo, la precisión no sería suficientemente para la mayoría

de aplicaciones, a menos que se tratara de fuentes de señal estáticas y continuas, que permitieran realizar varias mediciones a lo largo de diferentes pases del satélite.

Una clara aplicación que podrían darse con esta arquitectura es la localización y caracterización de radares, tanto fijos como desplegados para operaciones específicas, ya que se podrían monitorizar en diferentes pases a lo largo del tiempo. Además, estudiando las características de su señal se puede conocer las capacidades del radar y la mejor forma de anularlo. A pesar de su baja precisión, la información generada por este sistema se podría utilizar como base para desplegar *in-situ* otros sistemas más complejos que permitan obtener la localización exacta de la fuente de la señal.

Un ejemplo de este sistema fueron las misiones HUMSAT-D y SERPENS, de la Universidad de Vigo, con las cuales, mediante un sistema receptor simple, se pudo localizar distintos radares militares y conocer sus características: frecuencia, potencia, periodo, duración del pulso, etc. [1]. Estas misiones serán continuadas con un sistema mejorado en la misión LUME-I, con lanzamiento previsto para finales de 2018.

La segunda arquitectura a estudiar contaría con varios satélites volando en formación, aunque separados varios cientos de kilómetros para poder medir las mismas señales pero desde puntos suficientemente distantes. Se trataría de un sistema más complejo que el anterior donde se requiere que los satélites tengan relojes precisos y sincronizados entre ellos y que tengan una posición relativa estable (*station keeping*) y bien conocida. Requiere de tecnologías cuya viabilidad técnica ya ha sido confirmada (sistemas de propulsión, vuelo en formación, enlaces de comunicación inter-satélite) pero que aún se encuentran en fase de pruebas.

Esta arquitectura permite mejorar la precisión de la localización de las señales mediante el método de la diferencia de tiempo y, además, permite establecer el origen de señales cuya transmisión sea única o móvil y que por lo tanto no se pueden medir en diferentes pases de los satélites. Una posible aplicación de esta arquitectura es el posicionamiento de aeronaves o misiles, imposibles de monitorizar con la primera arquitectura.

5. Conclusiones

El paradigma *NewSpace* cambia radicalmente el modelo tradicional del sector espacio. Donde históricamente lanzar y operar un satélite implicaba años de diseño y desarrollo y posteriormente un modelo de operación y explotación de carácter estratégico, ahora es viable definir y operar constelaciones de pequeños satélites que complementan el modelo tradicional, permitiendo su lanzamiento y operación en tiempos significativamente cortos y costes muy reducidos. El principal valor añadido aportado por el modelo *NewSpace* al mundo militar y defensa reside en:

1) Un incremento notable de la resiliencia y robustez de la infraestructura espacial.
2) La posibilidad de definir y gestionar activos espaciales a un nivel táctico, operando pequeños satélites dedicados a servicios, operaciones y zonas concretas.
3) Nuevos servicios (ISR, comunicaciones banda estrecha, análisis del espectro, IoBT, …).

En este documento se han revisado estas aportaciones del paradigma *NewSpace* al sector defensa y militar y se ha profundizado en dos posibles propuestas tecnológicas:

1) Posibles servicios a prestar sobre picosats (5x5x5 cm).
2) Análisis de espectro radioeléctrico desde un *smallsat* o constelación de *smallsats.*

Referencias

1. *CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation. Heidt, H., Puig-Suari, J., Moore, A., Nakasuka, S., & Twiggs, R. (2000).*
2. *Small satellites for global coverage: Potential and limits. ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing, 65(6), 492-504. Sandau, R., Brieß, K., & D'Errico, M. (2010).*

3. *Realization of the concept of reasonably reliable systems engineering in the design of nano-satellites. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 10(ists28), Tt_7-Tt_12. SHIRASAKA, S., & NAKASUKA, S. (2012).*
4. *Narrowband Satellite Communications: Challenges and Emerging Solutions Emre Gündüzhan and K. Dewayne Brown Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 33, Number 1, 2015.*
5. *Kestrel Eye Block II - Kenneth J. Bocam et al. 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites 2018.*
6. *Satellite and Ground Communications Systems: Space and Electronic Warfare Threats to the US Army. Major A.H. Boyd. Institute of Land Warfare. 2017.*
7. *LEO satellites are a game-changer for defense sector network operations. www.globalmilitarycommunications.com. 2017.*
8. *CNBC: «The Air Force is applying Facebook's retired 'move fast and break things' mantra to its space programs» – Abril 2018.*
9. *Army Nanosatellite Technology Demonstrations for the Tactical Land Warfighter - J.R. London III et al. – USASMDC – 2010.*
10. *The US military will award $10 million to the Company that can launch satellites on short notice. https://qz.com/1255842/the-us-military-will-award-10-million-to-the-company-that-can-launch-satellites-on-short-notice/ - Abril 2018.*
11. *Nanosatellite Telecommunications: A Market Study for IoT/M2M applications – London Economics – 2017.*
12. *Is Smaller Better? Capt. J. Martirosian. purview.dodlive.mil. 2018.*
13. *Modern Small Satellites – Changing the Economics of Space. Martin Sweeting.*
14. *2017 Wikipedia - 2007 Chinese anti-satellite missile test.*
15. *Preliminary noise measurements campaign carried out by HUMSAT-D during 2014». Aguado, F., Nodar, D., & González, A. ITU-R Conference and Workshop on the Small Satellite Regulation and Communication Systems, Prague, Czech Republic, 2-4 March 2015.*

Comunicaciones satelitales en UAV de pequeño tamaño

González Frías, Miguel[1,*], Durbán García, Pablo[1], Elisabeth Pérez García[1], Baghdadi González, Hisham[2], Bel Albesa, Ismael[2], Cortes, Javier[2], Alfonso Muriel[3], José Manuel Fernández[3], Manuel Sierra Pérez[3]

[1] Everis Aeroespacial y Defensa. C\ Fuente de la Mora 1. Madrid (28050).

[2] Telnet Redes Inteligentes. C\ Buenos Aires, 18. La Muela, Zaragoza (50198).

[3] Universidad Politécnica de Madrid (ETSI UPM). Av. Complutense, 30, Madrid (2840).

* Responsable del trabajo: MiguelGonzalezFrias@everis.com

Resumen

Las comunicaciones en una aeronave no tripulada (UAV) resultan un elemento clave, tanto para su control y navegación como para analizar la información capturada del entorno (transmisión en tiempo real de información generada por los sensores abordo: imágenes, vídeo, comunicaciones, etc.).

La posibilidad de operar en escenarios fuera de línea de vista (BLOS – *beyond line of sight*) es un requisito clave para diferentes situaciones como operaciones de defensa y seguridad, vigilancia de grandes infraestructuras, operaciones de rescate, vigilancia de fronteras, etc. En este tipo de escenarios, la utilización de medios satélite se revela como fundamental; sin embargo, hasta ahora, debido principalmente a restricciones físicas del terminal satélite, este tipo de comunicaciones solo suele estar disponible en aeronaves de mayor tamaño (clase III).

Por otro lado, la tecnología de terminales y antenas satélite avanza constantemente, posibilitando la reducción de factores SWaP (*Size, Weight and Power*) del terminal y empiezan a estar disponibles soluciones satélite integrables en UAV de clase II y I. Este artículo persigue analizar los escenarios operativos y requerimientos en los que la comunicación fuera de línea de vista desde un UAV puede ser necesaria, las soluciones actualmente disponibles y presentar el desarrollo de un potencial sistema terminal satélite de bajo peso/tamaño, basado en tecnología nacional de antena plana y apuntamiento electrónico.

Palabras clave

Satélite, comunicaciones, UAV, RPAS, BLOS, antena electrónica.

1. Introducción a las necesidades y retos de comunicación satélite en UAV de pequeño tamaño

Los sistemas no tripulados para la defensa son cada vez más utilizados sobre todo para misiones de inteligencia, vigilancia, adquisición de objetivos y reconocimiento. Los sistemas clase I (<150 kg), según taxonomía OTAN, han tenido una gran evolución en los últimos años, propiciando la realización de operaciones tácticas en terreno de forma flexible, rápida y con buenos resultados.

Sin embargo, los sistemas aéreos no tripulados de pequeño tamaño (*Small*) utilizan como sistema de comunicaciones transmisores y receptores RF, sistemas que requieren visión directa (LOS – *Line of Sight*) que, aunque en las zonas de entrenamiento se consigue sin problemas, en una misión real no siempre es factible.

La posibilidad de incorporar comunicaciones satelitales a los UAV de pequeño tamaño permitiría desbloquear las restricciones en alcance de este grupo de UAV y mejorar su operatividad en cualquier clase de terreno. Actualmente, este sistema de comunicaciones ha sido restringido para UAV de categoría mayor, debido a la limitadas prestaciones SWAP (*Size, Weight and Power*) de los clase I.

La incorporación de sistemas de comunicaciones satelitales posibilitará tanto la comunicación bidireccional de datos de mando y control desde la estación de tierra al vehículo (bajo ancho de banda), así como envío de vídeo o información de otros sensores en tiempo real (mayor ancho de banda). Sin duda un atractivo de estos vehículos no tripulados es que reducen significativamente el coste de despliegue y operación. A la vez, la comunicación satélite posibilita la operación del UAV en un entorno BLOS.

2. Estructura de la solución planteada

Nuestro principal objetivo es poder dotar a los UAV de clase I con la capacidad de enlace satélite y por tanto de operación en modo BLOS:

1. Control BLOS en *near-real-time.*
2. Capacidad de envío de información (sensores, cámaras, …) en cualquier escenario.
3. Capacidad para realizar misiones y escenarios de operación hasta ahora restringidos a UAV de mayor tamaño, y por tanto mayor coste de despliegue y operación.
4. Capacidad trasladable a otros modelos de UAV de características similares y a otras plataformas con restricciones similares de tamaño/peso/…

Se plantea una solución de comunicación satelital capaz de funcionar en paralelo junto a los sistemas de telemetría integrados en la plataforma (habitualmente un radioenlace para datos y/o telecomando y otro independiente para vídeo), tal y como se muestra en la figura 1. El sistema es modular y permite distintos grados de integración con la aviónica. Esto dota al sistema de grandes ventajas de operación adicionales:

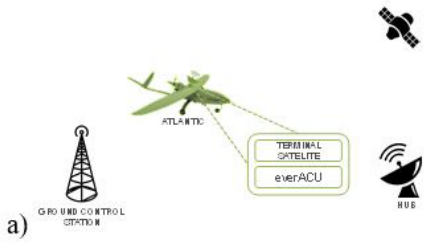
1. Capacidad de operación LOS/BLOS de forma conmutable.
2. Sistema de comunicación redundante en el entorno LOS.

3. Sistema con recuperación de la capacidad de operación en el entorno BLOS.

Esta flexibilidad en el grado de integración se logra mediante el empleo de una unidad de control de antena que permite gestionar el terminal de comunicaciones satélite de forma independiente a la aviónica propia del sistema, evitando así posibles desarrollos adicionales o modificaciones *hardware* que pueden reducir la fiabilidad del conjunto.

2.1. UAV Atlantic

La plataforma sobre la que se ha planteado la solución es el UAV ATLANTIC de SCR-EVERIS, que ha sido especialmente diseñado para misiones ISTAR: reconocimiento, localización de objetivos, vigilancia e inteligencia.



b)

DATOS TÉCNICOS	
Envergadura	3.800 mm
Longitud	2.800 mm
MTOW	50 kg
Carga de pago	5 kg (*)
V. crucero/máxima	110/170 km/h
Alcance	100 km (*)
Autonomía	5 h (*)
* En función de la configuración	

Figura 1. a) Arquitectura de la solución planteada; b) Datos técnicos ATLANTIC.

Cabe destacar que el sistema ATLANTIC ha sido adquirido por la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) dentro del proyecto RAPAZ y es actualmente operado por el GAIL (Grupo de Artillería de Información y Localización del Ejército de Tierra).

2.2. Unidad de control de antena y navegación (everACU)

La unidad de control de antena (ACU) es un sistema cuyo objetivo es dotar a un terminal satelital la capacidad de seguimiento de un satélite, utilizando la información procedente de diversos sistemas: INS-GNSS, receptor de baliza, efemérides… everis ha desarrollado el sistema everACU partiendo de su experiencia en el área de los sistemas embarcados: sistemas de guiado y control para cohetes de artillería, autopilotos para vehículos no tripulados, sistema de apuntamiento de mortero embarcado…

everACU se ha desarrollado con el objetivo de disponer de un sistema multiplataforma preciso, robusto y fiable:

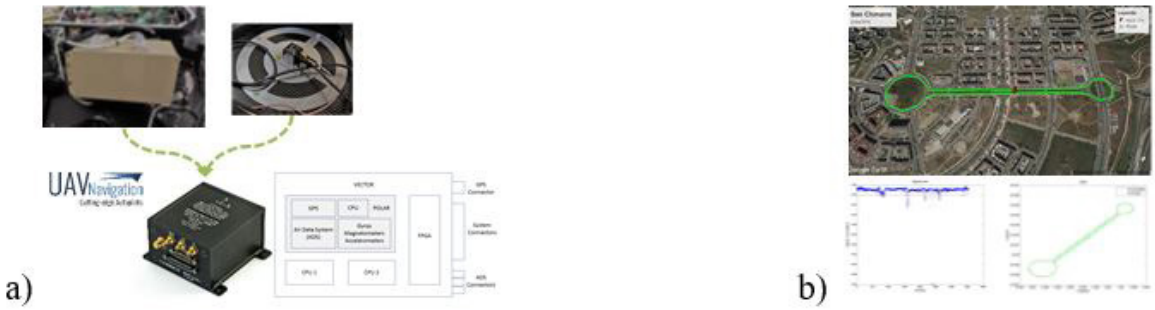


Figura 2. Desarrollo del sistema everACU (a) y resultados obtenidos (b).

1. Basada en tecnología nacional probada durante miles de horas de vuelo.
2. Uso de HW certificado bajo los estándares militares (MIL-STD-810F y MIL-STD-461F).
3. SW determinista basado en un sistema operativo en tiempo real estricto.

4. Dispone de un sistema propio AHRS-INS de gama alta basado en tecnología MEMS.
5. Múltiples puertos de comunicación (RS-422, RS-485, Ethernet, CAN BUS, entradas analógicas, salidas digitales…) que permiten distintas tecnologías de control de antenas.

2.3. Terminal satélite: solución corto plazo y medio plazo

Principalmente se ha buscado la minimización de equipos y la simplicidad en la integración. De este modo el equipo seleccionado fue el AVIATOR UAV 200 de COBHAM, el cual es un sistema que integra todos los equipos dentro de una estructura compacta y ligera (1,45 kg).

El siguiente paso es disponer de un sistema en banda Ka, aumentando de manera significativa el bit rate disponible. Para ello se está trabajando con la empresa TELNET-ri y su antena Jetstream, cuyas características lo hacen idóneo para su integración dentro de los UAV CLASS I:

1. Óptimas características mecánicas: muy bajo perfil, tamaño reducido, bajo peso.
2. Se eliminan los elementos más pesados de un sistema SOTM: motores, BUC…
3. Compatible con los futuros satélites SPAINSAT-NG y demás constelaciones en banda Ka.
4. Alta capacidad de *bit rate*, equivalente a terminales significativamente más pesados.

3. Solución en banda L

El UAV Aviator 200 es una solución para la comunicación de UAV a través de la red de satélites de Inmarsat, destaca por su tamaño y ligereza, lo que ha sido hasta ahora un factor limitante en el uso de terminales satelitales. Integra en un único dispositivo toda una solución SATCOM de forma compacta, ligera y de bajo consumo.

El UAV Aviator 200 integra todos los componentes de un sistema SATCOM aeronáutico tradicional (figura 3):

1. Antena orientable LGA tipo *phased array.*
2. Amplificador HPA - Diplexor/amplificador de bajo ruido LNA.
3. Modem para gestionar la comunicación con la red de satélites y proporcionar la interfaz de usuario.

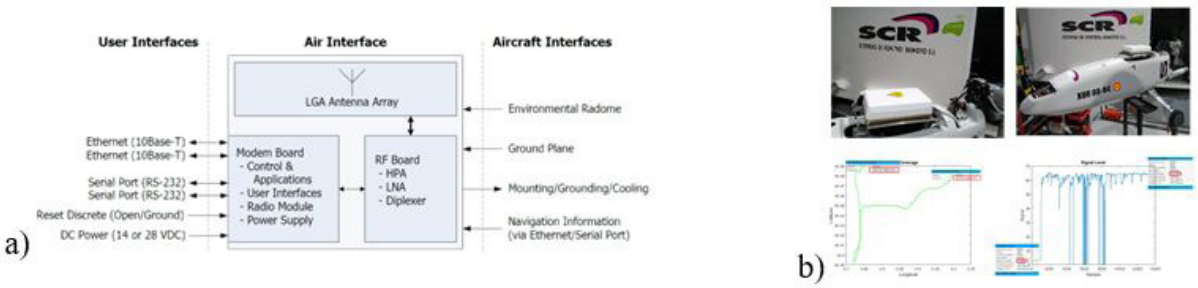


Figura 3. a) Esquema completo del terminal AUV Aviator 200. b) Integración con el Atlantic y pruebas realizadas con el terminal de Cobham.

3.1. Integración en UAV clase I Atlantic

Actualmente se están realizando diversas pruebas tanto en laboratorio como en campo, obteniéndose los resultados mostrados en la siguiente tabla (el proceso de integración está en curso y se prevé finalizarlo en 2018).

		Laboratorio	Vehículo terrestre (Pick-Up)	UAV (Atlantic)
Configuración Aviator UAV 200	Puertos COM	✓	✓	✓
	APN	✓	✓	✓
	IP destino	PENDIENTE	PENDIENTE	PENDIENTE
Cobertura		✓	✓	PENDIENTE
Conectividad	VPN	✓	✓	PENDIENTE
	IP Pública fija	PENDIENTE	PENDIENTE	PENDIENTE
Transferencia de datos		---	✓	PENDIENTE
Integración mecánica		---	✓	✓

Tabla 1. Resumen de las pruebas de integración realizadas con el UAV Aviator 200 (09/2018)

La figura 3 se puede observar cómo el equipo, la integración mecánica realizada sobre el UAV Atlantic y los resultados de apuntamiento al satélite en un recorrido en vehículo terrestre. Con esta integración será posible operar el Atlantic en modo BLOS y disponer a corto plazo de un enlace satélite en banda L y un *bit rate* de 200-400Kbps.

4. Jetstream: tecnología de antena plana en banda Ka

Dadas las especificaciones requeridas en antenas para comunicaciones por satélite en bandas K y Ka [2], [3], [4], existe un compromiso importante en cuanto a diseño e integración en sistemas móviles. Por una parte se requiere capacidad de orientación del haz y control de polarización, lo que sugiere incluir desfase y amplificación junto a los elementos radiantes. Por otra parte la ganancia de antena es alta, de forma que el tamaño de la antena y, sobre todo, el número de elementos radiantes alcanza valores de algunos millares. Esto hace inviable, técnica y económicamente, que la antena activa incluya un circuito integrado en cada uno de los elementos.

Aunque hay bastante bibliografía sobre diseño e implementación de antenas para comunicaciones móviles por satélite en bandas Ku, K y Ka [5], [6], [7], son pocas las antenas comerciales basadas en *arrays* planos con un control de fase completo de los elementos. Algunas aseguran conseguirlo, aunque apenas ofrecen información sobre los procedimientos o el tipo de circuitos utilizados en su construcción [8], [9], [10].

Sin embargo, en la actualidad se está empezando a observar un cambio de tendencia gracias al gran auge que supone la tecnología 5G y todos los desarrollos que traerá consigo en bandas de frecuencia milimétricas. Un claro ejemplo es el de los circuitos monolíticos de reducidas dimensiones que integran amplificación y control de fase para antenas de apuntamiento variable, potenciando su capacidad de control, mínimo error de fase y mínimas pérdidas entre amplificadores y antena. Los inconvenientes más relevantes de esta opción son:

1. El precio: tanto el de los circuitos integrados como el de las placas de circuito impreso en las que se basan elevan considerablemente el precio de la antena en su conjunto.
2. Es importante el dimensionado en cuanto a potencia y distribución de las fuentes de alimentación del sistema, pero tanto o más es el dimensionado en cuanto a disipación térmica, en especial en la antena de transmisión dada la exigente linealidad de los amplificadores y sus limitaciones en cuanto a eficiencia.
3. Por último, el coste del reproceso se dispara en diseños con alta densidad de circuitos integrados.

Esta comunicación abarca el trabajo realizado en el desarrollo de una antena plana con control de apuntamiento de haz electrónico y variable y con doble polarización circular conmutable (RHCP y LHCP) para comunicaciones móviles por satélite en banda K/Ka. Emplea un circuito integrado por cada cuatro elementos radiantes consiguiendo así hacer frente a la exigente restricción heredada del mallado de elementos radiantes y del rango de apuntamiento del haz, especialmente en banda Ka. Diseño que a su vez aporta una importante reducción de dimensiones y peso con respecto a los productos comerciales que existen a día de hoy.

4.1. Estructura del elemento radiante

La figura 4 a) muestra una imagen de la antena desarrollada, constituida por una agrupación de elementos radiantes para cada banda de trabajo. La estructura de los elementos radiantes representada en la figura 4 b) consta de dos parches circulares, uno activo y otro parásito, alojados en una cavidad para mitigar posibles acoplamientos. En este sentido, una serie de vías alrededor del parche activo evitan la propagación de ondas de superficie en el sustrato dieléctrico reduciendo posibles acoplos con los elementos adyacentes.

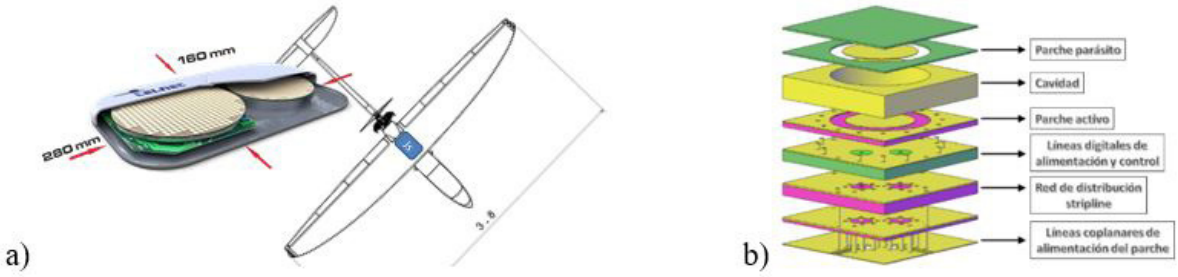


Figura 4. a) Antena plana para comunicaciones satélite y su integración en Atlantic. b) Estructura multicapa del elemento radiante.

Para mejorar la eficiencia de la antena se han implementado líneas de alimentación en tecnologías coplanar y *stripline* y la conexión de estas al parche activo se realiza con una cuidada transición vertical cuasi-coaxial mediante vías a masa alrededor de la sonda y hasta el plano de masa del propio parche. Estas sondas alimentan el activo en dos puntos ortogonales que, en función del signo del desfase de 90º aplicado entre ellos, genera la polarización circular a derechas (RHCP) o a izquierdas (LHCP). La estructura de capas de la placa de circuito impreso integra núcleos RO4003C de Rogers para las señales de alta frecuencia y núcleos FR4 para las señales digitales de baja frecuencia y planos de alimentación. Basándose en esta estructura, se han diseñado dos elementos radiantes de dimensiones diferentes acordes a su banda de trabajo. En transmisión (27,5 – 31 GHz), el ancho de banda disponible es del 17 %, siendo las pérdidas de retorno a la entrada inferiores a -15 dB, mientras que en recepción (17,7 – 21,2 GHz) el ancho de banda es del 20 % con unas pérdidas de retorno inferiores a -13dB. Los valores de ganancia máxima y anchos de haz a -3dB se detallan para tres frecuencias distintas en la Tabla 2.

4.2. Dimensiones de la antena

1) Array en banda Ka (Tx)

La separación entre elementos radiantes del array es de 5 mm, acorde a la longitud λ/2 en la frecuencia central de trabajo y el número de elementos radiantes, N, viene determinado según la expresión (14), por la intensidad de transmisión (EIRP), por la potencia máxima que es capaz de proporcionar el circuito integrado (P_e), por la propia ganancia del elemento radiante (G_e) y por las pérdidas asociadas a las líneas de alimentación y al radomo (Losses).

$$EIRP = 20 * log\,(N) + \llbracket (P \rrbracket _e + 3dB) + G_e - Losses \qquad (1)$$

Considerando las especificaciones de la antena completa en transmisión (tabla 3), esta debe integrar 474 elementos radiantes como mínimo para cumplir con una especificación de EIRP típica con los circuitos integrados trabajando a máxima potencia, o dicho de otra forma, la apertura circular de la antena tiene un diámetro de 120 mm. Teniendo en cuenta que cada circuito integrado controla cuatro elementos radiantes, el número total de circuitos integrados en la antena completa en transmisión será de 119 unidades como mínimo.

2) Array en banda K (Rx)

Análogamente, en recepción la separación entre elementos radiantes es de 7,5 mm. El número de elementos radiantes, N, es función de la especificación del sistema relativa a la sensibilidad (G/T), la ganancia del

elemento radiante (G_e), la temperatura de referencia (T_0), las pérdidas de la etapa *front-end* (L) y la figura de ruido (F) del circuito integrado que integra la cadena de recepción según la expresión (2).

$$\frac{G}{T} = 10 * log\left(\frac{G_e}{T_0 * (L * F - 1)}\right) + 10 * lo\,g(N) \qquad (2)$$

Considerando las especificaciones de la antena completa en recepción (tabla 4), la antena debería estar constituida por al menos 1.917 elementos radiantes, lo que implicaría el uso de 480 circuitos integrados. Dado que estos componentes son un recurso limitado, se ha limitado la antena receptora a un total de 474 elementos radiantes y 119 circuitos monolíticos. Es decir, el diámetro de la apertura radiante es de 180 mm.

	Freq. (GHz)	G_{max} (dBi)	BW_{-3dB} (deg)
Rx	18	6.2	73.1
	19	8.2	65.3
	20	7.8	74.5
Tx	28	7.5	68.5
	29	6.7	76.8
	30	7.1	81.1

Tabla 2. Parámetros de radiación del elemento radiante

Frecuencia	27.5 – 31 GHz
EIRP	44 dBW
Pe	12 dBm
Ge	7 dBi
Losses	1.5 dB

Tabla 3. Parámetros de en transmisión

Frecuencia	17.7 – 21.2 GHz
G/T	12 dB/K
Ge	7 dBi
L	1.5 dB
T0	290 K
F	3.4 dB

Tabla 4. Parámetros de en recepción

4.3. Beam steering

El factor de forma escogido es una apertura circular para reducir el nivel de los lóbulos secundarios, al tiempo que se consigue abaratar los costes en componentes. En este sentido, también se ha optado por aplicar una distribución triangular en ambas direcciones del *array* plano (X e Y), con una caída de 6dB entre los elementos centrales y los extremos.

La figura 3 muestra los diagramas de radiación en el rango de apuntamiento, tanto en dirección *broad-side* (θ = 0º) como en los ángulos de elevación θ = 30º y 60º sobre el plano normal a la antena, en tres frecuencias para cada banda frecuencial y con el grado de cumplimiento de la máscara proporcionada por la recomendación UIT-R S.465-5.

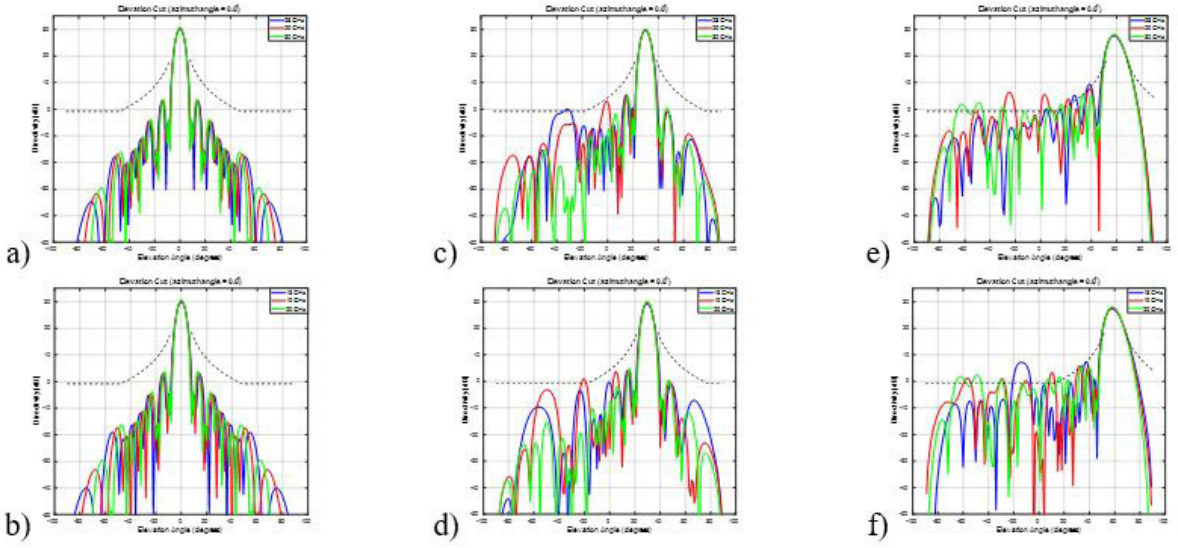


Figura 5. Diagramas de radiación para un apuntamiento variable. En transmisión: θ=0º (a), 30º (c) y 60º (e). En recepción: θ=0º (b), 30º (d) y 60º (f).

Tal y como cabía esperar, al aumentar el ángulo de elevación la directividad disminuye a costa de aumentar el ancho de haz del lóbulo principal y el nivel de los lóbulos secundarios. Efecto producido tanto por el diagrama de radiación del elemento radiante aislado, cuya directividad se va reduciendo con el ángulo theta, como por el acoplo entre elementos a nivel radiado que también se incrementa con dicho ángulo. Por otro lado, se aprecian desviaciones entre las diferentes frecuencias, propias de este tipo de antenas, con un ancho de banda grande y donde todos los componentes que la constituyen son frecuencialmente dependientes.

5. Conclusiones

El dotar a UAV *Class* I de comunicación satélite supone un reto de primer orden, por las restricciones de tamaño y peso de la plataforma.

Everis ADS ha desarrollado un sistema de control de antena integrable con cualquier terminal y está realizando la integración del terminal AVIATOR 200 (banda L) lo que permitirá establecer u nenlace banda L (200-400Kbps) desde la plataforma Atlantic.

En paralelo se está trabajando con la empresa TELNET-ri que está desarrollando una novedosa antena electrónica en banda Ka, especialmente diseñada para ser integrada en plataformas con importantes restricciones mecánicas (peso, consumo, tamaño), utilizando para ello circuitos monolíticos desarrollados para 5G. Sus reducidas dimensiones elevan el nivel de integración y permiten aproximar amplificador y desfasador a cada elemento radiante reduciendo las pérdidas de las líneas de transmisión y por ende el nivel de amplificación, al mismo tiempo que se reduce la figura de ruido en recepción. Todo ello redunda finalmente en un menor tamaño de antena en sus tres dimensiones necesario para cumplir con las especificaciones.

Agradecimientos

El proyecto Jetstream, en el que se ha realizado este desarrollo, ha sido posible gracias a la financiación recibida por parte del Ministerio de Economía dentro del marco de la convocatoria Retos Colaboración del (RTC-2015-3495-7), en colaboración con la UPM.

Referencias

1. *NATO UAS Classification Guide. Source: «Strategic concept of employment for unmanned aircraft systems in NATO», in The Joint Air force Competence Centre, Kalkar, Germany, 2010.*
2. *ITU-R SA.364-5: Preferred Frequencies and Bandwidths for manned and unmanned near-earth research satellites. Available from: https://www.itu.int/rec/R-REC-SA.364-5-199203-I/_page.print*
3. *UIT-R S.580-6: Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites. Available from: https://www.itu.int/rec/R-REC-S.580-6-200401-I/en*
4. *ITU-R S.524-9: Maximum permissible levels of off-axis eirp density from earth stations in geostationary-satellite orbit networks operating in the fixed-satellite service transmitting in the 6 GHz, 13 GHz, 14 GHz and 30 GHz frequency bands. Available from: https://www.itu.int/rec/R-REC-S.524-9-200604-I/en*
5. *R. Baggen, S. Holzwarth, M. Böttcher, B. Sanadgol. Phased Array Technology for Mobile User Terminals. Eucap. 2011.*
6. *S. Vaccaro, D. Llorens del Río, M. C. Viganó. Phased arrays with reduced number of phase shifter bits for polarization and pointing control. IEEE APS. 2013.*
7. *Nathan Kundtz, Kymeta Corp., Redmond, Wash. Next Generation Communications for Next Generation Satellites. Microwave Journal. August 2014.*

8. *M. C. Johnson, S. L. Brunton, N. B. Kundtz, J. N. Kutz. Sidelobe Canceling for Reconfigurable Holographic Metamaterial Antenna. IEEE TAP. April 2015; 63(4).*
9. *Introduction to Reconfigurable Holographic Metamaterial Antenna (RHMA). In Q-Tel Article. 2014.*
10. *B. Sanadgol, S. Holzwarth, A. Milano, R. Popovich. 60 GHz Substrate Integrated Waveguide Fed Steerable LTCC Antenna Array. EuCAP. 2010.*

GesCom VCR 8x8

Alda Rodríguez, Alberto[1,*]; Sáez Gómez, María Amparo[2]; Aréchaga Tarruell, Gonzalo[3]

[1] Ingeniero de Telecomunicaciones, Thales Programas de Electrónica y Comunicaciones S.A.U., alberto.alda@thalesgroup.com; AAR.

[2] Ingeniera de Telecomunicaciones, Thales Programas de Electrónica y Comunicaciones S.A.U., mariaamparo.saez@thalesgroup.com; ASG.

[3] Ingeniero de Telecomunicaciones, Thales Programas de Electrónica y Comunicaciones S.A.U., gonzalo.arechaga@thalesgroup.com; GAT.

* Autor principal y responsable del trabajo.

Resumen

El sistema GesCom VCR 8x8 es un gestor de comunicaciones diseñado específicamente para el futuro vehículo de combate sobre ruedas 8x8 del Ejército. El sistema permite la gestión completa de todos los medios de comunicaciones del vehículo, tanto de la voz como de los datos, incluyendo la interfonía, radios tácticas (VHF PR4G, HF, UHF), telefonía IP, comunicaciones por cable, etc.

Las principales características del gestor de comunicaciones son:

1. Enrutado de las comunicaciones con auto-descubrimiento de las redes de comunicaciones, teniendo en cuenta el medio de comunicación accesible y suministrando al operador la información tanto de los medios disponibles como de las rutas de conexión. El usuario puede ver gráficamente el mapa de conectividad y el estado de cada medio.
2. Control de acceso a la red mediante reglas que autorizan o deniegan el tráfico, en función del medio empleado, del tipo de tráfico y de la interfaz.
3. Calidad de servicio del tráfico en función del tipo de dato a transmitir (voz, datos tácticos, correo, vídeo…), del ancho de banda disponible y de los medios empleados.
4. Gestión del sistema basado en ficheros de misión y en una interfaz Web que permiten la rápida configuración del gestor de comunicaciones por personal no experto.

El gestor de comunicaciones se ha diseñado para ser instalado por defecto en la plataforma SOTAS IP, en sus distintas versiones, M2/M3, un equipo rugerizado militar de Intercomm que dispone de múltiples puertos de conectividad y un ordenador embebido. También puede ser instalado en ordenadores comerciales siempre y cuando se disponga de suficientes puertos para conectar y acceder a los medios de comunicación.

Actualmente se está trabajando en la migración del gestor de comunicaciones a un ordenador embarcado en helicópteros para gestionar las comunicaciones tierra-aire y aire-aire, incluyendo el uso de mensajería formateada VMF.

Palabras clave

Gestor de comunicaciones, vehicular, redes tácticas, calidad de servicio.

1. Introducción

El futuro vehículo de combate sobre ruedas 8x8 del Ejército de Tierra (el VCR 8x8) estará dotado de diversos medios de comunicación, varios sistemas de información, así como de un Intercomm para que los tripulantes del vehículo puedan hablar entre sí.

Habitualmente, los vehículos similares en todo tipo de fuerzas armadas no están equipados con ningún tipo de solución para gestionar el uso conjunto de todos esos medios de comunicación. En algunos casos sí existen soluciones para gestionar o bien el tráfico de voz o bien el tráfico de datos, pero no ambos a la vez.

La gestión conjunta, tanto en voz como datos, será una de los éxitos del concepto del VCR 8x8, ya que el gestor de comunicaciones del vehículo (GesCom VCR) permitirá que:

1. Cualquier tripulante pueda establecer una conexión de voz con cualquier otro tripulante o con varios de ellos de forma sencilla.
2. Cualquier tripulante pueda establecer una conexión de voz con otro vehículo o puesto de mando por medio de cualquiera de los medios de transmisión del vehículo, sin necesidad de acceder físicamente al equipo.
3. Cualquiera de los sistemas de información equipados en el vehículo pueda intercambiar información dentro del vehículo.
4. Cualquiera de los sistemas de información equipados en el vehículo pueda intercambiar información hacia fuera empleando cualquiera de los medios de transmisión del vehículo, sin necesidad de tener que configurar el equipo ni modificar la aplicación.

El sistema permite la gestión completa de todos los medios de comunicaciones del vehículo, incluyendo: Intercomm, radios tácticas (VHF PR4G, HF, UHF), telefonía IP, satélite, por cable, etc.

2. Desarrollo

El gestor de comunicaciones se ha diseñado para ser instalado por defecto en la plataforma SOTAS IP (ver figura 1), en sus distintas versiones, M2/M3, un equipo rugerizado militar de Intercomm que dispone de múltiples puertos de conectividad y un ordenador embebido destinado a la explotación por aplicaciones de terceros. También puede ser instalado en ordenadores comerciales siempre y cuando se disponga de suficientes puertos para conectar y acceder a los medios de comunicación.

Figura 1. SOTAS IP M3.

Las principales características del GesCom VCR se describen en los siguientes sub-apartados. El sistema se ha diseñado para ser instalado en nodos de comunicaciones móviles, como parte de una red más amplia de comunicaciones tácticas. A efectos de este artículo, cada vehículo o puesto de mando equipado con el GesCom VCR se considera un nodo de comunicaciones de la red táctica.

La totalidad de la interfaz del sistema se ha diseñado para simplificar al máximo tareas de gestión complejas, para lo cual se ha creado una interfaz gráfica ligera que funciona sobre navegadores Web estándar. El servidor de páginas Web necesario para poder gestionar y configurar el GesCom VCR de cada nodo está incorporado en el propio sistema.

2.1. Enrutado con auto-descubrimiento

Una de las principales funciones del sistema es el enrutado (*routing* en inglés) de las distintas comunicaciones salientes con auto-descubrimiento de las redes de comunicaciones y las interfaces. Para ello se emplea los protocolos OSPF (*Open Shortest Path First)* y PIM (*Protocol Independent Multicast*), junto con una adaptación al entorno táctico del protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing*) y de SMF (*Simplified Multicast Forwarding*).

Figura 2. Ejemplo de mapeo de conectividad.

Por medio de estos protocolos, el sistema es capaz de descubrir la mejor ruta posible para el tráfico de salida, en función de si la interfaz disponible es unicast o multicast, de si el medio está accesible y del nivel de saturación de cada medio. Toda esta información la emplea el sistema para de forma automática encaminar el tráfico, y se presenta al usuario de forma gráfica.

En el ejemplo de la figura 2 se puede ver de forma gráfica la conexión entre dos nodos de comunicaciones móviles, con el mapa de conectividad, el tipo de medio disponible pinchando en el enlace, y el estado de los medios (normal, tráfico elevado, medio saturado o no disponible) con un sencillo código de colores.

Para que el sistema funcione correctamente y pueda disponer de toda la información, es necesario que cada nodo de comunicaciones del despliegue disponga de un GesCom VCR instalado. En caso contrario, es posible averiguar qué medios hay disponibles pero no su nivel de disponibilidad.

2.2. Control de acceso a la red basado en reglas

Otras de las principales funcionalidades es el control de acceso a la red, entendida como todos los medios de comunicación disponibles en cada nodo equipado con el GesCom VCR.

Dicho control de acceso se basa en la definición y aplicación de reglas que autorizan o deniegan el tráfico, en función del medio empleado, del tipo de tráfico y de la interfaz. Más exactamente, el usuario puede definir cualquier cantidad de reglas de acceso y aplicarlas después a los diversos tipos de medios de comunicación disponibles.

En primer lugar, el administrador puede definir rangos de direcciones IP en función de la máscara de red y/o de las direcciones IP. Por otro lado, debe definir tipos de tráfico, servicios y clases de tráfico. Los tipos de tráfico se definen en función del marcado DSCP (*Differentiated Services Code Point*) de los paquetes IP. En función de dicho marcado, el usuario define unas etiquetas que simplifican el manejo del sistema, tal y como puede verse en la figura 3, en la que se han definido diversos tipos de tráfico como por ejemplo de control, de voz, de señalización o datos de baja latencia.

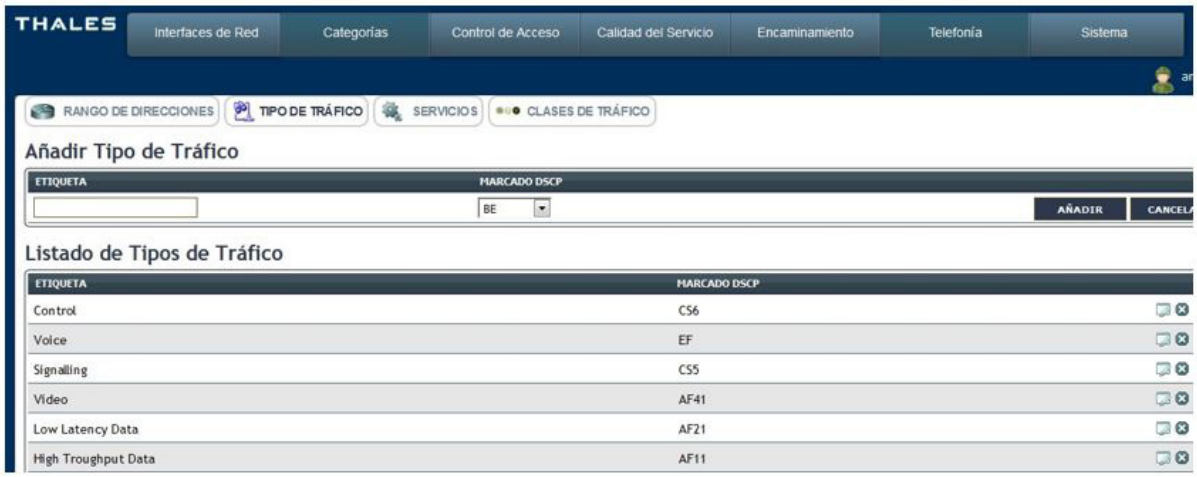


Figura 3. Ejemplo de tipos de tráfico.

También es posible definir servicios disponibles en función del protocolo de red empleado (como TCP o UDP), el puerto de origen y el puerto de destino, ya sean estos un valor único o un rango de valores. Finalmente, el administrador debe definir las clases de tráfico para lo cual emplea los tipos de tráfico antes definidos así como el rango de las direcciones IP de origen y de destino.

Estas definiciones se emplean para crear las reglas de acceso. Cada regla de acceso se define para una clase de tráfico, si dicha clase va a ser permitida o denegada, y si afecta o no a un servicio concreto. Cada una de las reglas, una vez definidas, se puede aplicar sobre cualquier interfaz de comunicaciones disponibles en el nodo de comunicaciones.

A modo de ejemplo, en la figura 4 se puede ver una regla de acceso aplicada sobre una red de tipo LAN (*Local Area Network*) en la cual se autoriza el paso de un tipo de tráfico concreto, mientras que el resto de interfaces no tienen ninguna regla de acceso aplicada.

Figura 4. Ejemplo de reglas de acceso a un medio de comunicación.

Por medio de este mecanismo, el administrador del nodo puede tener un control absoluto de qué tipo de tráfico se puede transmitir por cada una de las interfaces de comunicaciones. El sistema permite al usuario distinguir entre los medios LAN y los medios de tipo WAN (*Wide Area Network*). De esta forma se puede, por ejemplo, impedir la transmisión de vídeo sobre redes radio.

2.3. Calidad de servicio

Otra de las funcionalidades del GesCom VCR permite un control aún mayor sobre el tráfico de datos sobre las diversas interfaces del nodo de comunicaciones, empleando para ello criterios de calidad de servicio.

Para simplificar la definición de las reglas de calidad de servicio, el administrador del nodo define previamente las políticas de servicio. Cada política de servicio tiene en cuenta el tratamiento que se le quiere otorgar al tráfico, el ancho de banda mínimo necesario y el ancho de banda máximo que puede llegar a usarse, tal y como puede verse en el ejemplo de la figura 5. En este ejemplo, el usuario puede elegir diversas formas de tratar el tráfico, desde el valor «por defecto» hasta «mínima latencia», pasando por distintos niveles de canal asegurado.

Figura 5. Ejemplo de definición de políticas de servicio.

Para definir una regla de calidad de servicio, el administrador elige un tipo de tráfico, definido previamente para el control de acceso (ver apartado 2.2) o expresamente, junto con la política de servicio que se desea aplicar, tal y como puede verse en la figura 6.

Figura 6. Ejemplo de definición de la calidad de servicio.

Cada regla de calidad se servicio definida se puede aplicar sobre cualquiera de las interfaces de red disponibles en el nodo de comunicaciones. En caso de aplicar más de una regla, el usuario puede definir la precedencia de unas reglas sobre otras. Esto permite al usuario tener un mayor control sobre cada interfaz disponible, forzando el uso de un medio de comunicación frente a otro en función del ancho de banda disponible o de la latencia requerida, de tal forma que por ejemplo la voz sobre IP funcione correctamente y no se transmita por medios de alta latencia o muy saturados.

2.4. Uso de ficheros de misión

Dada la complejidad inherente a la gestión avanzada de los medios de transmisión, el GesCom VCR dispone de diversas funciones accesibles en base al perfil del usuario. La visualización del enrutado (ver apartado 2.1) está diseñada para usuarios no expertos en redes de comunicaciones aunque con ciertos conocimientos técnicos, mientras que el acceso al medio en función de reglas (ver apartado 2.2) o por calidad de servicio (ver apartado 2.3) suele requerir usuarios avanzados.

Aun así, tal y como se ha visto, al partir la definición en partes, es posible explicar a un usuario no experto que debe aplicar, por ejemplo, la regla de calidad de servicio «Voz IP» sobre las interface radio, sin que tenga por qué saber cómo se ha definido, o en otro ejemplo la regla de acceso «sin vídeo» sobre las interfaces radio y la regla de acceso «vídeo» en el canal vía satélite.

Para simplificar aún más la gestión del sistema, se ha diseñado un sistema de exportación e importación de la definición de cada nodo y su interfaz por defecto basada en ficheros. Adicionalmente, la definición de las distintas interfaces junto con las reglas de acceso y de calidad de servicio aplicadas se guarda en diversas configuraciones, junto con los tipos de servicio, rangos de direcciones, clases de tráfico y políticas de servicio, así como cualquier otra definición necesaria.

De esta forma, personal experto puede configurar por completo un nodo de comunicaciones, mientras que los usuarios pueden aplicar las reglas para cada nodo.

Tal y como se ve en el ejemplo de la figura 7, un usuario está exportando la definición de un nodo tipo de «telefonía» a un fichero. Este fichero podrá ser cargado después en todos los nodos equipados con el GesCom VCR que deban comportarse de forma similar. Igualmente, otros ficheros de misión se cargarán en sus respectivos nodos de comunicaciones.

Figura 7. Gestión de ficheros de misión.

3. Resultados y discusión

El GesCom VCR ha pasado pruebas de laboratorio en la que se han empleado los siguientes equipos, tal de los cuales alguno de ellos puede verse en la figura 8:

1. SOTAS IP M3 con el *software* GesCom VCR instalado.
2. Radio de VHF PR4G V3 con forma de onda MUX.
3. Radio de VHF PR4G V3 modo CNR.
4. Radio de HF TRC 3600/3700.
5. Interfaces Ethernet.

Figura 8. Equipos desplegados para las pruebas de laboratorio.

Las pruebas realizadas han incluido diversos tipos de tráfico, como voz sobre IP, vídeo de diversos anchos de banda o datos de mando y control, y además de los medios radio con diversas capacidades de transmisión, por medio de las interfaces Ethernet se han simulado otros medios de transmisión no disponibles como radioenlaces o comunicaciones vía satélite, cuyo ancho de banda es menor que el de una red Ethernet y con latencias superiores.

En estas pruebas se ha podido verificar la siguiente funcionalidad:

1. Auto-descubrimiento de la topología de red.
2. Enrutado automático del tráfico.
3. Control de acceso a los medios radio. Para ello es necesario disponer de un *driver* específico de control para cada medio radio. En función del progreso de trabajo sobre cada *driver*, se ha conseguido un control parcial o total del mismo.
4. Envío de tráfico por cada medio de transmisión en función de las reglas de acceso definidas.
5. Envío de tráfico por algunos medios específicos cuando se aplican las reglas de calidad de servicio. Esta funcionalidad aún está parcialmente en desarrollo, solamente ha podido probarse la gestión los puertos con la ayuda de un ordenador externo.

Por otro lado, se han realizado algunas pruebas adicionales no previstas inicialmente con respecto a la integración de la voz IP sobre interfaces radio por medio de una pasarela de conversión de voIP a interfaz radio, junto con un directorio de direcciones tanto de radios como de teléfonos voIP basado en un directorio compatible con LDAP (*Lightweight Directory Access Protocol*). Estas pruebas han demostrado una gran versatilidad del sistema para incluir nuevas funciones a corto y medio plazo.

Adicionalmente, se está trabajando en la migración del GesCom VCR a un ordenador embarcado en helicópteros para gestionar tanto las comunicaciones tierra-aire y como las comunicaciones aire-aire, de forma análoga a como se hace en el VCR 8x8. En este caso, la plataforma sobre la que se va a instalar está especialmente adaptada a las vibraciones a bordo de un helicóptero y no incluye Intercomm. Adicionalmente, está previsto desarrollar un módulo de manejo de mensajería formateada VMF (*Variable Message Format*) al ser el estándar de facto para la comunicación aire-tierra en misiones OTAN (estándar MIL-STD-6017).

4. Conclusiones

El GesCom VCR es un gestor de comunicaciones que se está desarrollando específicamente para el futuro VCR 8x8 del Ejército. Como tal, es capaz de gestionar los medios tipo radio con los que se va a dotar estos vehículos, así como la posibilidad de incorporar medios adicionales como por ejemplo la radio de VHF PR4G con forma de onda SUPERMUX.

El sistema se ha diseñado para que no se necesite un usuario experto en redes, ni siquiera uno avanzado, para gestionar cada uno de los nodos de comunicaciones de la red, reduciendo significativamente las necesidades de personal expertos en un despliegue a la vez que se mejora la funcionalidad y versatilidad del despliegue. La necesidad de usuarios expertos puede quedar reducida a las células de comunicaciones de las distintas unidades, de tal forma que sean las encargadas de definir el funcionamiento de cada nodo, sin tener por qué desplegarse sobre el terreno.

Agradecimientos

Deseamos mostrar nuestro más sincero agradecimiento al equipo de Thales Programas que ha trabajado en estos dos últimos años para llevar a buen puerto el proyecto, tanto al equipo de desarrollo como a aquellos que colaboraron de forma puntual con aportaciones imprescindibles.

Protección de RPAS frente a sistemas anti-drones

Aréchaga Tarruell, Gonzalo[1,*]

[1] Ingeniero de Telecomunicaciones, Thales Programas de Electrónica y Comunicaciones S.A.U., gonzalo.arechaga@thalesgroup.com; GAT.

* Autor principal y responsable del trabajo.

Resumen

La popularización del uso de drones de todo tipo, tanto comerciales como de construcción propia, ha convertido en estos equipos en una creciente amenaza para la seguridad, tanto en áreas sensibles como en todo tipo de infraestructuras. Su uso negligente y su posible uso como arma terrorista suponen una amenaza. Por este motivo existen soluciones en el mercado que buscan detectar, identificar y neutralizar drones cuando estos suponen una amenaza, los denominados sistemas anti-drones.

Por otro lado, los Cuerpos y Fuerzas de Seguridad del Estado cada vez disponen de un mayor número de drones, que deben poder operar en todas las circunstancias. Esto incluye su despliegue en zonas donde puede estar activo un sistema anti-drones, ya sea operado de forma legal o de forma malintencionada.

Existen varias soluciones para garantizar que los drones o RPAS autorizados puedan operar en estas circunstancias:

1. Dotar a cada plataforma autorizada de un transpondedor cifrado que lo identifique unívocamente, para que los sistemas anti-drones no los consideren una amenaza.
2. Emplear plataformas autónomas que no requieran el uso de un enlace de comunicaciones de forma continuada para ser inmunes a los inhibidores.
3. Emplear plataformas que no requieran el uso de sistemas de posicionamiento como GPS o Galileo, para que sean inmunes a los inhibidores y a los *spoofers*, ya sea con un inercial o navegando por medio de vídeo.
4. Emplear un radioenlace seguro como el µTMA que sea inmune a las interferencias y por el que se transmita la información de posición.

El RPAS FULMAR X es un ejemplo de plataforma que puede ser inmune a los sistemas anti-drones, al ser autónomo y estar equipado con un inercial. El uso tanto de transpondedores como del µTMA es una solución óptima para asegurar otros modelos de drones o RPAS.

Palabras clave

Anti anti-drones, transpondedor, RPAS autónomo, sistema inercial, radioenlace seguro, FULMAR X.

1. Introducción

La popularización del uso de drones o RPAS (*Remote Piloted Aerial System*, por sus siglas en inglés) de todo tipo, tanto comerciales como de construcción propia, ha convertido en estos equipos en una creciente amenaza para la seguridad, ya sea en áreas sensibles donde se concentre mucha gente como por ejemplo en estadios, conciertos o manifestaciones; o en infraestructuras críticas como por ejemplo en centrales eléctricas. Su uso negligente y su posible uso como arma terrorista suponen una grave amenaza (ver [1] y [2]), además del creciente uso en zonas de conflicto. Por este motivo existen soluciones que buscan detectar, identificar y neutralizar drones cuando estos suponen una amenaza, los denominados sistemas anti-drones (ver [1]).

Por otro lado, los Cuerpos y Fuerzas de Seguridad del Estado cada vez disponen de un mayor número de drones, que deben poder operar en todas las circunstancias, incluso en zonas con un sistema anti-drones activo. Los sistemas anti-drones suelen ser operados por las propias Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, o por fuerzas aliadas en zonas de conflicto. A corto plazo es muy probable que esta tecnología también esté al alcance de aquellos que lo quieran usar de forma malintencionada para impedir el vuelo de los drones autorizados.

Es necesario disponer de soluciones que garanticen que los drones autorizados puedan operar en estas circunstancias, las cuales se pueden agrupar en dos: emplear plataformas diseñadas para evitar los sistemas anti-drones, o modificar las plataformas para protegerlas frente a este tipo de sistemas.

2. Diseño de plataformas inmunes a los sistemas anti-drones

Los sistemas anti-drones se basan en dos premisas: la detección de los drones o RPAS y actuar sobre ellos de alguna manera. Existen muchos tipos de detectores, pero actualmente los más efectivos (ver [1] y [2]) son los radares y los radiogoniómetros. Y de entre los actuadores para frenar el avance de drones y RPAS los más efectivos actualmente son los inhibidores (ver [1]).

2.1. Protección frente a la detección con radar

La primera medida consiste en diseñar drones que sean muy difíciles de detectar por un radar. De hecho, los micro-drones y los mini-drones ya son de por sí de difícil detección, con una sección radar de menos de 0,05 m^2, tal y como se refleja en la Tabla 1.

Categoría	Micro (Cat I)	Mini (Cat. I)	Táctico (Cat. II)	MALE (Cat. III)	HALE (Cat. IV)
Rango	< 5 Km	< 20 Km	< 1.000 Km	3.000 Km	20.000 Km
Sección radar	< 0,01 m^2	< 0,05 m^2	< 0,1 m^2	< 1 m^2	< 10 m^2
Peso	< 2 Kg	< 50 Kg	< 250 Kg	< 500 Kg	< 1.000 Kg

Tabla 1. Características típicas de drones y RPAS

Existen formas de minimizar aún más esta sección radar. Por ejemplo, las plataformas de ala fija con un único motor son mucho más difíciles de detectar que las de múltiples hélices (como cuadracópteros u

octocópteros). O empleando materiales no metálicos o aleaciones que reduzcan la reflexión de las ondas electromagnéticas. De hecho, actualmente existen algunos drones comerciales de ala fija que emplean este tipo de materiales simplemente por reducción de peso, pero que complican mucho su detección por medio de un radar, como el FULMAR X de Thales.

2.2. Reducción de emisiones radio

La segunda medida consiste en evitar la emisión de señales radio. Los radiogoniómetros actualmente disponibles pueden localizar las señales emitidas tanto por la plataforma (telemetría y carga útil) como por la estación de control a varios kilómetros de distancia, por lo que minimizar o eliminar las emisiones radio es una forma de hacerlos más difíciles de detectar.

Para ello hay dos alternativas complementarias: emplear plataformas autónomas que no requieran recibir órdenes de la estación de control, y apagar los emisores radio de la plataforma (telemetría y carga útil). En el primer caso, eso implica que la plataforma debe conocer por adelantado la ruta a seguir o que solamente va a recibir actualizaciones puntuales del plan de vuelo. Y en el segundo caso, no poder transmitir en tiempo real la información obtenida por medio de la carga útil, almacenándola en la propia plataforma para su descarga una vez que ha terminado la misión.

Recientemente empiezan a comercializarse algunos que permiten programar la ruta a seguir antes del despegue, así como algunos RPAS totalmente autónomos como el FULMAR X de Thales.

2.3. Inmunidad frente a inhibidores

La práctica totalidad de los drones y RPAS disponibles no pueden operar correctamente si se inhiben las bandas de frecuencia que emplean para transmitir y recibir señales y las del sistema de posicionamiento. En la Tabla 2 se reflejan las bandas típicas de emisión y recepción de señales radio de los RPAS, incluyendo las del sistema GPS (*Global Positioning System*) de posicionamiento.

Señal	Radiocontrol	Posicionamiento	Wi-Fi	Vídeo
Frecuencias Típicas	340 MHz 400 Mhz	1.227,6 MHz 1.575,42 MHz	2,4 GHz 5 GHz	 5,8 GHz

Tabla 2. Bandas típicas de emisiones radio de los RPAS

De hecho, la mayor parte de los inhibidores diseñados para controlar drones o RPAS se centran en alguna o en la totalidad de esas bandas. Los operadores civiles de estos sistemas, al menos en Europa y Estados Unidos, no pueden inhibir la banda del GPS, algo solo al alcance de los Cuerpos y Fuerzas de Seguridad del Estado, y no en todas las circunstancias.

En general los drones comerciales de menor tamaño no pueden operar sin la señal de la estación de control, ejecutando la orden de «vuelta a casa» o de «aterrizaje seguro». El inhibir la señal de vídeo puede obligar al operador a cancelar el vuelo al no saber a dónde va. Y la casi totalidad de los drones no pueden operar sin recibir señal de posición de sistemas satélite como GPS o GALILEO.

La alternativa por tanto es disponer de drones totalmente autónomos, tal y como ya se ha descrito en el apartado anterior (ver 2.2), pero que además no dependan de la señal de posicionamiento. Para ello, se pueden emplear básicamente dos alternativas:

1. Dotar de un navegador inercial a la plataforma para no depender de la señal del sistema de posicionamiento en el caso de que esta no pueda recibirse. Algunas plataformas comerciales disponen de este tipo de soluciones, como el FULMAR X de Thales.
2. Dotar a la plataforma de la capacidad de procesado necesaria para emplear navegación basada en reconocimiento de imágenes de vídeo. Para ello normalmente es necesario cargar previamente los puntos de control basados en imágenes necesarios para alcanzar el destino, lo que implica un trabajo previo de preparación considerable.

3. Protección de plataformas frente a los sistemas anti-drones

Disponer de nuevos drones y RPAS que puedan operar casi todo el tiempo aún en presencia de sistemas anti-drones es una gran ventaja. Sin embargo, no se debe obviar que ya existen numerosas plataformas en operación, y obligar a la compra de nuevas plataformas no siempre es posible.

Por eso, se está trabajando en métodos para asegurar las plataformas existentes y futuras en este tipo de escenarios con diversas aproximaciones como las descritas en los siguientes apartados.

3.1. Identificar las plataformas autorizadas

Una solución, aunque no totalmente efectiva, pasa por instalar algún tipo de mecanismo identificador unívoco en las plataformas autorizadas a volar. Bastaría con un sistema tipo transpondedor que emita una señal identificativa en una frecuencia conocida, con algún mecanismo de cifra basado en clave pública para evitar la suplantación de identidad.

Este tipo de solución, sencilla y barata a priori, garantizaría que en un entorno amistoso de uso de sistemas anti-drones, en territorio nacional o en zonas de operaciones militares, los sistemas anti-drones identifiquen como autorizadas a las plataformas equipadas con el transpondedor. Independientemente del mecanismo de detección, esta solución impediría que dichas plataformas fueran neutralizadas con inhibidores, lanzadores de redes, armamento, etc. (ver [1]).

Existen diversas alternativas de bajo tamaño y peso en el mercado compatibles con el sistema ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*) para control del tráfico aéreo e incluso compatibles con los sistemas de identificación amigo-enemigo o IFF (*Identify Friend or Foe*).

El principal inconveniente de esta solución radica en que no garantiza poder operar las plataformas si existen sistemas o equipos anti-drones no controlados o no autorizados en el área, como por ejemplo inhibidores de frecuencia que afecten a los drones o RPAS en vuelo.

3.2. Radioenlace seguro

Otra alternativa consiste en modificar el canal de comunicaciones empleado entre la plataforma y la estación de control por uno que sea muy difícil de inhibir. La práctica totalidad de las plataformas existentes emplean equipos de transmisión convencionales, no diseñados para evitar ni las interferencias ni los inhibidores enfocados como los que se pueden emplear en sistemas anti-drones.

La mejor alternativa es substituir los emisores actuales por otros que estén específicamente diseñados para operar en entornos hostiles y que incluyan protección frente a las contra-medidas electrónicas. Típicamente, estos equipos emplean alguna banda protegida para que solo se vean afectados por inhibidores de amplio espectro. Además, suelen funcionar con salto en frecuencia por medio de un código similar a los algoritmos de cifra que regula a qué frecuencia va a saltar cada vez. Cuantos más saltos de frecuencia se realicen por segundo, menor es la potencia emitida en cada parte de la banda empleada, siendo más difícil de detectar e inhibir el canal de comunicaciones.

Este tipo de equipos de transmisión suelen ser relativamente voluminosos y de alto consumo energético. Sin embargo, el grupo Thales ha desarrollado el equipo módem µTMA (ver figura 1), basado en sus equipos de aviónica embarcada de altas prestaciones para todo tipo de aeronaves de ala fija o rotatoria, un radioenlace de bajo peso y consumo especialmente diseñado para RPAS.

Figura 1. Módem de radioenlace µTMA.

Las características concretas del equipo no pueden ser suministradas en este documento, puesto que los datos de peso, volumen, consumo, banda de frecuencias, número de saltos por segundo y tipo de algoritmo de salto son considerados confidenciales por el fabricante.

Para que el sistema funcione, es necesario disponer de este equipo tanto en la plataforma como en la estación de control, de tal forma que el enlace de transmisión sea segura y prácticamente inmune a las interferencias. Este tipo de enlace se emplea actualmente en el mini RPAS Spy'Ranger de Thales y forma parte de las opciones a incluir en el RPAS táctico FULMAR X de Thales (ver figura 2).

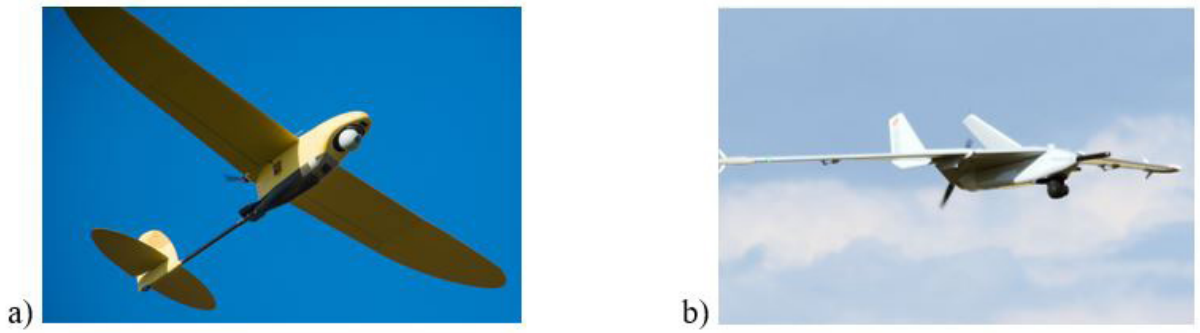


Figura 2. RPAS de Thales Spy'Ranger (a) y FULMAR X (b).

3.3. Posicionamiento seguro

Finalmente, es posible garantizar la operatividad de casi cualquier plataforma si se la equipa con un sistema que permita obtener la posición de forma segura.

Generalmente, las plataformas están equipadas con receptores de GPS de tipo civil. Existe otra variante solo disponible para fuerzas armadas que es el GPS de grado militar, que es más invulnerable frente a interferencias e inhibidores, aunque no totalmente. Estos equipos suelen ser más grandes y pesados y requieren de una autorización especial al estar regulado su uso por el propietario de la red de satélites GPS, el Departamento de Defensa de Estados Unidos.

Figura 3. Posicionamiento seguro con receptor GPS militar (a) y dispositivo TopLOC (b).

Alternativamente, es posible transmitir en remoto la información de posición para que la plataforma disponga de ella en todas las circunstancias. A tal fin, el grupo Thales ha desarrollado el dispositivo TopLOC basado en el sistema GALILEO de posicionamiento global por satélite que combina un receptor en la plataforma con información adicional proporcionada por una señal proveniente de la estación de control. Esto securiza la información de posición tanto frente a interferencias como en caso de *spoofing* o generación falsas de posición.

En la figura 3 se pueden ver ambas alternativas, el equipo receptor de GPS militar embarcado TopStar M de Thales, y el receptor de posición TopLoc de Thales, mientras que en la Tabla 3 se detallan las principales diferencias entre ambos equipos.

Equipo	TopStar M	TopLOC
Posicionamiento	GPS militar	GALILEO
Tamaño	22 x 16 x 7 cm	9 x 4 x 2 cm
Peso	2 Kg	160 g
Complejidad	Alta	Baja
Seguridad	Embebida	Remota

Tabla 3. Principales diferencias entre el receptor de GPS militar y TopLOC

Además del peso y el tamaño, siendo mucho más ligero y pequeño el TopLOC, la otra gran diferencia estriba en su complejidad. El GPS militar dispone de módulos adicionales para garantizar la seguridad de la información, mientras que en el caso del TopLOC la gestión de seguridad se realiza en remoto desde tierra y de forma transparente al usuario. El dispositivo TopLOC es una forma mucho más sencilla y ligera de asegurar la obtención de posición de una plataforma, además de brindar una mayor protección frente a interferencias, inhibidores y ataques de tipo *spoofing*.

4. Resultados y discusión

Tras analizar las posibles estrategias, nos vamos a centrar en asegurar plataformas por medio de una recepción segura de la posición. Concretamente, en el uso del dispositivo TopLOC integrado en una plataforma aérea. Para ello, primero se han realizado pruebas de laboratorio, y posteriormente están previstas pruebas de campo con plataformas reales. El esquema de funcionamiento de la solución se detalle en la figura 4, en la que se distinguen los siguientes elementos:

1. Un receptor seguro de GNSS en la estación de control.
2. Un servidor remoto de posición conectado al receptor seguro de GNSS.
3. Un módem de transmisión µTMA en la estación de control para enviar la posición.
4. Un módem de recepción µTMA embarcado en la plataforma aérea.
5. Un receptor de posición TopLOC.

El sistema funciona de la siguiente forma: en la estación de control, se recibe la posición propia con precisión por medio de un sistema que garantiza que no se están produciendo ni interferencias ni se reciben señales de posicionamiento falsas. Un equipo de estas características es muy voluminoso, por lo que no es factible embarcarlo en un dron o en un RPAS.

Esta posición precisa se envía a la plataforma por medio de un servidor remoto que encapsula y asegura la información. El servidor remoto proporciona la seguridad necesaria al dato para que este no pueda ser alterado aunque el canal radio fuera interferido o modificado de alguna forma.

Para blindar el canal entre la estación de control y la plataforma frente a interferencias e inhibidores, se emplea un radioenlace asegurado por medio del módem µTMA, para lo cual se emplean dos equipos, uno en la estación de control y el otro embarcado en la plataforma aérea.

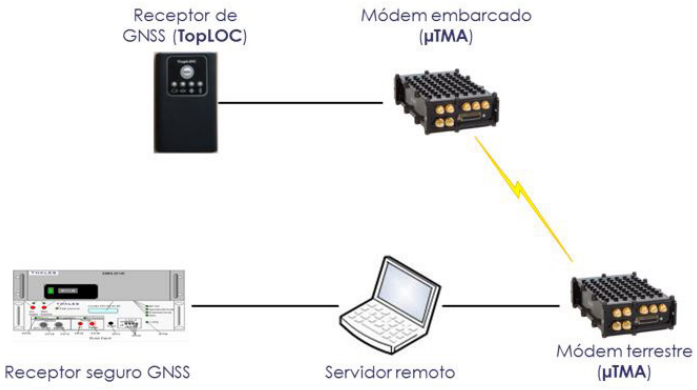


Figura 4. Transmisión remota de posición – pruebas de laboratorio.

Se han hecho una serie de pruebas en laboratorio con diversos escenarios, entre los que se contemplaba la falta de señal del GNSS en la plataforma, recepción de señales falsas en la plataforma, intento de modificación de la señal transmitida por medio del enlace radio, y en todos los casos el dispositivo TopLOC es capaz de proporcionar un dato fiable de posición.

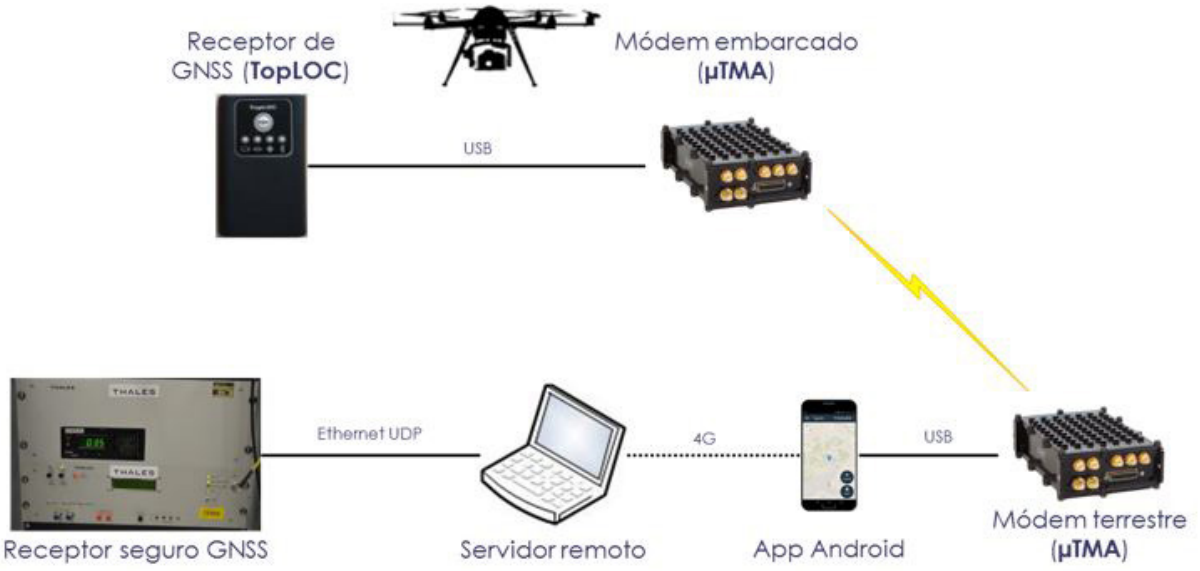


Figura 5. Transmisión remota de posición – pruebas de campo.

El siguiente paso es la realización de pruebas de campo, para lo cual es imprescindible conseguir ciertos permisos especiales. En las pruebas de campo, se ha especificado con mayor detalle la conexión a realizar entre los diversos equipos. Concretamente, tal y como puede verse en la figura 5, el receptor seguro de GNSS y el servidor remoto se conectan por Ethernet, y los dispositivos conectados con ambos módem µTMA lo hace a través de USB.

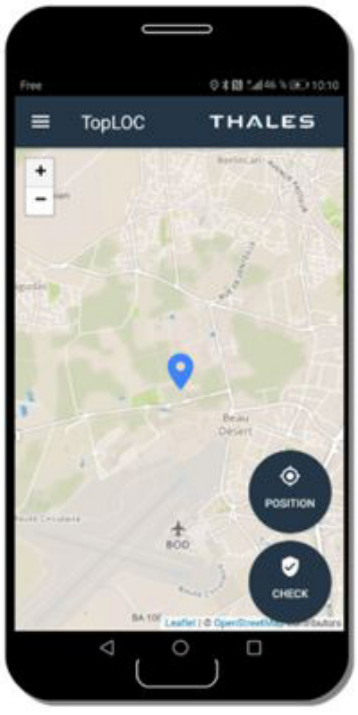


Figura 6. Aplicación TopLOC instalada en un terminal.

Para mejorar la usabilidad del sistema, se ha añadido un terminal Android (Smartphone o tableta) que se conecta al servidor remoto de posición a través de un enlace 4G securizado, tal y como se refleja en la figura 5. Esto permite conectar múltiples terminales a un único servidor de posiciones, de tal forma que se puedan operar múltiples plataformas con un único servidor. En el terminal con una interfaz muy sencilla (ver figura 6) se puede ver la posición de la plataforma, modificarla si se considera necesario, y comprobar el estado de seguridad de la posición obtenida.

5. Conclusiones

Hemos visto cómo hay dos estrategias básicas para garantizar el uso de drones y RPAS en un entorno hostil como el del uso de sistemas anti-drones: diseñar plataformas inmunes o modificarlas.

En el caso del diseño, si se opta por el uso de materiales no metálicos y de plataformas autónomas no dependientes de la señal radio e incluso no dependientes de información de posición recibida por medio de una red GNSS, estas deberían poder operar en todas las circunstancias. Al menos de momento, ya que tanto las medidas como las contramedidas están en continua evolución.

Por otro lado, modificar las plataformas actuales permite seguir operando aquellas que ya han sido adquiridas, o adquirir nuevas plataformas sin tener que preocuparse de si cumplen con los requisitos de operación en entorno hostil. En el caso del uso de transpondedores, aunque no garantizan que siempre puedan usarse, es un método rápido y barato de dotarlas de protección.

Sin ninguna duda, el uso de radioenlaces securizados junto con un dispositivo como el TopLOC puede proporcionar a cualquier plataforma un nivel de fiabilidad y disponibilidad superior a cualquier otra alternativa actualmente disponible.

Agradecimientos

Muchas gracias al equipo de Thales que ha trabajado en el desarrollo y prueba del sistema, así como al Departamento de Comunicación por su insustituible trabajo y apoyo.

Referencias

1. *Aréchaga Tarruell G, Cortés Cortés MJ, Roldán Nieto O. Sistema táctico anti-drones «Drone Hunter». V Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad. 2017;34.*
2. *Marín Delgado JA. Drones, la nueva amenaza para el espacio aéreo. Revista de Aeronáutica y Astronáutica. 2018;875:529-38.*

Diseño e implementación de un receptor de VLF para la detección de perturbaciones ionosféricas

Montoya Andúgar, Fernando[1,*], García Merino, Alberto[2], Guerrero Ortega, Antonio[3] y Cid Tortuero, Consuelo[4]

[1] Grupo de Investigación Meteorología Espacial. Universidad de Alcalá. Campus Universitario, A2, km 33,600. f.montoya@edu.uah.es (FM).

[2] Grupo de Investigación Meteorología Espacial. Universidad de Alcalá. Campus Universitario, A2, km 33,600. alberto.garciamerino@edu.uah.es (AGM).

[3] Grupo de Investigación Meteorología Espacial. Universidad de Alcalá. Campus Universitario, A2, km 33,600. antonio.guerreroo@uah.es: (AGO).

[4] Grupo de Investigación Meteorología Espacial. Universidad de Alcalá. Campus Universitario, A2, km 33,600. consuelo.cid@uah.es: (CC).

* Email: consuelo.cid@uah.es

Resumen

Las perturbaciones ionosféricas pueden convertirse en un asunto de seguridad nacional debido a sus consecuencias en los sistemas de comunicaciones, incluyendo la comunicación vía satélite, las comunicaciones en HF y los sistemas GNSS. El origen de estas alteraciones se encuentra en diferentes formas de actividad solar, entre las que destacan las fulguraciones. La disponibilidad de información precisa sobre cuándo se produce una fulguración y su intensidad supone una valiosa aportación en la toma de decisiones, especialmente complejas durante operaciones. Actualmente esa información procede de los datos de los satélites estadounidenses GOES. En esta comunicación se presenta el diseño e implementación de un receptor de VLF realizado en la Universidad de Alcalá (UAH) para la detección de fulguraciones. El monitor UAH registró las fulguraciones que sucedieron en septiembre de 2017, entre las que se encuentra la más intensa de la última década, que produjo un apagón radio mientras el huracán Irma pasaba por Florida, dejando la comunicación HF inutilizable durante ocho horas.

En esta comunicación se presentan detalles sobre la instrumentación desarrollada y las observaciones de la estación VLF de la UAH durante septiembre de 2017, comparadas con las proporcionadas por los satélites GOES. También se presentarán las perspectivas de futuro, entre las que se encuentra la creación de una red europea de monitores coordinados que permitirá la no dependencia de Estados Unidos en la información de fulguraciones.

Palabras clave

Fulguraciones solares, comunicaciones, ionosfera.

1. Introducción

La ionosfera constituye la región más externa de la atmósfera terrestre y se extiende desde unos 70 km a 1.000 km sobre el nivel del mar. La radiación del Sol interacciona con las partículas de la alta atmósfera liberando electrones mediante el mecanismo de fotoionización. Estos electrones a su vez excitan otros mediante el efecto conocido como precipitación de electrones. Esta interacción hace que en la ionosfera del lado iluminado de la Tierra pueda distinguirse una estratificación en lo que se denominan capas o regiones F, E y D, siendo la capa D la más próxima a la superficie y que desaparece durante la noche local.

Las consecuencias de las perturbaciones de la ionosfera en las comunicaciones son numerosas. Por citar algún ejemplo, Kelly *et al.* [1] presentan un estudio sobre la influencia de las perturbaciones ionosféricas en un apagón ocurrido en las comunicaciones durante la operación Anaconda en Afganistán. Más recientemente, a comienzos de septiembre de 2017, la desafortunada coincidencia de varias fulguraciones solares durante el paso del huracán Irma complicó de forma importante la gestión de la emergencia, ya que las comunicaciones radio estuvieron inoperativas durante momentos críticos [2].

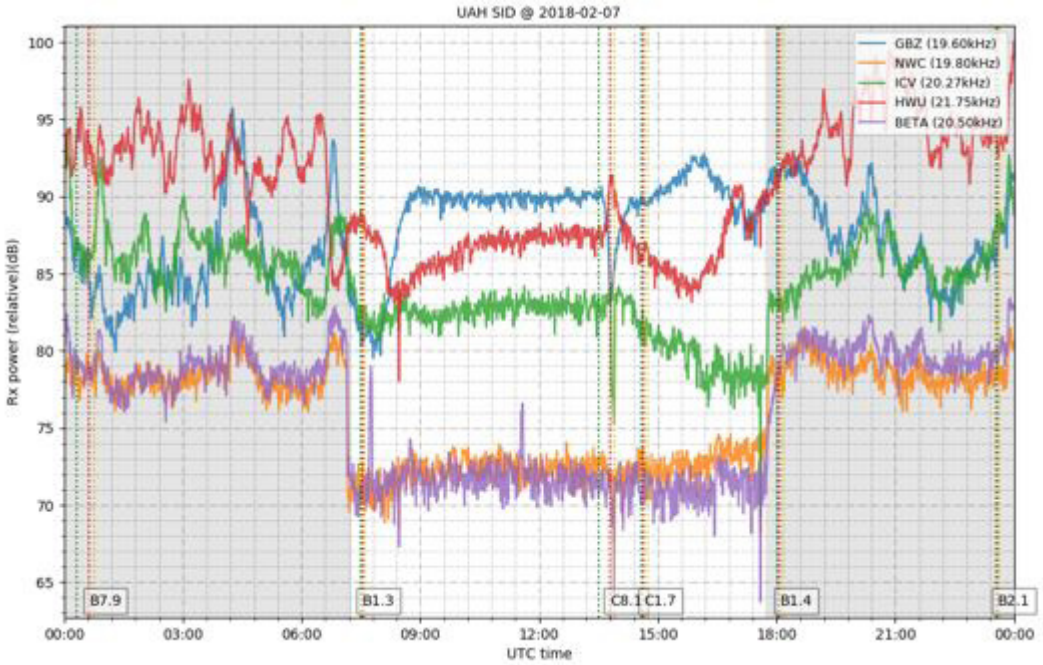


Figura 1. Potencia recibida en el receptor VLF-UAH durante el día 7 de febrero de 2018 procedente de cinco emisores diferentes. Las zonas sombreadas corresponden a la noche local. Las líneas verticales indican los tiempos de ocurrencia de fulguraciones en GOES, cuya intensidad se indica al pie de la correspondiente línea. Aproximadamente a las 14 UTC, coincidiendo con la fulguración C8.1, se aprecia un pico de disminución de la potencia en las señales procedentes de GQD –en la figura GBZ– (Anthorn, Cumbria, Reino Unido) e ICV (Tavolara, Italia) y de aumento en HWU (Rosnay, Francia).

La observación de las perturbaciones de la ionosfera en las transmisiones de muy baja frecuencia (VLF), banda que comprende desde los 3 kHz a los 30 kHz, puede ser utilizada para obtener información valiosa de la actividad solar (e.g. [3], [4]). Actualmente hay varias estaciones transmisoras en VLF repartidas por el globo, entre las que se encuentran algunas dedicadas a comunicaciones con submarinos. Estas señales se reflejan en la capa E de la ionosfera (100 - 120 km), pudiéndose detectar en puntos de la superficie terrestre localizados a cientos de km del lugar donde se emiten. Durante el día, el paso de la señal a través de la capa D (70 – 90 km) hace que la potencia recibida se atenúe, a diferencia de la noche en la que esta capa desaparece. Así, observando la potencia recibida a lo largo de un día procedente de un determinado emisor VLF, es posible identificar un descenso de la potencia a la salida del Sol y un aumento a la puesta de este (figura 1). Estos cambios son el reflejo del estado de la ionización de la ionosfera.

Durante una fulguración solar, el aumento brusco de la radiación electromagnética que llega del Sol produce una intensificación repentina de la ionización de la ionosfera y, como consecuencia, el aumento de su densidad electrónica. Esta variación de la densidad electrónica afecta a las comunicaciones radio que se propagan utilizando la zona entre la superficie y la ionosfera como guía de ondas. Dos fenómenos compiten en este escenario: por un lado, la atenuación que tiene la onda al pasar por una capa D con mayor densidad electrónica, y por otro, la variación de la altura a la que se produce la reflexión de la onda, dado que esta depende de la densidad electrónica. Este último fenómeno es evidente, por ejemplo, en la mayor frecuencia de corte a la que la onda se refleja en la ionosfera en incidencia vertical (MUF, *Maximum Useable Frequency*), ya que dicha frecuencia es directamente proporcional a la raíz de la densidad electrónica de la ionosfera. Así, durante una fulguración, la potencia de la señal VLF recibida puede disminuir debido a la mayor atenuación que sufre al atravesar la capa D (por ejemplo, las señales de 19,60 kHz y 20,27 kHz en la figura 1), o bien aumentar si la reflexión se produjo a una altura diferente (por ejemplo, la señal de 21,75 kHz en la figura 1). En cualquiera de los dos casos el cambio en la potencia será brusco, denominándose por ello perturbación ionosférica súbita o SID (*Sudden Ionospheric Disturbance*) [5], [6], [7], [8] y [9]. De esta forma, la monitorización de la potencia recibida de señales VLF resulta de utilidad para identificar tanto el momento como la intensidad de una fulguración solar.

2. El receptor VLF de la Universidad de Alcalá

El sistema de monitorización de SID de la UAH está formado por una antena de espira, un filtro-preamplificador de VLF y un ordenador en el que está instalado el *software* SuperSID [10].

Figura 2. Antena de la estación VLF de la Universidad de Alcalá en su ubicación en la Escuela Politécnica Superior.

La antena está formada por un bobinado octogonal de aproximadamente 100 metros de alambre de cobre de 1 mm de diámetro de sección soportado por una estructura de tubos de PVC (figura 2**.** Se eligió la geometría octogonal con objeto de maximizar el área manteniendo el perímetro, siendo, al mismo tiempo, de sencilla construcción. La salida de la antena hacia la etapa de amplificación y filtrado se realiza mediante un cable coaxial. Con objeto de evitar las componentes de alta frecuencia de las fuentes de alimentación conmutadas, que afectarían a la banda VLF, se optó por diseñar una fuente de alimentación lineal para alimentar el preamplificador. Esta utiliza un trasformador con 18 V_{ef} (AC) a la salida, la cual es rectificada mediante un puente de diodos y posteriormente filtrada por unos condensadores. Para reducir el rizado se utiliza un regulador de tensión lineal. La etapa de filtrado y amplificación se ha diseñado mediante amplificadores operacionales [11] con ganancia en tensión de 46 dB y frecuencias de corte de 10 kHz y 75 kHz, dado que es la banda de las transmisiones de nuestro interés. Finalmente, la señal es muestreada por la tarjeta de sonido del ordenador. Puesto que la tarjeta cuenta con una frecuencia de muestreo de 48 kHz, permite obtener información hasta los 24 kHz.

Los programas empleados para la monitorización están escritos en Python [10] y se utilizan para registrar y representar los valores de amplitud de potencia recibida para frecuencias preseleccionadas. La selección se ha realizado considerando las estaciones emisoras existentes cuya señal se recibe en la localización de la antena. Además, se genera una gráfica de evolución de la potencia a esas frecuencias a lo largo del día. La gráfica y los datos numéricos se suben automáticamente a un servidor para su posterior análisis científico. De este modo, se dispone también de la capacidad de compartir y comparar los datos obtenidos en nuestra geolocalización de manera remota con otros monitores SID.

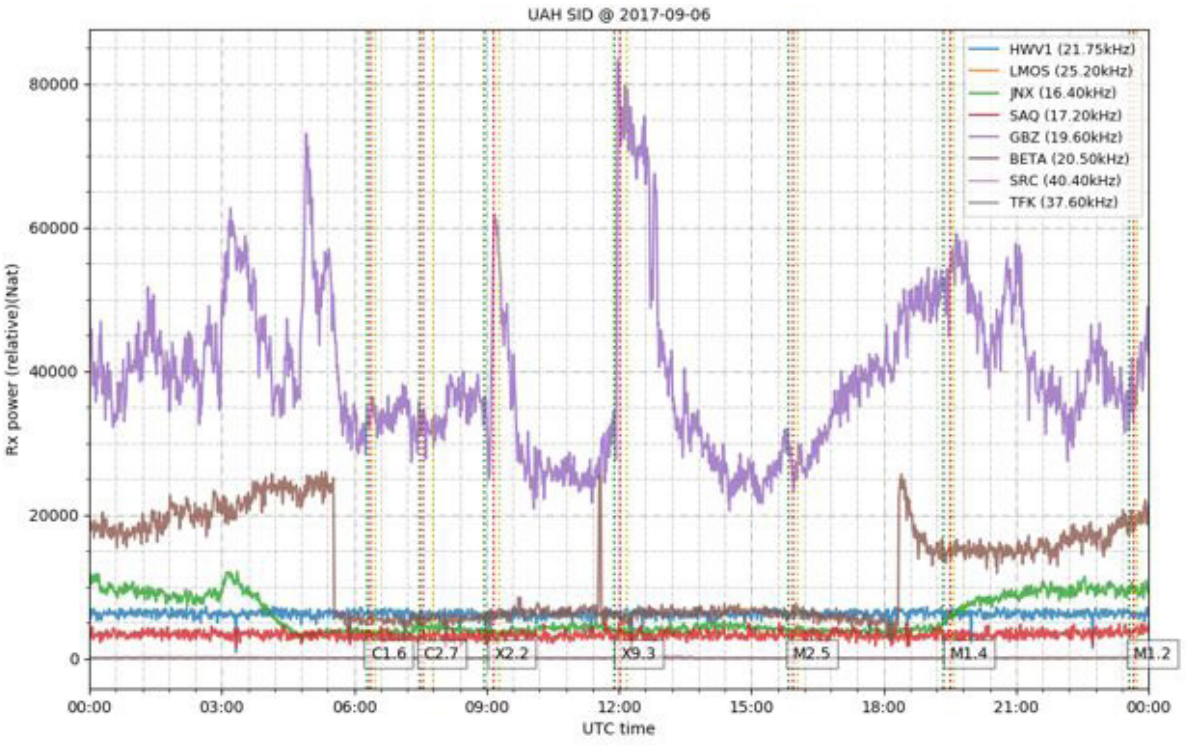


Figura 3. Imagen histórica de la primera fulguración solar registrada en el monitor VLF-UAH. Destacan las señales GQD (GBZ en la figura), en la que se distinguen las fulguraciones como intensificaciones de la potencia recibida, y BETA, utilizada para comprobar la sincronización temporal. Las líneas verticales indican la ocurrencia de fulguraciones en los satélites GOES, cuya intensidad se indica al pie de la correspondiente línea.

3. Las fulguraciones de septiembre de 2017

En septiembre de 2017 tuvieron lugar varias fulguraciones solares entre las que se encuentra la mayor del ciclo solar 24, catalogada como X9,3. Estas fulguraciones permitieron comprobar que el monitor VLF de la UAH estaba funcionando correctamente, aunque con un ruido excesivo. La señal procedente del transmisor GQD, perteneciente a la estación OTAN de Anthorn, Cumbria (Reino Unido), y utilizada fundamentalmente para transmitir órdenes a submarinos a 19,6 kHz, fue la que detectó las perturbaciones producidas en la ionosfera por estas fulguraciones.

En concreto, el día 6 de septiembre se produjeron las dos primeras fulguraciones en rayos X tipo X procedentes de la región activa NOAA 12673, de magnitudes X2,2 y X9,3 según los datos procedentes del satélite GOES en el canal 1 – 8 Å. La señal recibida en la estación VLF de la UAH procedente de GQD (ver figura 3) muestra claramente dos cambios bruscos en amplitud a las 8:57 UT y a las 11:53 UT, correspondientes a las dos fulguraciones observadas por GOES. Por otra parte, la magnitud de la discontinuidad es mayor en el caso de la fulguración más intensa en GOES. Este tipo de observaciones se repite en los siguientes días mostrando varias fulguraciones de diferente intensidad hasta que el día 10 de septiembre a las 15:35 UT se registra la última fulguración relevante de la región activa NOAA 12673. La figura 4 presenta una comparativa de las señales registradas en la estación VLF de la UAH (en color azul) y las señales del satélite GOES 15 en el canal 1 – 8 Å (en rojo) para los días 6 y 10 de septiembre de 2017. La comparativa de ambas señales muestra que la fulguración ocurrida el día 6 de septiembre a las 8:57 UT se registra primero en la estación de la UAH y posteriormente en GOES, aunque ello se debe a que el satélite GOES 15, cuyos datos se estaban analizando en tiempo real, se encontraba en eclipse en ese momento. No obstante, el análisis científico posterior de los datos de GOES 13 muestra que la fulguración se registra simultáneamente en GOES 13 y en los registros de la UAH. Así, puede concluirse que los datos recogidos en la estación VLF de la Universidad de Alcalá proporcionan, al menos, la misma información recogida por los satélites GOES de NOAA (US). Esta redundancia de información puede ser de gran utilidad.

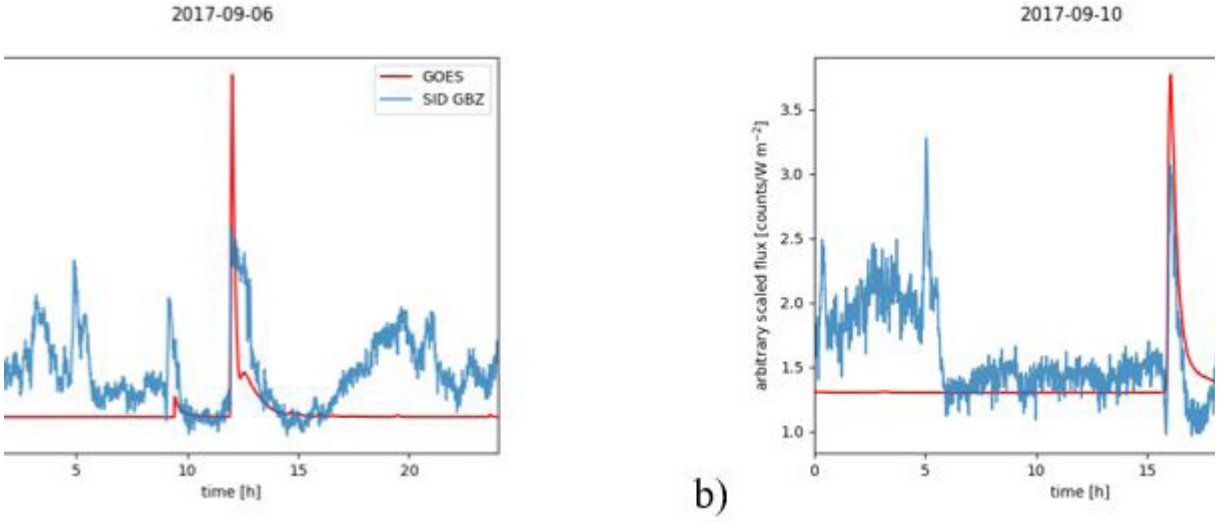


Figura 4. Amplitud de la señal medida por el monitor VLF-UAH a) durante el día 6 de septiembre de 2017 y b) durante el día 10 de septiembre de 2017, ambas en color azul. En color rojo se muestra el flujo medido por GOES en el canal 1-8 Å para comparación.

4. Perspectivas de futuro

La utilidad mostrada por el sistema durante las fulguraciones de septiembre de 2017 ha puesto de relevancia su valor estratégico, proporcionando una medida que actualmente únicamente se disponía en España gracias a datos procedentes de satélites propiedad de Estados Unidos. Este hecho ha llevado al

grupo de investigación meteorología espacial de la Universidad de Alcalá a avanzar en varios caminos. Por una parte, buscando una nueva ubicación para la antena con objeto de reducir el ruido y mejorar la señal recibida. Por otra, en la mejora de la instrumentación, con el desarrollo de circuitería que minimice la degradación de la señal. Además, los datos recogidos en el monitoreo pueden aportar valiosa información para el análisis científico sobre las consecuencias de las fulguraciones, por ejemplo, su relación con eyecciones de masa coronal y/o la producción de partículas energéticas solares. Los resultados preliminares que se están obteniendo con el estudio científico de los datos almacenados hasta el momento son muy prometedores. Finalmente, se están haciendo importantes esfuerzos para la coordinación con otros equipos de investigación europeos con objeto de establecer una red de antenas receptoras VLF que proporcionen a Europa información regional de la perturbación ionosférica en tiempo real y permitan la no dependencia de los datos relativos a fulguraciones solares que actualmente proceden de satélites de EE. UU.. En este momento se trabaja en coordinación con el Observatorio de París y ya se ha establecido un inicio de colaboración con investigadores alemanes, irlandeses, ingleses e italianos.

Agradecimientos

Los autores del trabajo agradecen al MINECO los fondos procedentes del proyecto AYA2016-80881-P (incluyendo fondos FEDER), así como los fondos de la Universidad de Alcalá que han permitido realizar este trabajo. También agradecen la disponibilidad de los datos del flujo en rayos X procedentes de GOES.

Referencias

1. *Kelly M A, Comberiate J M, Miller E S, Paxton L J. Progress toward forecasting of space weather effects on UHF SATCOM after Operation Anaconda. Space Weather 2014; https://doi.org/10.1002/2014SW001081.*
2. *Redmon R J, Seaton D B, Steenburgh R, He J, Rodriguez J V. September 2017's Geoeffective Space Weather and Impacts to Caribbean Radio Communications during Hurricane Response. Space Weather. 2018; https://doi.org/10.1029/2018SW001897.*
3. *Thomson N R, Rodger C J, Clilverd M A. Large solar flares and their ionospheric D region enhancements. J. Geophys. Res. 2005;110(A06306),doi: 10.1029/2005JA011008.*
4. *Wenzel D, Jakowski N, Berdermann J, Mayer C, Valladares C, Heber B. Global ionospheric flare detection system (GIFDS). J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2016;138, 233-242.*
5. *Kaufmann P, Paes de Barros M H. Some Relationships Between Solar X-Ray Bursts and SPA's Produced on VLF Propagation in the Lower Ionosphere. Sol. Phys. 1969;9(2):478-468.*
6. *McRae W M, Thomson N R. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations. J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2004;66:77-87.*
7. *Thomson N R, Clilverd M A. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF amplitude observations, J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2001;63:1729-1737.*
8. *Thomson N R, Rodger C J, Dowden R L. Ionosphere gives size of greatest solar flare, Geophys. Res. Lett. 2004;31, L06803, doi:10.1029/2003GL019345.*
9. *Ammar A, Ghalila H. Ranking of Sudden Ionospheric Disturbances by Means of the Duration of VLF Perturbed Signal in Agreement with Satellite X-Ray Flux Classification. Acta Geophys. 2016;64(6):2794-2809.*
10. *Gibert E. SuperSID software, https://github.com/ericgibert/supersid*
11. Malik N R. Circuitos electrónicos. Análisis, simulación y diseño. Prentice-Hall; 2000.

Alternativas de navegación, basada en radiofrecuencia, para RPAS en entornos de GNSS denegado

Gómez-López, Miguel[1,*], Gómez-Pérez, Ignacio[2], Nieto Illescas, Alberto[3], Clemente Muelas, Daniel[4], Sánchez García, Jesús[5], Laso Martín, David[6]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). gomezlma@inta.es: (MGL).

[2] Universidad Politécnica de Madrid (UPM). ignacio.gomez@upm.es: (IGP).

[3] Aurea Avionics. alberto.nieto@aureaavionics.com (ANI).

[4] Universidad Politécnica de Madrid (UPM). daniel.clemente.muelas@alumnos.upm.es: (DCM).

[5] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). sanchezgje@inta.es: (JGS).

[6] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). lasomd@inta.es: (DLM).

* Miguel Ángel Gómez López; gomezlma@inta.es: (MGL) .

Resumen

Este artículo describe el desarrollo de un proyecto enmarcado dentro de la navegación y guiado de vehículos autónomos aéreos («drones») en entornos de señal GNSS denegada –típicamente interiores de edificios, cuevas, o campo de batalla–. El objetivo es la puesta a punto de una alternativa para navegar en estos casos. La solución propuesta ha sido testeada en un ambiente estructurado, y utiliza como sustituto a la navegación GNSS un sistema de radio balizas basadas en tecnología *Ultra Wide Band* (UWB). Dicho sistema se ha implementado en una placa de desarrollo y se ha comunicado directamente con la controladora de vuelo, de manera que la controladora usa como referencia absoluta de posición del sistema balizas UWB de manera transparente para el usuario. El sistema de navegación del vehículo (basado en un *Extended Kalman Filter*, «EKF») ha sido adaptado para la admisión de la solución de navegación propuesta. Adicionalmente, se ha incorporado un sensor de ultrasonidos que proporcione una medida de altura lo suficientemente fiable para alcanzar un despegue y aterrizaje autónomos.

Por otro lado, se recogen las diferentes herramientas desarrolladas para el tratamiento y análisis de los datos, recogidos por el propio vehículo, y recopilados por telemetría durante los ensayos, observando la enorme importancia que tiene, al igual que en los sistemas de posicionamiento GNSS, la posición y distancia relativa del vehículo a las balizas, en la precisión de la solución de posición obtenida por este. Por último, se realiza la discusión de todos los resultados de los ensayos en vuelo y se propone el trabajo futuro para mejorar el sistema, y extenderlo a ambientes no estructurados.

Palabras clave

Drones, navegación GPS denegado, *Ultra Wide Band*, *Extended Kalman Filter*.

1. Introducción

1.1. UAV

Los vehículos aéreos no tripulados UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) se pueden definir como vehículos que son o bien gobernados remotamente, mediante un operador o bien que se gobiernan de forma autónoma. Para poder pilotarse de forma autónoma estos están generalmente provistos de un sistema automático compuesto por tres subsistemas básicos de guiado, navegación y control (GNC). El módulo de guiado combina el estado actual con el estado deseado para obtener las maniobras necesarias para que el vehículo pase de estado actual al deseado. El módulo de navegación es, por su parte, el encargado de determinar el estado actual del vehículo. El módulo de control se encarga de efectuar las acciones pertinentes para modificar la actitud y controlar la trayectoria de vuelo según el estado relativo del vehículo y el de referencia. Se trata del módulo de navegación en el cual se centra este proyecto. Estas tareas se desarrollan total o parcialmente en el interior del vehículo mediante un módulo de gestión de datos con la capacidad de procesamiento necesaria gracias a un cierto *software*.

Actualmente la mayoría de las aplicaciones pasan por el empleo de fotografía aérea con diversos fines [3], pero se pueden equipar dichos vehículos con infinidad de sensores como cámaras de alta definición, multiespectrales, láser, relés de comunicaciones [2].

1.2. Navegación sin GNSS

La navegación en entornos de GNSS denegado se ocupa de la navegación en zonas dónde la recepción del GNSS no existe. Los sistemas globales de navegación por satélite, por ejemplo, generalmente no son adecuados para determinar la ubicación en interiores [5]. Aunque esta problemática puede ser extendida a cualquier situación en la que no se tengan satélites GNSS a la vista.

Por otro lado, las reflexiones múltiples en superficies es un factor para tener en cuenta ya que causan propagación de múltiples errores incontrolables. Cabe decir que estas reflexiones están degradando todas las soluciones conocidas para la localización en interiores que utiliza ondas electromagnéticas. Hay diversos estudios sobre que el tema aplicándose un conjunto de métodos físicos y matemáticos con el fin de intentar solucionar este problema. Por lo tanto, surge la necesidad de encontrar métodos y tecnologías especializados para sistemas de localización en entornos de GNSS denegado (GDNS, o «GNSS *Denied Navigation System*»).

La solución que se aborda en este trabajo pasa por la corrección del error de posicionamiento mediante el uso de fuentes alternativas de información de navegación, como la unidad de medida inercial (IMU) y sensores de ultrasonidos. La fusión de los datos provenientes de estas fuentes, que además poseen diferentes principios físicos, realiza con un algoritmo del tipo «*Extended Kalman Filter*» (EKF), aumentando la precisión, solidez y fiabilidad del sistema.

1.3. Solución propuesta y organización del documento

El presente documento se estructura de la siguiente manera, en el apartado *desarrollo* se recoge un análisis más o menos exhaustivo sobre las tecnologías UWB y su aplicación al posicionamiento, junto con una descripción del sistema compuesto (tanto segmento tierra como segmento aire), mientras que en el apartado *resultados*, se detallan las pruebas propuestas, y se enlazan los vídeos de estas. Por último, se presentan las *conclusiones*.

2. Desarrollo

2.1. Introducción a la tecnología UWB

Las tecnologías *WiFi* y *Bluetooth* están centradas en una frecuencia de 2,4GHz con un ancho de banda pequeño para poder emitir con gran potencia, permitiendo aumentar la distancia de llegada de la señal. *UltraWideBand* se define como cualquier transmisión radio que ocupe un ancho de banda mayor al 25 % de la frecuencia central o más de 1,5Ghz. La característica que constituye una ruptura con todas las tecnologías anteriores es que la señal UWB está diseñada para ocupar bandas de frecuencia asignadas a otros servicios sin causar interferencias sostenibles. Esto es posible porque los sistemas UWB emiten a una potencia muy baja que, repartida por un ancho de banda tan grande, produce una densidad espectral de potencia de pocos mW/MHz. Estos niveles de señal son comparables a los niveles de ruido que soportan los receptores de otros sistemas. Se podría decir que la estrategia de UWB consiste en repartir su capacidad de interferencia entre todos los demás servicios y, por tanto, interfiriendo muy poco a cada uno de ellos. Esto dificulta su adaptación a aplicaciones de largo alcance, y por tanto UWB está concebido en general para comunicaciones de corto alcance, principalmente para dar servicio en interiores. En estos entornos la propagación de las reflexiones es un problema importante, ya que la señal rebota en muchos objetos antes de llegar al receptor [10].

Tipo de IPS	Precisión aproximada	Coste para usuario	Coste de instalación	Ventajas	Inconvenientes
Infrarrojos	50cm - 2m	Alto	Bajo	Barato para el usuario.	Interferencias con la luz solar.
VLC	10 cm	Alto	Bajo	Barato para el usuario. No instrusivo.	Infraestructura muy costosa.
Ultrasonidos	1cm-2m	Alto	Alto	Buena preción para bajas cotas.	Coste.
WiFi	2m	Bajo	Bajo	Bajo coste, aprovecharmiento de la infraestructura.	Sistema vulnerable.Necesidad de base de datos.
Bluetooth	30cm-5m	Bajo	Bajo	Bajo coste para la precisión conseguida.	Baja precisión.Necesidad de base de datos.
UWB	10cm	Alto	Alto	Alta precisión.	Alto coste.
Visión artificial	1cm-1m	Bajo	Bajo	Bajo. El cálculo se desarrolla en el usuario.	Sensible a las condiciones lumínicas.

Figura 1. Tabla comparativa con distintas tecnologías de posicionamiento.

Otro problema en ambientes interiores es que el emisor y receptor difícilmente tienen visión directa y por tanto la señal tiene que atravesar objetos para llegar a su destino. UWB utiliza las frecuencias más bajas posibles; de esta forma mejora su capacidad de penetración en materiales que tienden a ser más opacos a frecuencias altas. Esta cualidad hace a UWB apropiada para otros propósitos aparte de las co-

municaciones; tales como radares personales para detectar colisiones, sistemas de imagen que puedan ver a través de paredes, dispositivos precisos de localización. Así pues, tenemos una tecnología con dos cualidades fundamentales: gran ancho de banda y baja potencia. Estos atributos la habilitan a cohabitar con otros sistemas de telecomunicaciones reutilizando el espectro; pero también la limitan para aplicaciones de corto alcance [6].

2.2. Particularidades de UWB

Las modulaciones de amplitud o frecuencia/fase no son apropiadas para este tipo de comunicaciones por impulsos. Por este motivo la modulación más utilizada en comunicaciones UWB es PPM (*Pulse Position Modulation*). PPM es una forma de modulación temporal en la que cada símbolo de información modula la posición en tiempo de un pulso. Los sistemas PPM-UWB utilizan trenes de pulsos, no solo un único pulso, para comunicar un símbolo. El intervalo entre pulsos se controla pulso por pulso en función de 2 componentes: una componente de información y un código pseudoaleatorio. La componente pseudoaleatoria se utiliza para repartir la energía en el dominio frecuencial, habilitar el acceso multiusuario y para hacer el sistema más resistente a interferencias externas [5].

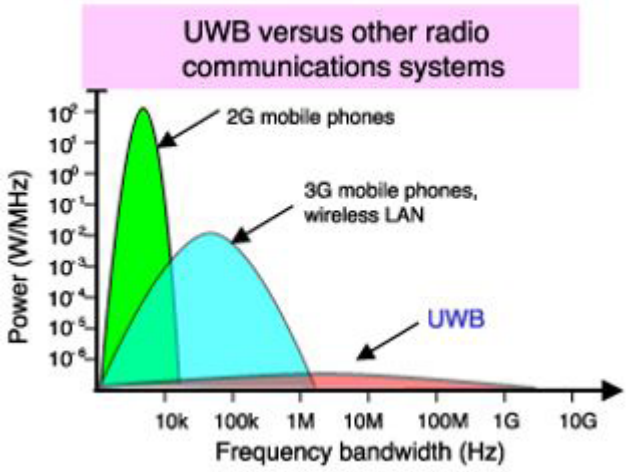


Figura 2. Potencia frente al ancho de banda de varios sistemas de comunicación RF (Fuente: [2]).

En el caso del sistema de UWB empleado el cálculo de la posición pasa por enviar ondas de radio de un módulo a otro y medir el tiempo de vuelo (TOF), el tiempo que tarda en llegar la señal. Es conocido que las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz (c = 29.979.248 m/s), si se divide el tiempo de vuelo por esta velocidad se obtiene directamente la distancia [2].

El principal problema es que a tal magnitud de velocidad en un nanosegundo se recorren casi 30 cm y para conseguir una medida con precisión centimétrica se necesitaría medir el tiempo con una precisión casi imposible con un presupuesto bajo. Además, en un pulso del orden del nanosegundo es muy difícil determinar con precisión el pico y las reflexiones provenientes de las señales que rebotan en obstáculos dentro del entorno son captadas por el receptor y pueden superponerse con el pulso emitido, lo que hace que sea muy difícil medir el pico verdadero del pulso. Con pulsos de 4ns ancho, cualquier objeto dentro de 1,2 m del receptor o del transmisor causará un pulso superpuesto. Debido a esto, el uso de *WiFi* con tiempo de vuelo no es adecuado para aplicaciones en interiores [2]. Por esto, la mayoría de los métodos basados en *Bluetooth* y *WiFi*, el posicionamiento se realiza con la metodología de la medición de las intensidades de la señal (indicador de intensidad de la señal de recepción, RSSI) en lugar del tiempo de tránsito (tiempo de vuelo, ToF).

2.3. Sistema UWB empleado

Las señales de UWB utilizadas en Pozyx tienen un ancho de banda de 500MHz dando como resultado pulsos de 0,16ns de ancho. Esta resolución de tiempo es tan fina que, en el receptor, podemos distinguir varias reflexiones de la señal. Por lo tanto, sigue siendo posible realizar mediciones precisas incluso en lugares con muchos reflectores.

Por tanto, los sistemas UWB solo pueden transmitir a muy baja potencia (la densidad del espectro de potencia debe ser inferior a -41,3dBm / MHz) para no interferir en otras comunicaciones. Esta restricción de potencia muy estricta hace que un pulso único no pueda muy lejos: en el receptor, el pulso probablemente estará por debajo del nivel de ruido. Para resolver este problema, el transmisor envía un tren de pulsos para representar un solo bit de información. En el receptor, los pulsos recibidos se acumulan y con pulsos suficientes, la potencia del «pulso acumulado» se elevará por encima del nivel de ruido y es posible la recepción [10].

2.4. Solución propuesta y comunicación con el vehículo

La solución propuesta utiliza Pozyx, un PX4 y Arducopter.

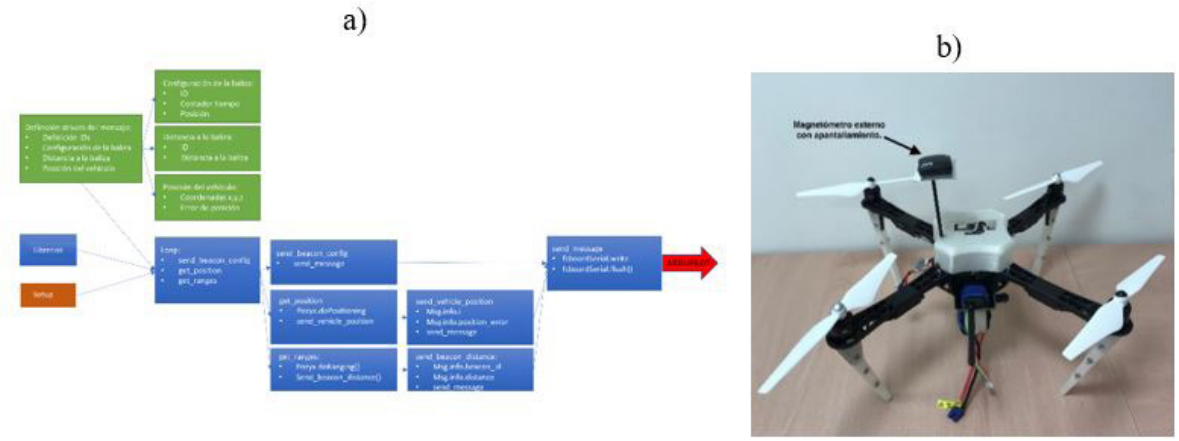


Figura 3. En a) se recoge el esquema típico de trabajo, mientras en b) RPAS utilizado.

El flujo de trabajo, recogido en las figuras 4a, se trata del siguiente:

1. Se accede los datos de la IMU de Pozyx.
2. Se envían mediante MAVLINK al autopiloto PX4.
3. Leer con cierta frecuencia los mensajes que entran por el puerto configurado y almacenarlo en el objeto principal Copter, que contiene como atributos todas las variables globales de cuadricóptero como puede ser la actitud y la posición.
4. Procesado de datos de la navegación, mediante una cascada de filtros de Kalman.

Ejecución de las acciones de control dadas las ordenes desde el subsistema de guiado.

3. Resultados y discusión

En este apartado se abarca la totalidad de los experimentos realizados con el sistema de navegación descrito anteriormente, desde el comienzo donde se realizaron experimentos iniciales de familiarización con el equipo hasta las pruebas en la zona de vuelo. Cabe destacar que en los experimentos iniciales se prueban las características base de funcionamiento del sistema Arduino y Pozyx, dichas características son las utilizadas en el diseño de la integración con el vehículo autónomo. Los ensayos realizados en la zona de vuelo se dividen según dos áreas.

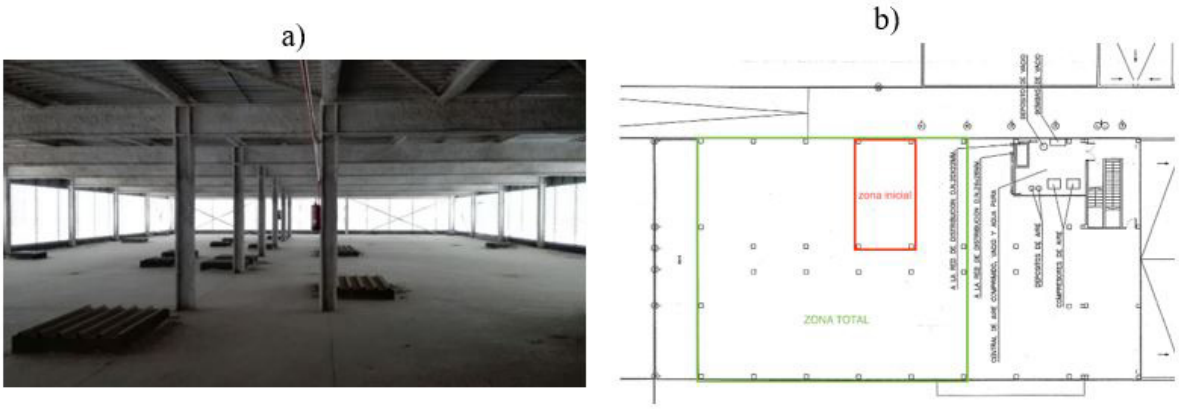


Figura 4. La figura a) es una fotografía real del lugar de vuelo. En b) se recoge el plano en planta.

Las dos zonas para tratar son las descritas anteriormente y los ensayos que se realizaron en tierra son de verificación del sistema de navegación y pruebas de cobertura.

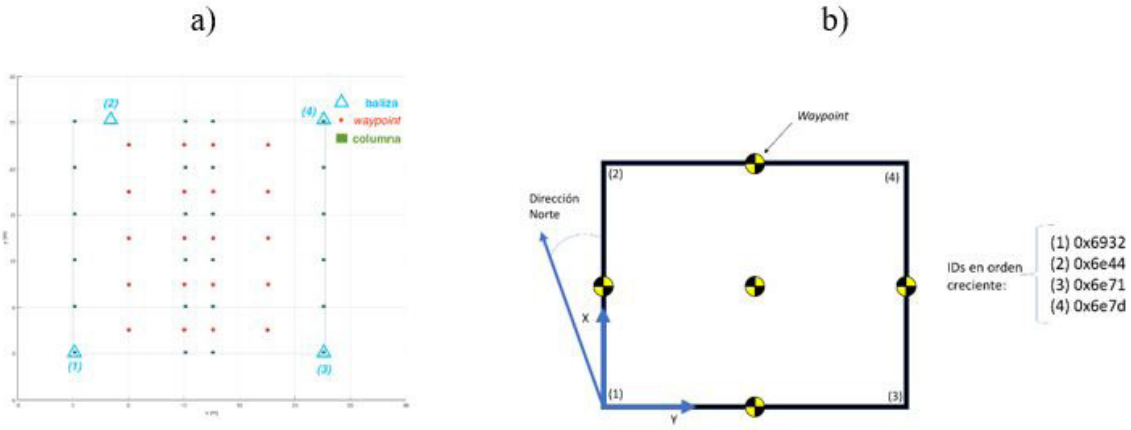


Figura 5. En 5a) se recoge un plano, a escala, de la zona de vuelo, con las balizas, waypoints y obstáculos. Por su parte 5b) es el esquema y nombre de las balizas, con su posición absoluta.

3.1. Caracterización necesaria, previa a los vuelos

En la zona reducida anteriormente descrita se llevaron a cabo la mayoría de ajustes del sistema para el vuelo. Entre ellos se encuentran todos los parámetros que calibran los sensores y ajustan los parámetros del filtro de Kalman. El procedimiento de ajuste de estos parámetros se trató de una aplicación sistemática del método de prueba y error, teniendo en cuenta cómo su modificación afecta a la medida de los sensores. En la documentación disponible en Ardupilot sobre el filtro se encuentra la descripción de cada parámetro. Estos perfiles de parámetros modificados se encuentran disponibles en el repositorio [11] mediante un archivo ejecutable por la estación de tierra. Los parámetros finales de ajuste del filtro son:

EK3_ALT_NSE	1
EK3_ABIAS_P_NSE	0,001
EK3_ACC_P_NSE	0,25
EK3_BCN_I_GTE	700
EK3_BCN_M_NSE	0,7
EK3_GLITCH_RA	10
EKT_HGT_I_GATE	300
EK3_LOG_MASK	3
EK3_POSNE_M_NSE	0,3
EK3_RNG_M_NSE	0,3
EK3_POS_I_GATE	600

Figura 6. Parámetros finales de ajuste del filtro.

3.2. Vuelos dentro de la zona reducida

Se han realizado en total cerca de 30 vuelos en la zona reducida. A continuación, se observar en la figura 7a las trayectorias seguidas (también disponible en vídeo [11]), y posteriormente se representan las medidas proporcionadas por Pozyx (7b) a la vez que las medidas de salida del filtro.

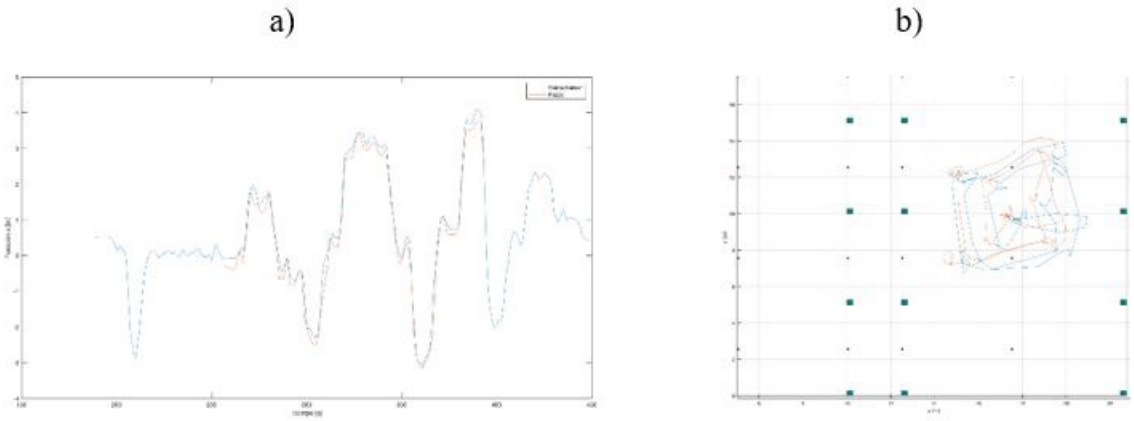


Figura 7. Pruebas previas de vuelo, en manual, de las que se extrajo la telemetría y se representó sobre el mapa realizado en Matlab.

3.3. Aterrizaje y despegue autónomo

La decisión de instalar un sensor de ultrasonidos pasa por la necesidad de realizar aterrizajes y despegues autónomos de manera segura.

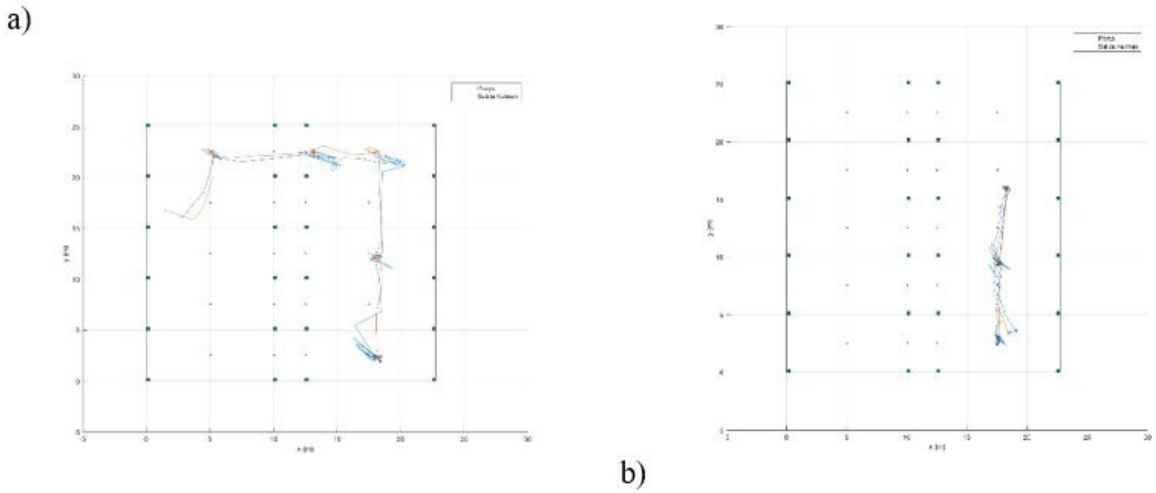


Figura 8. En ambas figuras se recoge un vuelo real, autónomo, de despegue y aterrizaje solo usando UWB (latitud y longitud), y un sensor de ultrasonidos (altura) para posicionarse.

3.4. Pruebas en la zona ampliada

En esta sección es importante señalar que durante los recorridos realizados a lo largo de la ruta descrita se experimentaron ciertas pérdidas de cobertura debidas a los obstáculos (columnas) entre las balizas.

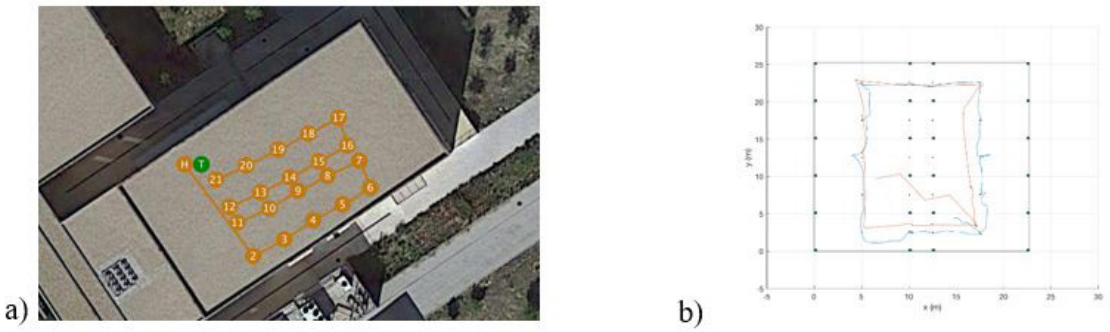


Figura 9. En 9a) tenemos los distintos Waypoints, representados sobre una imagen aérea real de la instalación. En 9b) la trayectoria extraída de dos vuelos completos, totalmente autónoma.

Se realizó un vuelo donde se le indicó una ruta al robot aéreo con tres *waypoints* para corroborar el funcionamiento en el área grande, así como el despegue y aterrizaje automático (disponible en vídeo [11]).

4. Conclusiones

La navegación en interiores basada en UWB es una posible solución si se busca una gran precisión, a cambio de cubrir menos espacio que con otras tecnologías (GNSS, debido al alcance de las balizas). Sin embargo, es dicha precisión en la navegación uno de los pilares necesarios en el desarrollo de vehículos autónomo. La tecnología UWB es una prometedora alternativa, capaz de dotar al RPAS de una *localización robusta y propia*. Debido al aumento de la capacidad de procesamiento durante los últimos años, existe ahora la posibilidad de tratar una gran cantidad de datos a bordo del vehículo autónomo en una controladora relativamente básica. Es por ello por lo que se realizan la *fusión* propuestas *entre diferentes sensores* para obtener la máxima precisión posible. Como se ha recogido en este documento, el empleo de la tecnología de UWB para corregir la posición integrada de la unidad de medida inercial de un vehículo consigue grandes resultados.

Por tanto, se ha conseguido integrar un sistema comercial, llamado Pozyx, en uno de los modelos más básicos de cuadricóptero consiguiéndose unos resultados muy prometedores. Estos resultados abren unas nuevas líneas de investigación para que se pueda seguir mejorando en este campo, como por ejemplo con un aumento de la cantidad de balizas o de calidad de los sensores embarcados se conseguirá refinar los resultados obtenidos, así como con la fusión con otros sistemas de navegación en interiores o visión artificial. Esto último *podría llegar a permitir la navegación en ambientes no estructurados, con técnicas como el SLAM.*

Referencias

1. *Lane JW, Stoll JB. Introduction to this special section: Unmanned autonomous vehicles. The Leading Edge, 2017; 36(7), 550-550.*
2. *Documentación Pozyx, https://www.pozyx.io/Documentation, 2018.*
3. *FAA unmanned aircraft systems, EE. UU., 2010.*
4. *How JP, Behihke B, Frank A, Dale D, Vian J. Real Time Indoor Autonomous Vehicle Test Environment. IEEE Control System Magazine, 2008; 28(2), 21-64.*
5. *Diaz J. Tecnología UltraWideBand (UWB): la revolución a corto alcance. Buran, 2003; 19, 52-56.*
6. *Choliz J, Eguizabal M, Hernandez-Sola A, Valdovinos A. Comparison of Algorithms for UWB Indoor Location and Tracking Systems. IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011.*
7. *Shu Y. A New Approach to Indoor Navigation. Microsoft, 2017.*

8. *Liu H, Darabi H, Banerjee P, Liu J. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). 2007, 37(6), 1067-1080.*
9. *Chantaweesomboon W, Suwatthikul C, Manatrinon S, Athikulwongse K, Kaemarungsi K. On Performance Study of UWB Real Time Locating System. 7th International Conference of Information and Communication technology for Embedded Systems (IC-ICTES), 2016.*
10. *Goyal1 V, Dhaliwal BS. UltraWideBand PAM Modulation and Reception in UWB MultiPath channel Using Rake Configurations. GESJ: Computer Science and Telecommunications, 2015; 1(45).*

Sistema de comunicación 3G/4G

García Torres, Rafael

Star Defence Logistics & Engineering, S.L.
Antigua carretera de Extremadura Km 20,800.
Código Postal: 28935 Móstoles-Madrid.
Email: rgarcia@sdle.es
* Rafael García Torres; rgarcia@sdle.es

Resumen

Sistema de comunicación aplicable a RPAS que permite establecer la comunicación desde la aeronave con la estación de control a través de las redes de telefonía.

Esto implica la recepción de vídeo en alta definición, así como la posibilidad de envío y recepción de datos entre la estación de control y el RPAS.

El concepto es usarlo como un concepto redundante añadido al sistema de comunicación por RF usado actualmente.

Palabras clave

sistema de comunicación 3G/4G para RPAS, comunicación 3G/4G RPAS, comunicación LTE para RPAS.

1. Introducción

La empresa SDLE ha desarrollado un sistema de comunicación entre la estación de control y el RPAS basado en la tecnología de 3G/4G.

El sistema se encuentra embarcado y en uso en los RPAS de la compañía, pero puede ofrecerse como módulos externos acoplables y embarcarles en RPAS de otras marcas.

Una de las mejores ventajas del sistema es la capacidad de enviar el vídeo del RPAS en alta calidad a cualquier parte del mundo y en tiempo real.

2. Desarrollo

SISTEMA

- Aeronave RPAS (drone).
- Sistema de comunicación basado en LTE:
  - Unidad aérea.
  - Unidad terrestre.
- Cámara.
- Unidad de comando y control del RPAS.
- Carga de pago.

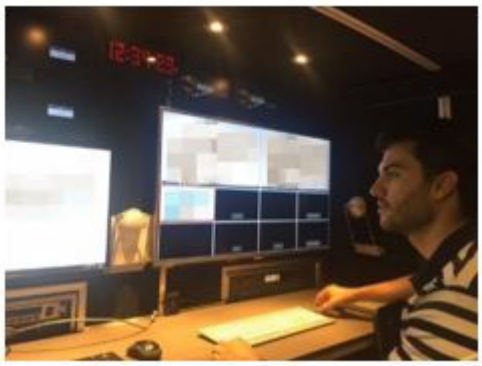
CONCEPTO

SDLE ha implementado una solución para transmisión desde RPAS en tiempo real que permite coordinar, gestionar o recibir la imagen en directo en aquellos puntos que sean necesarios, de modo simple o múltiple, con un sistema basado en transmisión a través de redes de telefonía móvil y enlaces RF. Nuestras soluciones incluyen un sistema de transmisión de bajo peso embarcado en la aeronave que se despliegue en vuelo. Gracias a nuestra tecnología, podemos hacer llegar la señal de la cámara del RPAS a cualquier receptor instalado en cualquier parte del mundo.

La transmisión se basa en IP y accede a Internet, con lo que se puede tener el contenido en tiempo real en cualquier base o sede operativa, con un *delay* (retraso) muy reducido (desde menos de 1 segundo).

BENEFICIOS

- Trasmisión de datos/vídeo en banda ancha.
- Directo.
- Alta definición.
- Codificado y cifrado de datos.
- Recepción multipunto.
- Acceso y control remoto.
- Redundancia.



SISTEMA

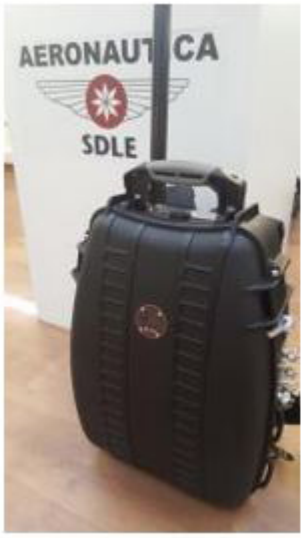
SDLE TERRACOMM UNIT

Desde la unidad de control del RPAS o estación base, podemos transmitir gracias a esta solución, la señal de vídeo de la aeronave, así como tener un monitoreado de calidad en la misma.

Esta solución puede trabajar con cualquier marca/modelo de RPAS que permita acceso a la señal de vídeo desde la consola de control. Nuestro sistema transmite esta señal a cualquier parte del mundo que tenga nuestro receptor y un acceso básico a Internet.

SDLE AIRCOMM UNIT

Con la solución SDLE AIRCOMM UNIT podemos enviar la señal de vídeo desde el RPAS, siendo una solución autónoma siempre que tenga cobertura de telefonía de redes móviles 3G/4G, además de la redundancia en tierra de la unidad TERRACOMM.



3. Resultados y discusión

Sobre la integración para diferentes unidades y la interoperabilidad del sistema para una serie de aplicaciones y misiones específicas.

4. Conclusiones

El sistema está totalmente operativo y en uso y lo consideramos de aplicación actual para ciertas unidades que pueden utilizarlo enfocado a aplicaciones concretas, incluso escenarios de entrenamiento que pueden ser visualizados en diferentes puntos establecidos, sin importar la distancia entre ellos, y en directo.

6C. Tecnologías para sistemas

Enjambre heterogéneo de drones para defensa aérea

Gómez Pérez, Ignacio[1,*], Gómez López, Miguel Angel[2] , López Otero, Juan[3] y Nieto Illescas, Alberto[4]

1 U. Politécnica de Madrid. ETSIAE. P. Cardenal Cisneros 3. ignacio.gomez@upm.es (IGP).

2 INTA. Carretera San Martin de la Vega km 10.5. gomezlma@inta.es (MGL).

3 Aurea Avionics. juan.lopez@aureaavionics.com (JLO).

4 Aurea Avionics. alberto.nieto@aureaavionics.com (ANI).

* Autor principal y responsable del trabajo.

Resumen

Los drones armados de bajo coste se han convertido en una amenaza para los ejércitos de todos los países. Aunque se está desarrollando tecnología de defensa frente a este tipo de amenazas, no son muy eficientes contra el ataque de formaciones de pequeñas aeronaves.

Se propone un sistema de defensa aérea frente a enjambres de drones de pequeño tamaño formado por otro enjambre heterogéneo de drones tipo multicóptero. Los elementos del enjambre adoptan distintos papeles en las operaciones gracias a módulos intercambiables que contienen la carga de pago.

Para dotar al sistema de inteligencia y evitar a los operadores humanos la tensión de mantener la coordinación de un enjambre como este es una situación compleja, se ha desarrollado un sistema de control basado en inteligencia artificial que automáticamente determina la configuración óptima y la estrategia de defensa más adecuada para neutralizar la amenaza. El centro del sistema es una red neuronal que ha sido entrenada para determinar la configuración más adecuada de todos los elementos.

La red neuronal se ha entrenado resolviendo miles de casos de enfrentamiento utilizando una herramienta de simulación que se ha desarrollado en MATLAB/Simulink. En dicha herramienta, para cientos de situaciones de amenaza distintas se han realizado múltiples simulaciones y se han obtenido valores agregados que se han usado para el entrenamiento del sistema.

Al final del proceso, el sistema es capaz de diseñar una configuración óptima para cada tipo de amenaza, incluso aunque dicha amenaza tenga una configuración que no ha sido estudiada previamente en simulación, debido a la capacidad de interpolación predictiva de la red neuronal. Además, este análisis de la situación se repite en tiempo real, de modo que el sistema es capaz de reconfigurarse si la situación del enfrentamiento cambia, por ejemplo, por la aparición de nuevos atacantes que no habían sido detectados previamente.

Palabras clave

Dron, defensa aérea, enjambre.

1. Descripción del problema

1.1 Los drones como amenaza

Los drones, UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) o RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) se pueden definir como vehículos que son o bien gobernados remotamente, mediante un operador o bien que se gobiernan de forma autónoma.

Casi desde su concepción, los aviones no tripulados se han utilizado en aplicaciones militares, pero la gran proliferación de tecnología para la construcción de drones de bajo coste ha facilitado enormemente su utilización por grupos terroristas. Cualquiera puede comprar en la tienda de la esquina un multicóptero por 500 €, acoplarle un dispositivo explosivo improvisado y tenerlo listo para despegar en un tiempo récord.

Drones de tipo más o menos artesanal se han empleado de forma habitual en acciones en la franja de Gaza, por el ISIS en Siria y en muchos otros sitios. Solo en Siria, el ISIS proclama haber lanzado más de 200 ataques con drones en los últimos doce meses.

Figura 1. Soldados de las fuerzas especiales inspeccionan un dron del ISIS.

Esta situación ha sido observada con preocupación por los ejércitos de todos los países occidentales y todos están desarrollando estrategias de protección y adquiriendo tecnologías anti-dron. Los sistemas tradicionales de defensa aérea no son muy efectivos contra aeronaves de pequeño tamaño que vuelan a ras del suelo, y además son ridículamente costosos frente al coste de la amenaza. En julio de 2016 un RPAS de ala fija de fabricación rusa que penetró en el espacio aéreo israelí sobrevivió al disparo de dos misiles Patriot y a un misil aire-aire lanzado desde un caza israelí. Esto implica, solo en material, más de 5 millones de dólares de coste.

1.2. Enjambres

Si la defensa frente a pequeños drones de bajo coste presenta dificultades, el problema se multiplica cuando el ataque se produce utilizando un enjambre. El enjambre puede trabajar de forma coordinada o independiente, simplemente intentando saturar las defensas. La mayoría de los sistemas antidron están pensados para repeler las amenazas de una en una y un ataque combinado puede saturarlas con cierta facilidad. Además, si los sistemas son costosos y el área a proteger es extensa, como por ejemplo, en el caso de una base aérea, resulta prohibitivo desplegar sistemas de defensa efectivos frente a un enjambre, incluso cuando los drones no trabajan colaborando entre ellos de forma coordinada.

El ataque de enjambres de drones ya no es una amenaza teórica o de ciencia ficción, en enero de 2018, el Ministerio de Defensa de la Federación Rusa informó que un enjambre de 10 drones de bajo coste armados con explosivos había atacado dos de sus bases en Siria. Según la misma fuente, algunos de los drones fueron derribados por misiles tierra-aire del sistema de defensa aérea de las bases. En la foto aparece una de las aeronaves capturadas, mostrando lo rudimentario de su construcción. Una aeronave de este tipo puede ser construida por unos pocos cientos de euros, sin necesidad de personal altamente cualificado.

Figura 2. Elemento del enjambre del ataque a las bases rusas.

El 4 de agosto de 2018 se perpetró un ataque sobre el presidente de Venezuela Nicolas Maduro. Este ataque se realizó con dos multirrotores Matrice 600 de DJI equipados con explosivos, uno de ellos explotó en pleno vuelo sin causar heridos mientras que el otro perdió el control y se estrelló contra un edificio, el cual entró en llamas momentos después debido presuntamente a la explosión de este.

En los Estados Unidos se encuentra uno de los programas de enjambres de drones más avanzados hasta la fecha, los enjambres del programa OFFSET de DARPA. Estos enjambres están formados por decenas de «Perdix Micro-dron» lanzados desde un avión F-18. Estos micro-drones no están diseñados inicialmente para ser recuperados tras la misión.

Las pruebas realizadas hasta la fecha han consistido en el desplazamiento como conjunto y dar vueltas alrededor de un punto establecido.

El Perdix Micro-dron es una aeronave de ala fija de 30 cm de envergadura alar y un peso de 290 g con una autonomía de 20 minutos, están equipados con una pequeña cámara. Su cuerpo está construido mediante impresión 3D y el precio total de cada dron es menor de 1.000 dólares.

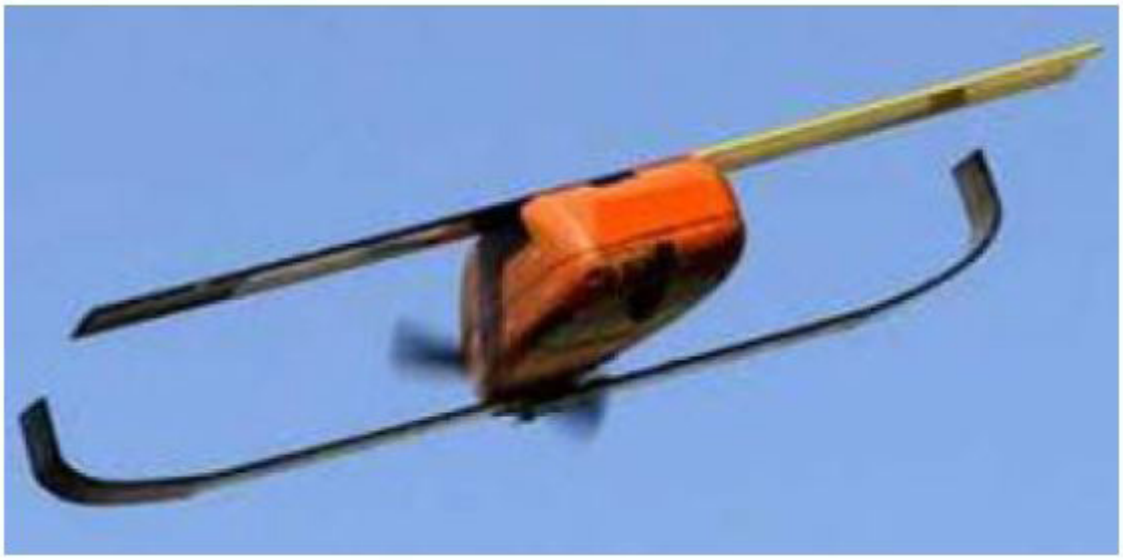


Figura 3. Perdix Micro-dron.

1.3. Sistemas anti dron

Según Holland [1], las tecnologías empleadas para la detección de drones son:

Radar	Pulsos de radiofrecuencia y algoritmos para distinguir los ecos de los drones de otros objetos que vuelan a baja altitud como aves
Radiofrecuencia	Escanean las frecuencias típicas utilizadas por los drones y las geolocalizan
Electroópticas	Detección visual en distintas frecuencias
Infrarrojas	Detección basada en la firma de temperatura
Acústica	Reconocimiento de los sónidos típicos producidos por los drones
Sensores combinados	

En cuanto a las tecnologías utilizadas para el derribo o incapacitación de los drones atacantes, están resumidas en la siguiente tabla:

RF *Jamming*	Interrumpen el enlace de comunicaciones entre la aeronave y el operador remoto. La mayoría de los drones en este caso descienden al suelo o inician el procedimiento de vuelta a casa
GNSS *Jamming*	Interrupción del sistema de posicionamiento por satélite. La mayoría de los drones en este caso se mantendrán en vuelo estacionario o intentarán una vuelta a casa
Spoofing	Toma el control de la aeronave atacante suplantando sus enlaces de comunicaciones, sobre todo con los satélites del sistema de posicionamiento
Proyectiles	Munición general o específica para el derribo de drones

Laser	Armas de alta energía
Redes	Atrapan la aeronave o desactivan sus sistemas de propulsión provocando que se estrelle
Sistemas combinados	Es frecuente que estas tecnologías se utilicen de forma combinada, por ejemplo, RF y GNSS *spoofing*

No se han incluido sistemas «exóticos» como la utilización de aves rapaces entrenadas para el derribo de las aeronaves no se han considerado. Tampoco la utilización de drones «suicidas», que se estrellan contra la aeronave atacante.

2. Descripción del sistema

2.1. Enjambre como sistema de defensa aérea

Es fácil pensar en que una posible solución para la neutralización de un enjambre de aeronaves no tripuladas es utilizar otro enjambre. La solución que proponemos es la utilización de un enjambre heterogéneo de aeronaves no tripuladas de bajo coste. Al tratarse de un enjambre, la defensa puede concentrarse en un único punto o distribuirse a lo largo del perímetro del activo a defender, dependiendo de la configuración de la amenaza. Y hacer los elementos del enjambre heterogéneos dota al sistema de una mayor flexibilidad.

El sistema propuesto consta de tres tipos de drones:

- Detectores. Disponen de sensores para la detección y clasificación de amenazas. Se encargan de mantener actualizada la información sobre la situación.
- Comunicadores. Se encargan del mantenimiento de los enlaces de comunicaciones entre los distintos elementos de enjambre y el sistema de control en tierra.
- Defensores. Disponen de armamento para el derribo o neutralización de los drones atacantes.

El sistema es modular, de modo que los drones del enjambre comparten una estructura básica idéntica, y la pertenencia de un elemento determinado a uno de los tres grupos puede modificarse mediante la sustitución de elementos modulares, básicamente, carga de pago y batería.

Además de los propios elementos del enjambre, el sistema incluye un sistema en tierra que optimiza las actuaciones de los diferentes elementos y permite a los operadores controlar el sistema completo.

El sistema analiza la situación del enfrentamiento en tiempo real para determinar la configuración, es decir el número y tipo de los drones que integran la formación defensiva y la estrategia, entre más conservadora en la que se espera a que el enjambre atacante se aproxime al punto a defender o más agresiva, en la que se ataca a la amenaza lo más rápido posible.

Una vez fijada la configuración del enjambre y la estrategia, el comportamiento de los drones del enjambre es sencillo, los del tipo atacante se dirigen al enjambre atacante hasta alcanzar la distancia operativa de su armamento, los de comunicaciones se mantienen cerca del centro de gravedad del enjambre, pero lo más lejos posible de la amenaza, y los detectores se mueven a las distancias óptimas de funcionamiento de sus sistemas de detección.

2.2. Sistema de optimización

El núcleo fundamental del sistema es una serie de algoritmos basados en técnicas de aprendizaje automático que evalúan la amenaza y establecen la configuración de enjambre más adecuada para maximizar la probabilidad de éxito. El éxito se define como una función de optimización multiobjetivo, tal y como define HUANG [2], que es configurable, de modo que se puedan parametrizar la importancia relativa de los distintos parámetros de éxito de la misión: protección del activo que se defiende, minimización de perdidas propias, maximización de perdidas enemigas, etc.

El sistema se basa en la asignación de probabilidades a las acciones posibles del sistema:

- Probabilidad de detección: es una función de la distancia del dron atacante a los drones detectores. Se incluye también la posibilidad de complementar estos drones con sistemas de detección basados en tierra.
- Probabilidad de derribo: es una función del tipo de drones implicados en el enfrentamiento y de la distancia al dron defensor.
- Probabilidad de pérdida del enlace de comunicaciones. Una función de la distancia al dron comunicador más cercano.

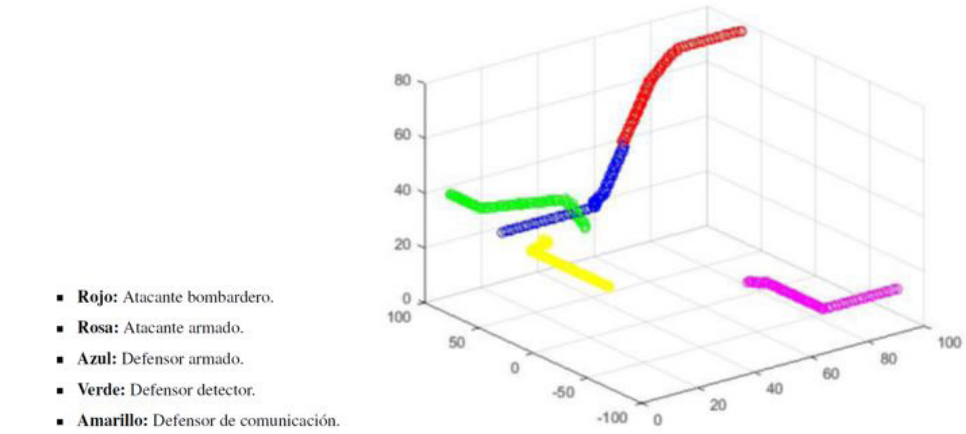
En el momento en que se detecta un atacante, se genera un vector de situación, que contiene información sobre el número, tipo y posición de las aeronaves atacantes. Este vector de situación se utiliza como entrada de una red neuronal que determina la composición óptima del enjambre de defensa y la estrategia más adecuada, entre varios niveles de agresividad en la defensa. La composición óptima es aquella que minimiza la función de costes multiobjetivo definida anteriormente.

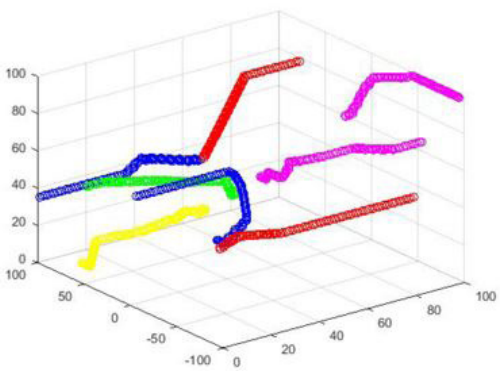
2.3. Entrenamiento de la red

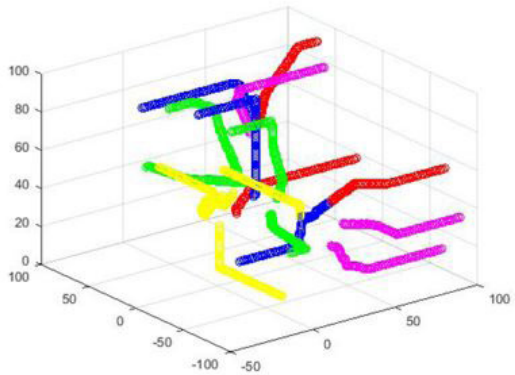
Para el entrenamiento de la red se ha construido un entorno de simulación, basado en Lin [3] y Melgar [4], utilizando Matlab/Simulink, que simula el ataque de distintas configuraciones de enjambres y para cada una de ellas, diversas configuraciones de enjambres y estrategias defensivas más o menos agresivas. Cada caso se resuelve en el entorno de simulación en tres dimensiones, utilizando las funciones de probabilidad definidas en el punto anterior.

A continuación, se muestran algunas de las simulaciones utilizadas para el entrenamiento de la red:

- **Rojo:** Atacante bombardero.
- **Rosa:** Atacante armado.
- **Azul:** Defensor armado.
- **Verde:** Defensor detector.
- **Amarillo:** Defensor de comunicación.







Cada configuración de ataque y defensa se resuelve múltiples veces calculando valores promedio para las distintas variables que se definen como resultados: cantidad y tipo de los drones derribados y supervivientes, número y tipo de los drones atacantes que consiguen llegar al objetivo, duración del enfrentamiento, etc.

Salida desde la base			
Caso	% victorias	% derrotas	tiempo medio por simulación (s)
1dc,1dd,1da,1aa,1ab	90	10	10.7825387
1dc,1dd,2da,2aa,2ab	60	40	37.9809812
4dc,4dd,3da,3aa,3ab	80	20	138.4022915
3dc,3dd,3da,3aa,3ab	40	60	85.8198392
1dc,1dd,1da,0aa,3ab	70	30	40.7967644

Tabla 1. *Resultados promedio de las simulaciones.*

3. Conclusiones

El sistema propuesto ha demostrado ser capaz de organizar el enjambre de drones para la defensa aérea de forma óptima. Es bastante evidente que la eficacia del sistema está fuertemente vinculada al realismo del sistema de simulación creado para el entrenamiento del sistema de aprendizaje automático. Y estas simulaciones se basan en un comportamiento del enjambre atacante y en unas probabilidades de los eventos involucrados (detección, destrucción, etc.) que se han fijado utilizando criterios bastante arbitrarios.

Por lo tanto, sería necesario hacer un estudio más en profundidad de las características de los distintos módulos utilizados por los elementos del enjambre de defensa aérea, y posiblemente ensayos reales para conseguir valores realistas de los parámetros de simulación para que el sistema sea realmente eficiente.

Referencias

1. *Holland, Michel A. COUNTER-DRONE SYSTEMS. 2018. Center for the Study of the Drone at Bard College.*
2. *HUANG Jie, DOU Lihua, FANG Hao, WEI Yue. Formation Control Design for Multi-Robot System with Obstacle Avoidance. 2014. Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference July 28-30, 2014, Nanjing, China.*
3. *Kuo-Chi «Kurt» Lin. SIMULATION OF A SWARM OF UNMANNED COMBAT AIR VEHICLES (UCAVS). 2004. AIR FORCE RESEARCH LABORATORY. ROME, NEW YORK.*
4. *Ignacio Melgar, Juan Fombellida, Aleksandar Jevti, Juan Seijas. Swarm architectures for Ground-based Air Defense Systems of Systems. 2009. 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2009).*

Navegación inteligente para drones. Aplicación al aterrizaje autónomo en una plataforma móvil

Acevedo, José Joaquín[1,*], García, Manuel[1] , Viguria, Antidio[1], Ramón, Pablo[2], Arrúe, Begoña C.[2] y Ollero, Anibal[2]

[1] Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales (CATEC). Wilbur y Orville Wright, 19, 41309 La Rinconada (Sevilla).

Email: jjacevedo, mgarcia, aviguria [at] catec.aero

[2] Grupo de Robótica, Visión y Control (GRVC), Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingeniería, Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092 Sevilla (Sevilla).

Email: prs, barrue, aollero [at] us.es

* José Joaquín Acevedo Báñez; correo electrónico: jjacevedo@catec.aero

Resumen

Este trabajo presenta la arquitectura en la que se implementa el sistema de navegación inteligente para la aplicación de aterrizaje autónomo sobre una plataforma móvil. Se incluye una unidad de procesamiento embarcado, en la que se han implementado los distintos comportamientos autónomos y sensores para obtener información del entorno en tiempo real. Por otra parte, en el trabajo se detalla la arquitectura SW, incluyendo las distintas funcionalidades que son necesarias para implementar el aterrizaje autónomo en una plataforma móvil. Con respecto a este sistema de visión artificial, se ha basado en técnicas *Visual-Servoing* basado en posición (PBVS), con la que se estima la posición de la plataforma de aterrizaje antes de incluirlo en el sistema de guiado y control del dron. Por último, el sistema completo se ha probado experimentalmente.

Palabras clave

UAS, drones, aterrizaje autónomo, visión por computador.

1. Introducción

El interés en los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) y particularmente en drones, ha crecido significativamente en diferentes aplicaciones tanto civiles como militares, tales como detección remota, monitorización del tráfico, rescates o vigilancia, a la vez que van surgiendo nuevos escenarios continuamente. Especialmente interesante son las funcionalidades que permiten realizar ciertas tareas de forma completamente autónoma. Una de las aplicaciones más relevantes y prometedoras es el aterrizaje autónomo de drones sobres plataformas móviles, por ejemplo sobre la cubierta de un barco.

El posicionamiento relativo entre la plataforma de aterrizaje, cuya posición es desconocida, y el vehículo aéreo es un tema de especial interés en este trabajo para el que se han estudiado diferentes técnicas. Airbus D&S desarrolló un sensor (DECKFINDER) basado en balizas de radiofrecuencia que permitía calcular la posición relativa en aplicaciones de aterrizaje. Otra tendencia considera el uso de cables entre el dron y la plataforma para la estimación de la posición relativa en base a la tensión experimentada por el cable, [1, 2]. Sin embargo, el enfoque más prometedor en operaciones de aterrizaje autónomo se basa en el uso de imágenes. Se consideran dos principales familias de técnicas: basadas en imágenes (IBVS, *Image-Based Visual Servoing*), en las que las características de las imágenes son usadas directamente por el controlador durante el aterrizaje [3]; y basadas en posición (PBVS, *Position-Based Visual Servoing*), en las que las imágenes se usan para estimar la posición objetivo antes de incluirla en la ley de control [4].

Respecto a la detección de la plataforma de aterrizaje, el uso de marcadores, como la «H» de los helipuertos [5], permite definir algoritmos más rápidos y eficientes para la detección de la plataforma de aterrizaje. Existen muchos otros patrones estandarizados que son rápidos de detectar, como por ejemplo los *April tags* [6]. Sin embargo, estas soluciones son poco robustas en los casos en que las etiquetas no estén totalmente visibles. En este trabajo se aprovecha que las características del marcador (una cruz) son invariantes a la escala y a la rotación. La estimación de la velocidad de la plataforma móvil es, también, un elemento clave que puede ayudar durante la etapa de aterrizaje. En [6] también se considera un modelo cinemático del vehículo y se usa un filtro H-infinito para la estimación de posición y velocidad.

El sistema propuesto en este trabajo fue validado y comparado durante la competición robótica MBZIRC (https://www.mbzirc.com/), en marzo de 2017, en la que participaron conjuntamente CATEC y el grupo de robótica, visión y control (GRVC) de la Universidad de Sevilla. El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 describe la plataforma *hardware* utilizada. La sección 3 presenta la arquitectura *software* general del sistema, así como la estrategia de aterrizaje implementada. La sección 4 resume el comportamiento de las principales técnicas desarrolladas. La sección 5 recopila los resultados más relevantes obtenidos y la sección 6 expone las conclusiones alcanzadas.

2. Plataforma aérea

La plataforma usada es un hexarotor de *1,18 x 1,18 x 0,5 m* de tamaño y alrededor de *6 kg* de peso, figura 1. Los sistemas embarcados en la plataforma son los siguientes:

- Autopiloto *Pixhawk.*
- Ordenador *NUC5i7RYH*: equipado con un procesador Intel Core i7 y está equipado con una memoria RAM de 16 GB. Realiza las estimaciones de posición y comanda al autopiloto.
- *Cámara estéreo ZED* como sensor visual debido a la robustez y calidad de imagen. Se ha fabricado un gimbal a medida para mantener la cámara paralela al suelo.
- Radioenlace *Ubiquiti M5* que funciona a 5,8 GHz.
- *Altímetro laser SF11C*, debido a su compatibilidad con el autopiloto Pixhawk.

Figura 1. Fotos de la plataforma de vuelo utilizada.

3. Arquitectura *software*

El *software* implementado en el ordenador de a bordo está basado en el sistema Ubuntu 14.04 y en una arquitectura ROS Indigo. La figura 2 muestra los principales nodos *software* que corren en el ordenador de a bordo y su relación entre ellos y con otros elementos del sistema.

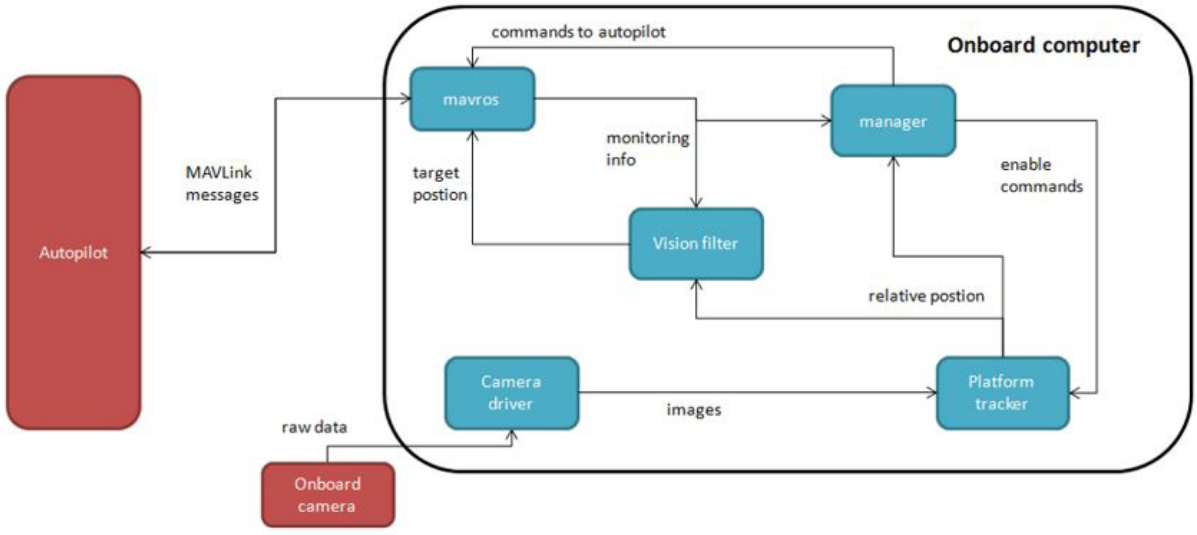


Figura 2. Arquitectura software. Interacción entre los principales nodos del sistema.

El nodo *platform tracker* detecta y calcula la posición relativa del dron con respecto al marcador en base a las imágenes provistas por *driver* de la cámara. El nodo *visión filter* se encarga de comandar externamente al autopiloto, a través de una versión levemente modificada del nodo *mavros* (https://github.com/mavlink/mavros), la posición objetivo a donde debe de volar el dron, en base a la posición relativa provista por el *platform tracker*. Finalmente, el nodo *manager* actúa como cerebro del sistema implementando la lógica de aterrizaje del sistema. La estrategia implementada por el nodo *manager* para lograr el aterrizaje se basa en la máquina de estados definida por la figura 3. La máquina de estados

ha sido implementada mediante la herramienta SMACH (http://wiki.ros.org/smach). La máquina de estados se basa en 3 fases: búsqueda (*SEARCH*), seguimiento (*TRACK*) y acercamiento (*APPROACH*). Durante el estado INIT, se carga una lista predefinida de posiciones que el dron debe de visitar para realizar la búsqueda de la plataforma de aterrizaje. Se arma el dron, se realiza el despegue y el modo de vuelo es cambiado a AUTO.

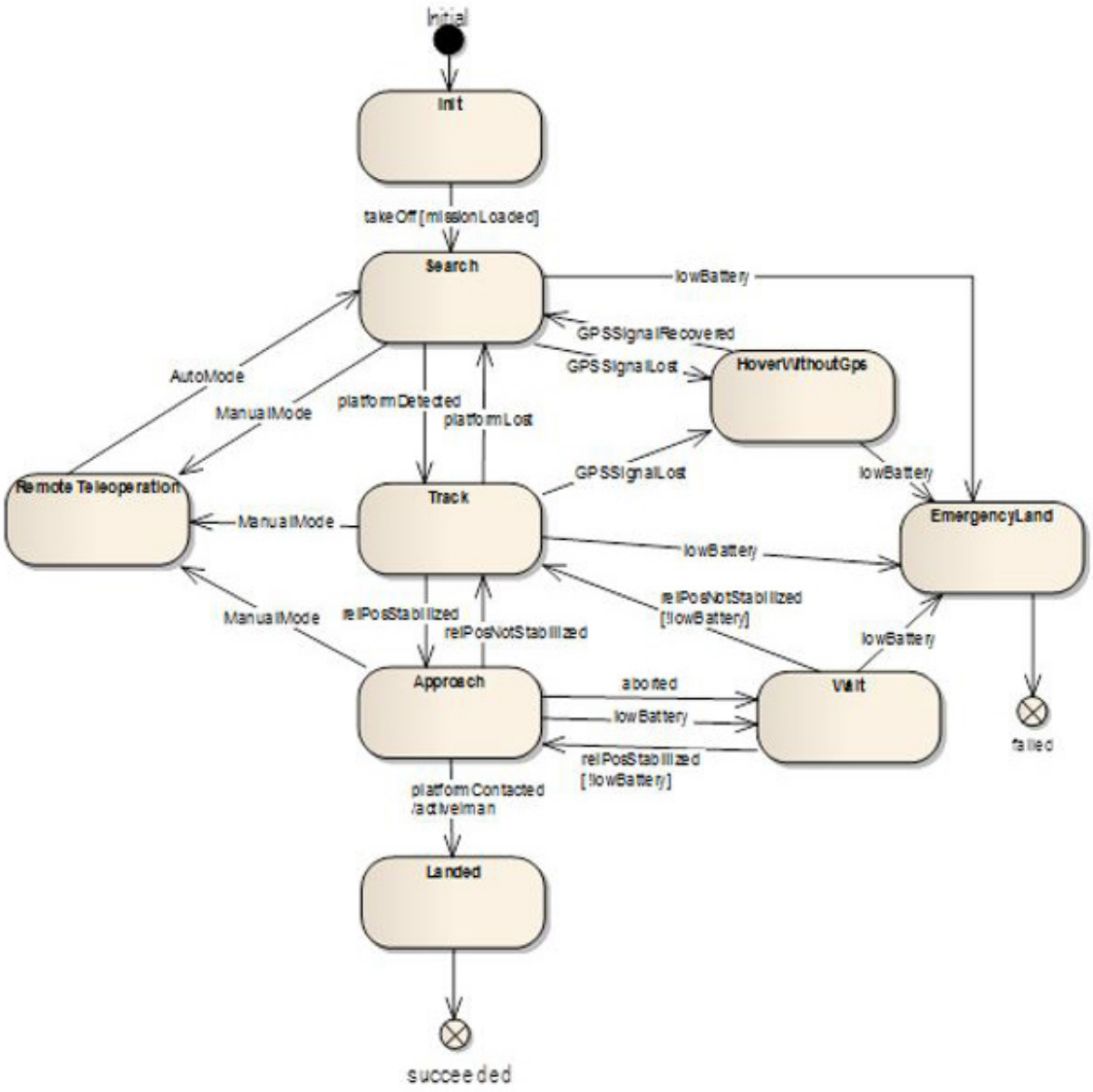


Figura 3. Máquina de estados que maneja el aterrizaje autónomo.

En el estado *SEARCH*, el dron funciona en modo AUTO visitando la lista de posiciones cargadas, mientras funciona el nodo *platform tracker*. Una vez el *platform tracker* detecta el marcador de aterrizaje, el sistema entra en el estado *TRACK*. En este estado el modo de vuelo cambia *GUIDED* y el *visión filter* comienza a comandar la posición objetivo al autopiloto, en base a la posición relativa recibida del *platform tracker* pero manteniendo una altura fija. Finalmente, cuando la posición relativa es lo suficientemente estable y fiable y el dron está lo suficientemente cerca, se entra en el estado *APPROACH* y se inicia el descenso (se va comandando una altura cada vez menor) hasta que se produce el aterrizaje.

4. Algoritmos de detección y estimación

El nodo *platform tracker* implementa dos algoritmos de detección y seguimiento visual de la marca de aterrizaje (una cruz encerrada en un cuadrado), dependiendo de la altura.

a) Algoritmo de detección a alta altitud

Se ejecuta cuando el dron está a una altura superior a los 3,5 metros y se basa en la detección del marcador completo. Este algoritmo incluye la detección del cuadrado exterior para seleccionar los posibles candidatos y la detección de la cruz interior para confirmar el candidato. El proceso se resume de la siguiente manera:

1. Pre-procesamiento de la imagen. Esto incluye un desenfoque gaussiano para eliminar ruido y suavizar la imagen y el binarizado de la imagen resultante.
2. Detección de polígonos. Se usa el algoritmo de Canny [7] y el algoritmo de Douglas-Peucker [8], y se queda solo con los cuadriláteros.
3. Análisis de polígonos. En este paso se calcula una puntuación para cada uno de los cuadriláteros en base al tamaño y al paralelismo de cada par de líneas opuestas.
4. Detección de la cruz. Se usa un detector de Hough [9] para detectar líneas pero solo dentro de los cuadriláteros candidatos. El seno del ángulo entre las dos líneas de la cruz se añade como puntuación de los candidatos.
5. Selección del mejor candidato, según la suma ponderada de las puntuaciones calculadas.

Adicionalmente se ha implementado la técnica *self-updating tracking window* [10] que mejora el rendimiento del algoritmo, analizando solo la parte de la imagen donde puede estimarse que está el objetivo.

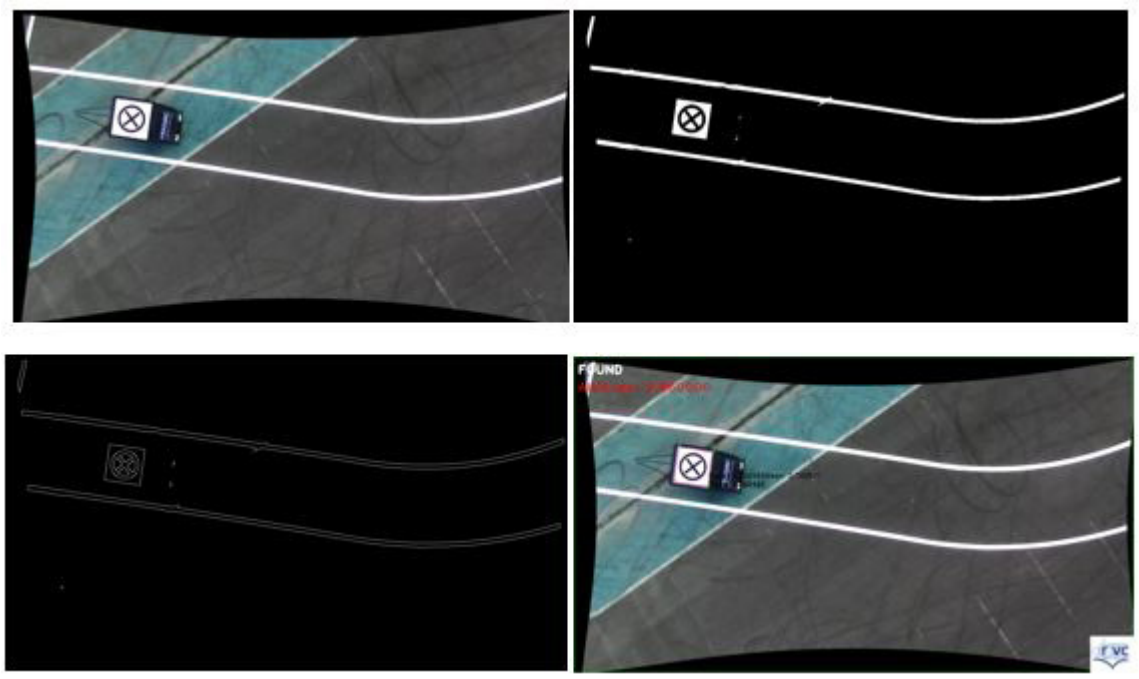


Figura 4. Ejemplo de procesado de una imagen mediante el algoritmo propuesto. De izquierda a derecha y de arriba abajo: imagen original, preprocesamiento, algoritmo de Canny e imagen final.

b Algoritmos de detección a baja altitud

Este algoritmo se ejecuta cuando el dron vuela a alturas inferiores a 3,5 metros. En estas circunstancias es posible que no pueda verse el cuadrilátero completo o incluso, ni siquiera, la cruz completa. Por ello, el algoritmo desarrollado en este caso se basa en la detección de fracciones de la marca central (la cruz).

Figura 5. Ejemplos de plantillas generadas.

El algoritmo realiza el procesamiento de la imagen y entonces implementa la técnica de comparación de plantillas [11] del centro de la cruz y fracciones de la cruz en diferentes orientaciones. Se estima el tamaño de la cruz en base a la altura del dron y a partir de ahí se generan plantillas de la cruz con diferentes orientaciones, figura 6. Finalmente, se elige el centro de la cruz en base a la suma del cuadrado de las diferencias entre la imagen real y las plantillas, siempre que esta esté por debajo del umbral definido. Para agilizar el proceso, este es paralelizado usando OpenMP [12].

c) Estimación y predicción de la posición de la plataforma

El *platform tracker* es fuente de datos para el *visión filter* que es el nodo encargado de comandar al autopiloto a través del nodo *mavros*. El pixel centroide del marcador en la cámara se fusiona con la altitud estimada para triangular la posición 3D de la plataforma de aterrizaje. En relación a la altura, el dron dispone de dos fuentes: el altímetro laser y el barómetro. El *visión filter* usa esta posición y su propia posición para estimar la posición de la plataforma móvil. En primer lugar, se aplica un filtro paso-baja a las posiciones calculadas por el sistema de visión para eliminar ruido. Esa posición filtrada, que es relativa con respecto al dron, es sumada a la propia posición de dron para calcular la posición absoluta de la plataforma. Mediante el cálculo de rectas de regresión lineal se estima el vector velocidad de la plataforma móvil.

$$\vec{v} = (v_x, v_y) = \begin{cases} v_x = \dfrac{\Delta x_i^*}{\Delta t_i^*} = \dfrac{N\sum_{i=1}^{N}(x_i\Delta t_i) - (\sum_{i=1}^{N} x_i \sum_{i=1}^{N}\Delta t_i)}{N\sum_{i=1}^{N}\Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^{N}\Delta t_i \sum_{i=1}^{N}\Delta t_i)} \\ v_y = \dfrac{\Delta y_i^*}{\Delta t_i^*} = \dfrac{N\sum_{i=1}^{N}(y_i\Delta t_i) - (\sum_{i=1}^{N} y_i \sum_{i=1}^{N}\Delta t_i)}{N\sum_{i=1}^{N}\Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^{N}\Delta t_i \sum_{i=1}^{N}\Delta t_i)} \end{cases}$$

Finalmente, el *visión filter* predice y comanda la posición donde va a estar la plataforma de aterrizaje, en base a la posición y velocidad estimada del mismo.

5. Resultados experimentales

El sistema ha sido probado mediante múltiples experimentos, incluyendo la participación en la competición robótica internacional MBZIRC en Abu Dhabi (EAU).

En primer lugar, para validar el sistema de detección y su precisión montado en el dron, se instaló un receptor GPS en la plataforma móvil. Estas pruebas sirven para validar cualitativamente el sistema, ya que el sistema GPS no es suficientemente preciso (0,5 a 1 metro). La figura 7 muestra un error del sistema de visión inferior a la precisión del GPS.

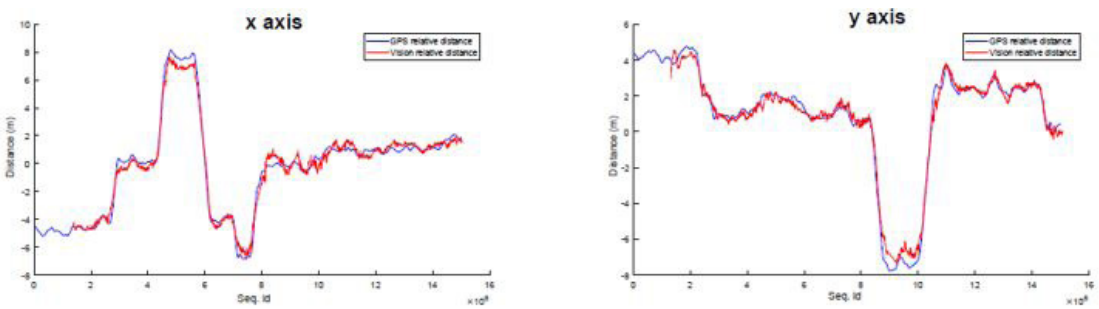


Figura 6. Comparación entre resultados de distancia relativa calculada mediante GPS y mediante el algoritmo de visión propuesto en un experimento.

En relación al coste computacional asociado a los algoritmos usados, la tabla 1 resume el coste computacional medio del algoritmo de detección a alta altitud calculada durante la competición MBZIRC. Cabe destacar que el coste computacional desciende drásticamente cuando actúa el *self-updating tracking window*. Por otra parte, la tabla 2 resume el coste computacional del algoritmo de detección a baja altura, dependiendo de la resolución de imagen utilizada.

Se realizaron una gran cantidad de experimentos, aterrizando sobre un coche equipado con una plataforma de aterrizaje y moviéndose entre 5 y 10 km/h. No se registraron accidentes, demostrando ser un sistema seguro en el que el dron era capaz de recuperarse en los casos en los que no era posible realizar el aterrizaje. Sin embargo, la dinámica de un dron tan pesado como el utilizado impidió a este moverse con más agilidad y aterrizar a mayores velocidades.

Self-updating tracking window	**No**	**Sí**
Desenfoque gaussiano	8,43 ms	0,5 ms
Binarización	4,57 ms	0,3 ms
Detección de contornos y análisis de polígonos	6,65 ms	6,29 ms
Detección de cruz y validación	6,58 ms	6,42 ms

Tabla 1. Tiempo computacional obtenido en las distintas fases del algoritmo, usando imágenes de resolución 1280x720

Resolución	**Generación de plantillas**	**Pre-procesado**	**Comparación de plantillas**		
			10º (36 plantillas)	**40º (9 plantillas)**	**72º (5 plantillas)**
640x480	0,066	0,98	4231	2812	2402
480x360	0,070	0,78	1906	1309	841
240x160	0,057	0,15	830	**211**	155

Tabla 2. Coste computacional medio (ms) para el algoritmo de detección a baja altura, según la resolución de la imagen y el ángulo

Finalmente, el equipo formado por CATEC y el GRVC participó con el sistema propuesto en la competición internacional MBZIRC, siendo uno de los únicos 5 equipos en conseguir un aterrizaje totalmente autónomo sobre la plataforma en moviento. La figura 9 muestra la posición relativa calculada por el sistema durante el aterrizaje, así como la altura del dron (https://www.youtube.com/watch?v=EsqRXr-FcaS4, desde el tiempo 1:19:45).

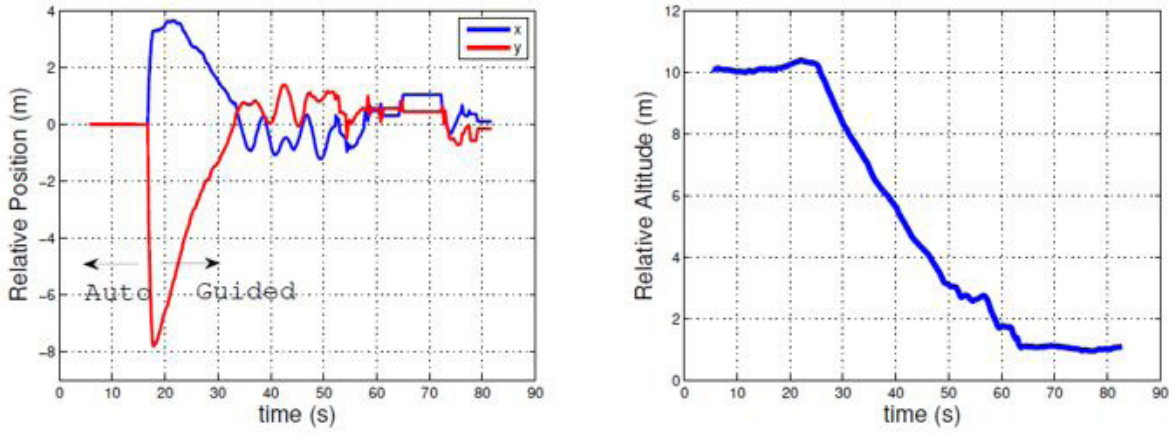


Figura 7. Posición relativa entre dron y plataforma móvil durante el aterrizaje en la competición internacional MBZIRC. Mientras no se ha detectado el marcador, la posición relativa es 0.

6. Conclusiones

El sistema propuesto ha demostrado ser fiable y robusto desde el punto de vista de la seguridad. Se han realizado un gran set de experimentos sin registrar accidentes. Además, muchos de estos experimentos terminaron por completar su aterrizaje sobre coches moviéndose a velocidades inferiores a 10 km/h. Los próximos desarrollos deben ir encaminados a mejorar la robustez en aterrizajes sobre plataformas moviéndose a altas velocidades.

CATEC y GRVC participaron conjuntamente en la competición robótica internacional MBZIRC 2017, en el que uno de los objetivos era el aterrizaje autónomo de un dron sobre un coche en movimiento, siendo uno de los cinco equipos que consiguieron el reto. Lo más interesante del sistema propuesto, en relación al propuesto por otros participantes, es que este es un sistema más genérico e independiente del escenario. No considera una trayectoria conocida, ni un perfil de velocidades previo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte ofrecido por CATEC y por el GRVC para la realización de este trabajo. El trabajo de José Joaquín Acevedo ha sido parcialmente soportado por el proyecto SAVIRA (PTQ-14-07083) en el marco del programa Torres Quevedo de ayuda a la contratación de doctores.

Referencias

1. *Ahmed, B., Pota, H.R., Backstepping-based landing control of a ruav using tether incorporating flapping correction dynamics. American Control Conference, pp. 2728-2733, June 2008.*
2. *Sandino, L.A., Santamaría, D., Bejar, M., Viguria, A., Kondak, K., Ollero, A., Tether-guided landing of unmanned helicopters without gps sensors. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp- 3096-3101, May 2014.*
3. *Chaumette, F., Hutchinson, S., Visual servo control II: advanced approaches [tutorial]. IEEE Robotics Automation Magazine 14(1), 109-118, March 2007.*
4. *Sanchez-Lopez, J.L., Pestana, J., Saripalli, S., Campoy, P., An approach toward visual autonomous ship board landing of a vtol uav. Journal of Intelligent & Robotic Systems 74(1), 113-127 2014,* http://dx.doi.org/10.1007/s10846-013-9926-3*, 2014.*
5. *Jung, Y., Lee, D., and Bang, H., Close-range vision navigation and guidance for rotary uav autonomous landing. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pages 342-347, 2015.*
6. *Araar, O., Aouf, N., and Vitanov, I., Vision based autonomous landing of multirotor uav on moving platform. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 85(2):369-384, 2017.*
7. *Canny, J., A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, (6):679-698, 1986.*
8. *Peucker, T. K. and Douglas, D. H., Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. Computer Graphics and image processing, 4(4):375-387, 1975.*
9. *Jain, A. K., Fundamentals of Digital Image Processing. Prentice-Hall, Inc, 1989.*
10. *Qian, H., Mao, Y., Geng, J., and Wang, Z, Object tracking with self-updating tracking window. In Yang, C. C., Zeng, D., Chau, M., Chang, K., Yang, Q., Cheng, X., Wang, J., Wang, F.-Y., and Chen, H., editors, Intelligence and Security Informatics, pages 82{93, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2007.*
11. *Brunelli, R., Template matching techniques in computer vision: theory and practice. John Wiley & Sons, 2009.*
12. *Chapman, B., Jost, G., and Pas, R. v. d., Using OpenMP: Portable Shared Memory Parallel Programming (Scientific and Engineering Computation). The MIT Press, 2007.*

Ethernet determinista (TSN) y plataformas reconfigurables (FPGA) en dispositivos de *Edge-Computing* rugerizados

Astarloa Cuéllar, Armando[1,*]; Uribe Echeverri, Daniel[1]

[1] System-on-Chip engineering S.L. (SoC-e). Edificio Udondo, planta 6.ª. Ribera de Axpe n.º50. 48950 Erandio, SPAIN. Correo electrónico: armando.astarloa@soc-e.com, daniel.uribe@soc-e.com

Resumen

La integración de redes de operación con requisitos de tiempo real (*Operational Technologies* –OT–) con redes de intercambio de datos generalistas (*Information Technologies* –IT–), es una realidad en los nuevos equipos e infraestructuras militares. La tecnología Ethernet es el estándar de comunicación del mundo IT. Sin embargo, su aplicación a redes OT parcial y dominada por soluciones propietarias no interoperables. Recientemente, se ha acelerado un proceso de normalización que afecta a un conjunto de estándares denominado *Time-Sensitive Networking* (TSN). Esta solución interoperable de Ethernet determinista permite trabajar en una única red con tráfico con estrictos requisitos de tiempo real (*Scheduled Traffic*), tráfico de tiempo real menos crítico al que se le puede asignar un determinado porcentaje de ancho de banda (*Reserved Traffic*) y el tráfico general (*Best-Effort traffic*). TSN facilita tanto al integrador como al usuario final la ingeniería, el mantenimiento y la operación de los sistemas. Sin embargo, esta «simplicidad» está sustentada por avanzadas tecnologías de sincronización, de conmutación de paquetes y de *software*. La industria del sector está implementando estas soluciones en equipos rugerizados que integran plataformas reconfigurables. Estos circuitos integrados tienen una sección estática con CPU *multi-core* y una sección FPGA donde se integran IP *cores* para implementar procesamientos específicos que demanden procesamiento *hardware* tales como TSN. La flexibilidad, el empoderamiento del cliente final con el contenido de los circuitos integrados y los largos tiempos de mantenimiento en el mercado de estas plataformas están ofreciendo las garantías requeridas en los programas militares. En esta comunicación presenta una arquitectura para computación distribuida con TSN implementada en una plataforma reconfigurable integrada en un equipo *rugerizado* de diseño y fabricación nacional. De igual forma, la sección FPGA está compuesta por IP *cores* para TSN e IEEE 1588 de tecnología nacional.

Palabras clave

TSN, Ethernet determinista, FPGA, *rugged equipment*, IEEE 1588.

1. Introducción

1.1. Ethernet

Desde que Ethernet [8] fue estandarizado en 1983, este ha evolucionado desde el punto de vista técnico y de aplicación. Su uso original orientado a redes de ordenadores locales se ha extendido a otros sectores hasta convertirse en el estándar de facto para los buses de campo en la industria (Profinet, Ethernet IP, Ethercat, Sercos III, etc.), en el sector eléctrico (Ethernet de alta disponibilidad para IEC 61850 [3,7]) o en automoción [9].

El sector aeroespacio/defensa no ha sido ajeno a esta concurrencia. Los sistemas actuales hacen uso masivo de Ethernet convencional, buses de campo, Ethernet combinado con sincronización avanzada, Ethernet de alta disponibilidad, y más recientemente, de Ethernet determinista (AFDX [6], TSN[10]).

La gran diversidad de soluciones propietarias basadas en Ethernet que han surgido en estas décadas han solucionado una de las carencias claves de Ethernet en su modo convencional: la falta de soporte de comunicaciones en tiempo real. Como resultado de esta falta de interoperabilidad entre soluciones de distintos fabricantes, se ha implementado soluciones cerradas en las que el comportamiento determinista se ha solventado.

Sin embargo, el aumento de la digitalización de los sistemas requiere de un mayor grado de intercomunicación entre las redes OT, con requisitos de comunicación en tiempo real y las redes IT. Este empuje, dinamizado en el sector industrial por las iniciativas Industria 4.0, también es una realidad en el sector militar.

En ambos sectores se demandan soluciones técnicas interoperables entre diferentes fabricantes, estandarizadas y que ofrezcan unos tiempos de vida en el mercado largo. El desarrollo efectivo de estas tecnologías debería proporcionar una reducción significativa del coste de los equipos, mantenimiento, integración de servicios de análisis de datos y la dependencia sobre un fabricante específico.

En este sentido, el conjunto de estándares de IEEE definidos por Time-Sensitive Networking Task Group [10] ofrecen servicios de comunicación determinista sobre IEEE 802. Este conjunto de estándares se denomina comercialmente TSN.

1.2. Time-Sensitive Networking (TSN)

Time Sensitive Networking (TSN) es una propuesta integral para una única solución basada en Ethernet. El grupo de trabajo original AVB ha pasado a llamarse IEEE TSN Task Gorup, el cual se encuentra al cargo del desarrollo de todos los estándares relacionados con TSN.

La base fundamental sobre la que se fundamenta TSN es el denominado *Time-Aware Shaper*. Este mecanismo ha sido diseñado para separar la comunicación en la red Ethernet en ciclos repetitivos de duración fija. Estos ciclos están divididos en ventanas temporales de acuerdo a la configuración TSN que haya sido acordada por los nodos que conforman dicha red. Es posible configurar y asignar a cada ventana

temporal una o varias prioridades Ethernet de las ocho que están disponibles. Los detalles del funcionamiento del *Time-Aware Shaper* están definidos en el estándar IEEE 802.1Qbv [4].

Teniendo en cuenta esta capacidad de discriminación, se definen tres tipos fundamentales de tráfico: tráfico *Scheduled*, tráfico *Best-effort* y tráfico *Reserved*. El tráfico *Scheduled* es el apropiado para mensajes con requisitos estrictos de tiempo real, mientras que el tráfico *Best-effort* lo conforman los mensajes de propósito general que no requieren de funcionalidades de calidad de servicio adicionales a las de Ethernet estándar. Los mensajes alojados en diferentes ventanas temporales con una reserva de ancho de banda establecida para cada tipo de prioridad se consideran tráfico *Reserved*. Esta capacidad de reserva específica de ancho de banda es de gran utilidad para información con requisitos *soft* de tiempo real, como por ejemplo vídeo. La figura 2 muestra las ventanas temporales dentro de cada ciclo y los diferentes tipos de tráfico.

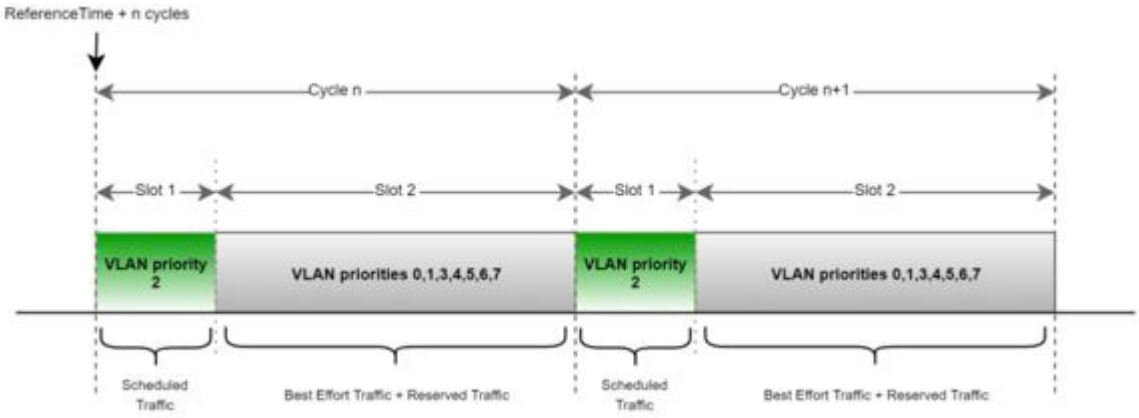


Figura 1. Distribución de la comunicación en ventanas de tiempo (Slots) en función del tipo de tráfico TSN.

El *Time-Aware Shaper* permite definir el número de ventanas temporales presentes en cada ciclo, su duración y el tipo de tráfico (basado en su prioridad) que es posible transmitir. Gracias a este modo de operación, el tráfico *Scheduled* tiene ventanas temporales dedicadas a garantizar el comportamiento determinístico de la red. El tráfico *Best-effort* se acomoda en el resto de ventanas temporales de cada ciclo de operación. Una de las mejoras más importantes de cara a la priorización y la optimización del uso del ancho de banda en TSN es el uso del *Credit Based Shaper*, tal y como se especifica en IEEE 802.1Qav [2]. Esta funcionalidad posibilita la gestión de tráfico de tipo *Reserved*, lo que aumenta la prioridad del tráfico designado, haciéndolo de mayor prioridad que el tráfico *Best-effort* y de menor prioridad en comparación con el tráfico *Scheduled*. El reto de proporcionar sincronización temporal en el rango de nanosegundos entre todos los dispositivos que conforman la red TSN es abordado mediante el uso del protocolo de sincronización IEEE 1588 [1]. Gracias a la precisión proporcionada por esta tecnología, es posible controlar el retardo introducido por la red, lo que posibilita disponer de una solución Ethernet basada en eventos temporales. El perfil específico de IEEE 1588 utilizado en TSN es el IEEE 1588ASrev [5].

1.3. FPGAs y plataformas reconfigurables

Las FPGA ofrecen flexibilidad y una elevada capacidad de computación al permitir una paralelización masiva de los algoritmos implementados. Los fabricantes de estos dispositivos ofrecen tiempos de permanencia en el mercado largos que mitiga la problemática de la obsolescencia. Adicionalmente, el modelo de definición del procesamiento *hardware* mediante IP *cores* descritos en lenguajes *Hardware Defined Languages* (HDL) ofrecen al sector control total sobre la lógica implementada en los dispositivos y portabilidad de la misma a otros dispositivos.

Estos beneficios han hecho que los dispositivos reconfigurables siempre hayan tenido presencia en el sector aerospacio/defensa. En la actualidad, con la disponibilidad en el mercado de plataformas reconfigurables que integrar secciones multi-CPU junto con FPGA en los mismos dispositivos la presencia de

este tipo de soluciones en los equipos militares de última generación es masiva, destacando que más del 10 % de las FPGA vendidas actualmente son adquiridas para este tipo de aplicaciones [11].

A modo de ejemplo, las implementaciones en FPGA de algoritmos comunes en las aplicaciones del sector tales como *Target Recognition*, *Radar Signal Processing* o *3DES* ofrecen aceleraciones en el orden de 200-400 veces de los algoritmos respecto a las soluciones *software* [11].

En el caso específico de las comunicaciones de alta disponibilidad, baja latencia, combinadas con mecanismos de sincronización a nivel de nano-segundo el procesamiento *hardware* es imprescindible. Por ello, las plataformas reconfigurables ofrecen de forma única la posibilidad de integrar las computaciones DSP, de comunicaciones y la adquisición de datos a alta velocidad simplificando todo el ciclo de vida del producto: desde el diseño hasta el mantenimiento del mismo.

Uno de los elementos claves del éxito de esta tecnología es la disponibilidad de proveedores especializados de IP para integrar funcionalidades específicas en las plataformas. En el trabajo presentado en esta comunicación se han utilizado los IP de comunicación TSN y de sincronización IEEE 1588 desarrollados por la empresa SoC-e [15].

2. Arquitectura TSN multipuerto para equipamiento de Edge-Computing ruggedizado

En el bloque derecho de la figura 2 muestra el diagrama de bloques de las implementación TSN realizada en la plataforma reconfigurable Zynq Ultrascale+ MPSoC [16] integrada en el equipo *Rugged Switch* [12] también representado en dicha figura.

En la sección fija, ASIC, del circuito integrado (PS) se localizan las 6 CPU y los controladores de memoria externa y periféricos. En esta sección se integra la infraestructura necesaria para el funcionamiento del sistema: sistema operativo de 64 bits, pilas de comunicación sincronización y los servicios de configuración. Los procesos de computación propietarios del usuario final se aíslan del resto del *software* mediante el uso de *Dockers*.

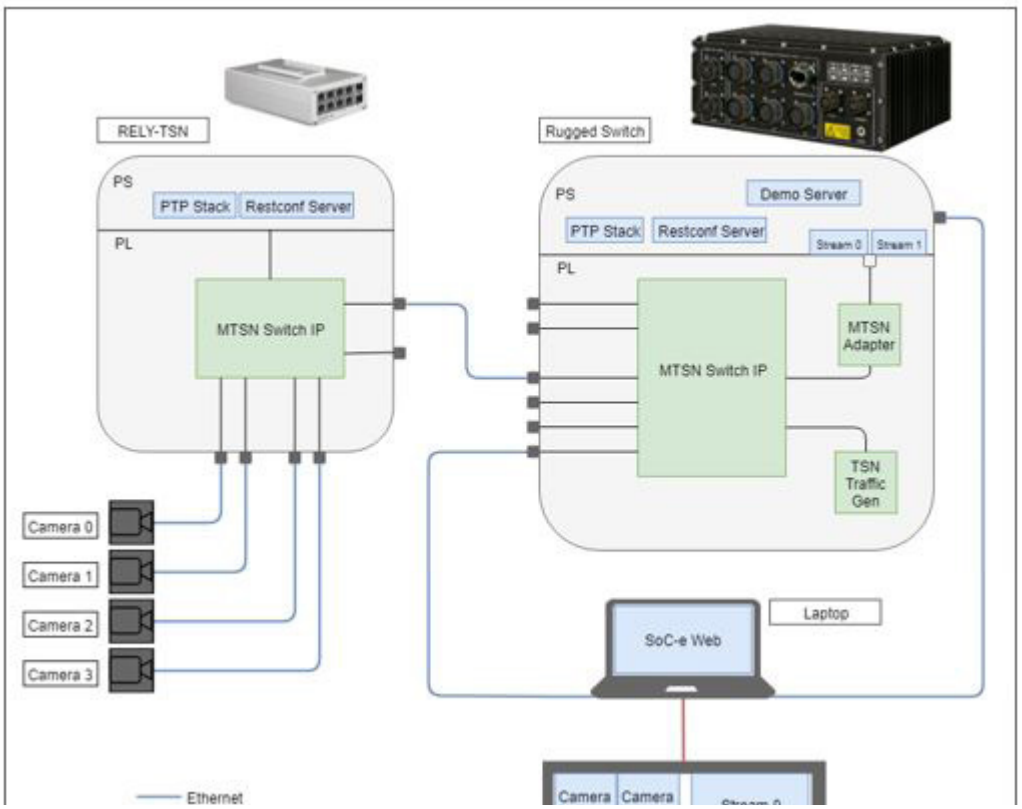


Figura 2. Diagrama de bloques de las arquitecturas TSN implementadas en la plataformas reconfigurables de los equipos RELY-TSN y RUGGED SWITCH.

En la sección FPGA, PL, se integra el IP MTSN [14] para implementar las funciones de *bridging* TSN. Esta unidad se encarga de realizar la distribución de paquetes atendiendo los mecanismos de sincronización y gestión de colas y prioridades definidos en TSN. La versión representada en el diagrama corresponde con una implementación de 8 puertos. MTSN IP soporta la generación de un bloque de *bridging* de hasta 25 puertos permitiendo la comunicación TSN en todos los puertos del *Rugged Switch* utilizado para acomodar la personalidad TSN.

La FPGA se incluye el módulo *TSN Traffic Generator*. Este IP se ha diseñado específicamente para poder generar tráfico TSN de forma controlada que se pueda experimentar sobre la red TSN de forma real. Este módulo es configurable desde la interfaz Web del equipo y permite seleccionar el tipo y la cantidad de tráfico que se desea generar. De esta forma, como se podrá verificar en la siguiente sección, se ha podido saturar la red TSN de forma controlada con el fin de verificar el comportamiento y los beneficios reales de la tecnología TSN.

La sección reconfigurable se completa con el módulo denominado *TSN Adapter*. Este IP es una versión reducida de un MTSN IP de tres puertos que dota de funcionalidad de *end-point* TSN al controlador Ethernet estándar GMAC de la sección PS. La sección PS accede a la estructura de *bridging* TSN a través de la interfaz de red */dev/eth0* asociada al controlador GMAC0 representado en el diagrama.

Como se puede observar en el bloque izquierdo de la figura 2**,** la implementación del IP en el equipo RELY-TSN es similar, pero focalizada únicamente en las funciones de *bridging* TSN.

3. Resultados de implementación y validación

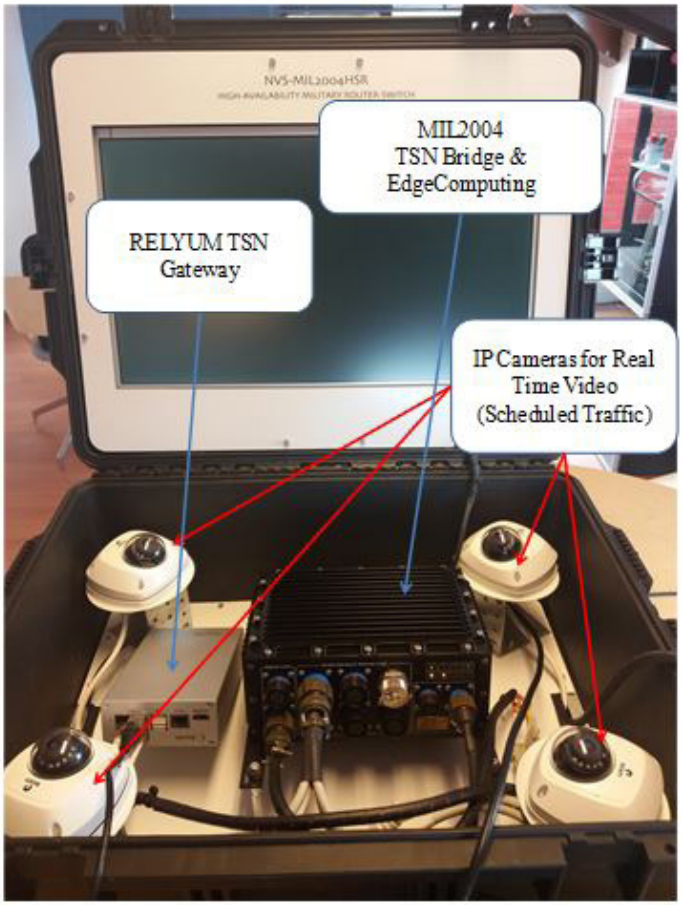


Figura 3. Setup de validación.

La configuración de equipos representados en la figura 3 muestra el *setup* construido para la validación de la tecnología desarrollada. En la parte central se sitúa *Rugged Switch* MIL2004HSR [12] certificado para aplicaciones militares de comunicación y de *Edge-computing* en equipos terrestres. A la izquierda del mismo se encuentra el equipo RELY-TSN [13].

Todos los puertos de comunicación y de computación están directamente controlados por la plataforma reconfigurable MPSoC. Esta característica arquitectural permite que para un mismo equipo rugerizado existan múltiples *personalidades* de computación. Cada *personalidad* está compuesta por una infraestructura *software* para las 6 CPU integradas en el dispositivo y una estructura *hardware* implementada en la sección FPGA del mismo. La estructura *hardware* está compuesta por una combinación de los IP *cores* de comunicaciones, sincronización y seguridad de SoC-e.

Los resultados de implementación de la arquitectura representada en bloque derecho de la figura 2 se resumen en la Tabla 13 que representa el conjunto de recursos FPGA de la plataforma reconfigurable utilizados para la implementación.

Tabla 1. Recursos de FPGA utilizados por la implementación TSN en el *Rugged Switch*

Recurso *hardware*	Utilizado	Disponible	Util (%)
CLB	14281	34260	41.68%
LUTs	71096	214604	33.13%
Flip Flop Pairs	23573	214604	10.98%
Block RAM Tile	191	714	26.75%

La conexión de los equipos en el *setup* de validación es la siguiente: el *Rugged Switch* está conectado al equipo TSN de Relyum. Las cuatro cámaras IP están conectadas al equipo de Relyum y el PC está conectado a un puerto Ethernet del *Rugged Switch*.

Mediante el ordenador es posible acceder a las cámaras IP conectadas al equipo RELY-TSN para visualizar las cámaras en tiempo real (TRÁFICO CÁMARAS). De forma simultánea, se puede acceder a dos *streaming* de vídeo pregrabado que emite el equipo rugerizado (TRAFICO STREAM Y STREAM 2). Finalmente, en el diseño de la FPGA del equipo *Rugged Switch* se ha incluido un módulo generador de tráfico (TRAFICO ADD) para poder inyectar el volumen y el tipo de tráfico deseado en la red para realizar las diferentes pruebas. Este módulo es indispensable para poder validar el comportamiento determinista y la robustez de las comunicaciones en situaciones de saturación de la red.

La secuencia y la metodología de las pruebas realizadas se ha resumido en la Tabla 14. El objetivo es poder visualizar el tráfico en tiempo real capturado por las cámaras de forma conjunta con los dos *streams* de vídeo pregrabados, incluso en situaciones de saturación de tráfico en la red.

TRÁFICO CÁMARAS se asigna al tipo de tráfico *Scheduled Traffic*, orientado a los mensajes de tiempo real estrictos. Este tipo de tráfico tiene ventanas de tráfico dedicadas, por lo tanto, al activar el mecanismo de *Time Aware Shaper*, la recepción del mismo está asegurada en tiempo y en forma.

El TRAFICO STREAM 1 Y 2 se configuran para pertenecer al tipo de tráfico *Reserved Traffic*, asignándose a ambos vídeos un % reservado del ancho de banda de las ventanas de trafico restantes. Por tanto, la visualización de los mismos será correcta en situaciones de saturación de la red únicamente cuando se active la funcionalidad *Credit Based Shaper* de la comunicación TSN.

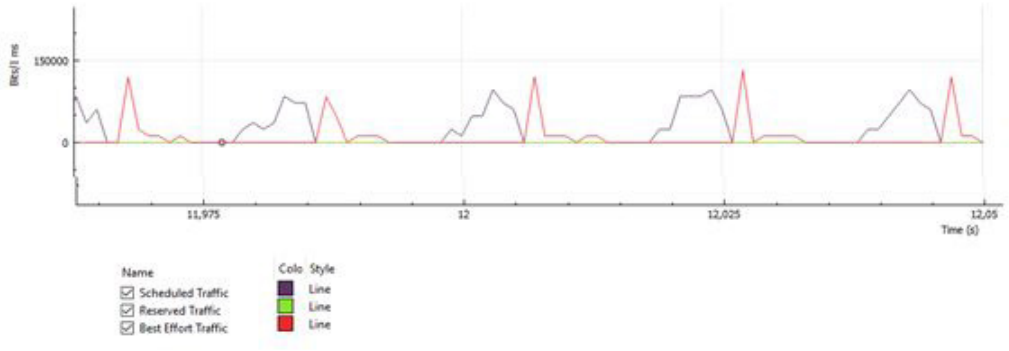


Figura 4. Visualización de los slots y del tráfico en la herramienta Wireshark Graph IO.

Tabla 14. Resumen de las pruebas de validación

Tipo de Tráfico	**TSN: Sync 802.1AS OFF TSN: *Time Aware Shaper ON* TSN: *Credit Based Shaper OFF* *TRAFICO ADD 0%***	**TSN: Sync 802.1AS ON TSN: *Time Aware Shaper ON* TSN: *Credit Based Shaper OFF* *TRAFICO ADD 0%***	**TSN: Sync 802.1AS ON TSN: *Time Aware Shaper OFF* TSN: *Credit Based Shaper OFF* TRAFICO ADD 100%**	**TSN: Sync 802.1AS ON TSN: *Time Aware Shaper ON* TSN: *Credit Based Shaper OFF* TRAFICO ADD 100%**	**TSN: Sync 802.1AS ON TSN: *Time Aware Shaper ON* TSN: *Credit Based Shaper ON* TRAFICO ADD 100%**
TRÁFICO CÁMARAS (Sch Traffic)	Deficiente	**Correcto**	Nulo	Correcto	**Correcto**
TRÁFICO STREAM (Res. Traffic)	Deficiente	**Correcto**	Nulo	Nulo	**Correcto**

4. Conclusiones

En esta comunicación se ha presentado la tecnología de Ethernet determinista estandarizada *Time-Sensitive Networking* que permite integrar en una misma red de comunicación basada en Ethernet tanto tráfico con requisitos de tiempo real como tráfico convencional. La implementación TSN desarrollada se ha integrado en una plataforma reconfigurable de última generación, orientada a cumplir los requisitos de flexibilidad, seguridad y tiempo de permanencia en el mercado exigidos en el sector. Finalmente, se ha validado la arquitectura TSN propuesta mediante la implementación en la misma en la sección FPGA de la plataforma reconfigurable. Este circuito reconfigurable se ha integrado en un equipo para comunicaciones avanzadas y *edge-computing* rugerizado de diseño y fabricación nacional. En el proceso de validación se ha podido verificar cómo TSN permite asegurar la entrega de información crítica en tiempo y en forma, incluso en situaciones de saturación de la red.

Referencias

1. *2008 IEEE 1588-2008 - IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. https://www.smartgrid.gov/document/ieee_1588_2008_ieee_standard_precision_clock_synchronization_protocol_networked_*
2. *2009 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Virtual Bridged Local Area Networks - Amendment: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams. http://www.ieee802.org/1/pag4es/802.1av.html*
3. *2013 Iec 61850 , standard for the design of electrical substation automation. http://www.iec.ch/*
4. *2016 Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks Amendment: Enhancements for Scheduled Traffic. http://www.ieee802.org/1/pages/802.1bv.html*
5. *2018 P802.1AS-Rev: Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications. https://1.ieee802.org/tsn/802-1as-rev/*
6. *ARINC Industry Activities, 2009 Arinc 664: Aircraft data network part 7 avionics full-duplex switched ethernet network. https://standards.globalspec.com/std/1283307/arinc-664-p7*

7. *IEC, 2016 IEC 62439-3:2016, Industrial communication networks: High availability automation networks Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR). http://www.iec.ch/*
8. *IEEE 802.3 ETHERNET WORKING GROUP, 2018 IEEE 802.3 ETHERNET. http://www.ieee802.org/3/*
9. *IEEE 802.3 Multi-Gig Automotive Ethernet PHY Task Force, 2018 IEEE 802.3 Multi-Gig Automotive Ethernet PHY. IEEE 802.3 Multi-Gig Automotive Ethernet PHY Task Force.*
10. *[10] IEEE Time Sensitive Networking Task Group, 2018 IEEE 802.1 Standards. http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html*
11. *Kenny, R. and B. Macking, 2007 FPGA Coprocesing Architectures for Military Applications. http://milembedded.com/pdfs/Altera.Sep07.pdf*
12. *Novatronic Sistemas S.L., 2018a High-availability Military Router-Switch. https://www.novatronic-sistemas.com*
13. *Relyum, RELY-RB TSN Version. https://www.relyum.com, 2018.*
14. *System-on-Chip engineering S.L., 2018a Multiport TSN Switch IP. http://soc-e.com/mtsn-multiport-tsnswitch-ip-core/*
15. *System-on-Chip engineering S.L., 2018b SoC-e Web Page. https://soc-e.com/*
16. *Xilinx Corp., 2018 Zynq UltraScale+ MPSoC Product Advantages. https://www.xilinx.com/products/silicondevices/soc/zynq-ultrascale-mpsoc.html*

6D. Simulación para adiestramiento y CD&E

PREDECIBLE - Sistema de analítica PREdictiva para DEfensa en el CIberespacio basada en escenarios reproducibles

Sicilia, Miguel-Angel[1,*], Alarcos, Bernardo[2,*], de la Hoz, Enrique[2], Cruz-Piris, Luis[2], López-Civera, German[2], Monzón, Miguel[1], Domínguez, Daniel[1] y Herrero Santos, Carlos[3,*]

[1] Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Alcalá, Edificio Politécnico Superior, Ctra. Barcelona km. 33,6, 28871 Alcalá de Henares (Madrid). Correos electrónicos: msicilia@uah.es (MAS); miguel.monzon@edu.uah.es (MM); d.domingueza@edu.uah.es (DD).

[2] Departamento de Automática, Universidad de Alcalá, Edificio Politécnico Superior, Ctra. Barcelona km. 33,6, 28871 Alcalá de Henares (Madrid). Correos electrónicos: bernardo.alarcos@uah.es (BA); enrique.delahoz@uah.es (EH); luis.cruz@uah.es (LCP); g.lopez@uah.es (GLC).

[3] Grupo de Simulación del Mando Conjunto de Ciberdefensa (MCCD), Base de Retamares, ctra. Boadilla del Monte km. 3,4. 28223 Pozuelo de Alarcón (Madrid). Correo electrónico: cherrero@et.mde.es (CHS).

Email:

* Autores principales y responsables del trabajo; msicilia@uah.es (MAS), bernardo.alarcos@uah.es (BA) y cherrero@et.mde.es (CHS).

Resumen

El surgimiento del ciberespacio como dominio de conflicto entre naciones o medio de ataque por parte de organizaciones de diferente tipo, desde naciones a activistas individuales, plantea nuevos escenarios de identificación de amenazas y detección de ataques. Para garantizar la protección de los sistemas de información y telecomunicación (TIC) que controlan servicios esenciales y críticos, así como los encargados de sustentar el mando y control militar, es preciso que los sistemas responsables de la ciberdefensa sean capaces de detectar la materialización de una amenaza o ataque. El proyecto PREDECIBLE tiene como objetivo definir el marco y arquitectura para un sistema analítico escalable orientado a la identificación de amenazas en el entorno de ciberdefensa. Esta arquitectura está formada por un entorno de análisis (EAN), un entorno de detección y toma de datos (EDTD), y un generador de escenarios y simulación (EGES).

En este artículo se presenta la herramienta desarrollada y su correspondiente interfaz gráfica para automatizar la generación y despliegue de escenarios de simulación de ciberdefensa sobre una plataforma de virtualización. La solución propuesta ha sido validada en el contexto del proyecto a través de un demostrador, centrado en crear la infraestructura necesaria para desplegar el entorno de análisis y el entorno de detección y toma de datos sobre un escenario de pruebas. El demostrador fue probado en la plataforma de virtualización del Instituto Tecnológico de la Marañosa (ITM-INTA), estando planificado un futuro despliegue en la plataforma de Cyber Range disponible en el Mando Conjunto de Ciberdefensa.

Palabras clave

Virtualización, ciberdefensa, *Machine Learning*, *Big Data*, adiestramiento y entrenamiento.

1. Introducción

1.1. Motivación

La escasez de datos sobre ciberataques reales, por la dificultad de identificación, requiere bien complementar los conjuntos de datos disponibles o bien su generación a partir de *honeynets* (redes completas diseñadas para ser atacada y recoger información sobre los posibles atacantes). El desarrollo de esos ejercicios actualmente se realiza mayoritariamente de manera manual requiriendo un gran esfuerzo, lo que limita sus posibilidades como entorno de prueba y generación de datos e hipótesis de trabajo. La disponibilidad de este tipo de datos, aunque siempre ha tenido una gran importancia, ha cobrado mayor relevancia en los últimos años gracias a las investigaciones basadas en técnicas de *Big Data*. Existen informes [1] que indican que los retos y oportunidades para obtener valor de los datos de red en ciberdefensa están determinados por la integración de datos, su complejidad y su crecimiento.

En la literatura pueden encontrarse estudios que han utilizado hallazgos específicos para la detección de *botnets* (redes de ordenadores infectados con *malware*) basados en patrones particulares de uso [2] como consultas DNS fallidas. No obstante, estos estudios son específicos para ciertas técnicas y están dispersos en diferentes herramientas. Esto impide la realización de un análisis global de diferentes actividades que son propias de los ataques coordinados contra estados y sus infraestructuras o servicios generales.

1.2. Descripción de la arquitectura de la plataforma PREDECIBLE

La arquitectura propuesta en el proyecto está formada por los siguientes componentes: entorno de análisis (EAN), entorno de detección y toma de datos (EDTD) y generador de escenarios y simulación (EGES).

El entorno de análisis es el componente central de la arquitectura. Es un entorno analítico formado por dos subcomponentes: el repositorio integrado de información que recoge datos y los integra mediante el uso de otros componentes, y el *Data Science WorkBench*, un entorno interactivo de Data Science donde se recopilan las técnicas de detección y análisis. El entorno de detección y toma de datos incorpora los sensores o puntos de recolección de información que sirven a la detección. Por su parte, el entorno de generación de escenarios y simulación es la capa *software* encargada del despliegue de escenarios para el entrenamiento del sistema y para configurar ejercicios de ciberdefensa.

1.3. Desarrollo de la plataforma PREDECIBLE

Analítica de datos

El entorno de análisis es el encargado del diseño e implementación de los modelos predictivos que, posteriormente serán utilizados como reglas de seguridad para interceptar posibles ataques. El primer módulo que lo compone se denominada *Data Science WorkBench,* el cual une las diferentes técnicas analíticas disponibles con los datos recogidos en el repositorio integrado de datos. Este repositorio es el segundo módulo y su función es recoger todos los datos listos para analizar, que posteriormente serán

tratados por el científico de datos para entrenar los modelos predictivos. El repositorio integrado de datos está compuesto por una serie de gestores clasificados según las tareas que llevan a cabo. Estos gestores son: el de almacenamiento, del de adquisición y expurgo, y el de búsqueda y creación de registros. Un punto esencial en el entorno de análisis es uno de los métodos escogidos para la creación de los modelos. Este método es el propuesto por Veeramachaneni *et al*. en [3], conocido como AI^2. El algoritmo hace uso de técnicas de inteligencia artificial para combinar los resultados de la aplicación de modelos supervisados y no supervisados, siendo validados posteriormente por un experto.

Detección y toma de datos

El entorno de detección y toma de datos es el encargado de la recolección y agregación de datos de diversas fuentes. Los datos son leídos tras su recolección por el entorno de análisis para su procesamiento. Los datos pueden generarse tanto por fuentes externas (bases de datos de conocimiento) como internas (sistemas de seguridad tradicionales de monitorización tales como analizadores de vulnerabilidades o detectores de intrusiones). El analizador de patrones de ataque usa un modelo topológico de la red monitorizada, calculado en parte con el analizador de vulnerabilidades en modo *host discovery*, inspirado en [4] junto con el algoritmo expuesto en [5]. Este módulo permite relacionar alertas recibidas por los sistemas de detección a través de su progresión en el tiempo.

Generador de escenarios

El objetivo de este componente del sistema es el de facilitar al usuario final el diseño y gestión de escenarios para la realización de ciber ejercicios, abstrayéndoles de las tecnologías e infraestructuras de virtualización que se utilicen en la plataforma de despliegue. Sus funcionalidades y diseño se muestran en la sección 2.

2. Generador de escenarios y simulación

En esta sección se mostrará una breve revisión de investigaciones previas relacionadas con la simulación de redes en escenarios de ciberdefensa. Posteriormente, expondremos la estructura del propio generador, explicando las funcionalidades de cada uno de los módulos que lo componen. Se hará especial énfasis en la interfaz de usuario desarrollada para facilitar el uso de esta herramienta.

2.1. Revisión estado del arte

A los generadores de escenarios en el ámbito militar se les denomina *Cyber Ranges*, siendo su objetivo original la simulación de infraestructuras TIC donde el personal de defensa pueda adquirir las habilidades en ciberdefensa practicando técnicas como penetración, respuesta a ciberataques o protección de infraestructuras críticas.

La idea de tener un equipo entrenado en este tipo de técnicas se originó en Estados Unidos. Sus Fuerzas Armadas crearon en 2009 una unidad denominada USCYBERCOM. Desarrollaron una plataforma denominada Core [6] que se basa en virtualización ligera y que presenta una gran escalabilidad. Este sistema ha resultado ser muy efectivo para el entrenamiento basándose en el paradigma de la simulación cuya principal ventaja es la escalabilidad, aunque puede llegar a faltar realismo en los escenarios.

En [7] se puede ver un estudio de *Cyber Ranges* realizado por el departamento de defensa australiano en el que se hace una completa revisión de los principales *Cyber Ranges* en cada uno de los tres entornos (académico, comercial y militar), y clasificándolo por los tres paradigmas vistos (simulación, redes *overlay* y emulación). Trabajos como [8] muestran la importancia de que los integrante de los servicios de mando y control (C2) estén entrenados en este tipo de ámbitos para mejorar sus tiempos de respuesta.

En el campo educativo no militar, hay propuestas sobre qué tipo de elementos se deben tener en cuenta durante la enseñanza de ciberdefensa [9]. El generador de escenarios de ciberseguridad NEMESIS [10] fue desarrollado de forma previa a este trabajo en la Universidad de Alcalá por el Grupo de Investigación de Ingeniería de Servicios Telemáticos (GIST). En el plano militar podemos encontrar interesantes proyectos que se aplican en el campo de la verificación de herramientas [11] de ciberseguridad.

2.2. Implementación del generador

La aplicación se ha realizado utilizando como lenguaje de programación Python (versión 2.7) y el entorno de desarrollo web Django (versión 1.11). La base de datos utilizada para su despliegue ha sido PostgreSQL, aunque la definición genérica de los modelos de Django permite su despliegue en múltiples tipos de bases de datos.

Esta herramienta está dividida por un lado en el módulo de lógica del generador de escenarios (*BackEnd*) que engloba las funciones de definición, estudio de viabilidad, creación de la especificación completa y traducción del escenario, y ejecución de las órdenes a la plataforma de virtualización. Por otro lado, cuenta con la interfaz de usuario (*FrontEnd*) que, a través de la definición por escrito de un archivo XML o de forma gráfica, permite interactuar con la herramienta. El diseño modular de esta herramienta es fundamental para poder adaptarla a cualquier tipo de entornos de virtualización.

Definición del escenario

Durante esta primera fase, el operario del sistema define en alto nivel las características técnicas que forman el escenario (número de máquinas, sistema operativo de cada una de ellas, configuraciones de red, etc.). Con este fin se ha propuesto un esquema XSD que contiene los elementos obligatorios y su formato. Utilizando este esquema es posible definir un archivo XML con la especificación completa del escenario (figura 1a). De igual forma, se ha implementado una interfaz gráfica que permita al usuario del sistema realizar esta especificación de forma visual.

Una vez completa esta fase, el sistema cuenta con una definición formal del escenario formado por los equipos que lo componen, a qué red o redes están conectados estos equipos, las características de estos, los servicios que se desplegarán, su ubicación, etc.

Estudio de viabilidad y especificación completa

Es necesario comprobar la viabilidad de la definición del escenario tanto a nivel lógico (que los elementos definidos sean compatibles entre sí) como a nivel de despliegue (que los recursos de la infraestructura de virtualización del sistema puedan alojar todas las especificaciones realizadas). En esta segunda fase se analiza la especificación realizada por el usuario, se completa generando una entrada para cada elemento del sistema (p. ej. si se ha definido un rango de direccionamiento IP para un equipo, se le asignan valores concretos) y se insertan los elementos necesarios para su correcto despliegue y monitorización tales como sondas de configuración. En la figura 1b se muestra la representación gráfica de un escenario de ejemplo.

Figura 1. Creación de un escenario básico. 1a) Archivo XML con la especificación del escenario. 1b) Representación gráfica del escenario tras la validación del archivo XML.

Traducción y ejecución

El proceso de generación de escenarios consiste en la creación de las peticiones que se deben realizar a la plataforma de virtualización que alojará el escenario. Este submódulo del generador realiza a su vez

las peticiones de forma iterativa, siguiendo un árbol de dependencias, para poder obtener los datos de la plataforma que sean necesarios para completar alguna de las peticiones. Este módulo es dependiente de la infraestructura de virtualización utilizada para el despliegue debido a que las órdenes que se ejecutarán variarán dependiendo del proveedor (VMware, Citrix, etc.).

De forma adicional a los elementos definidos en los pasos anteriores, se realiza el despliegue de un conjunto de sondas, colocadas en puntos concretos de la red virtualizada, que permiten realizar tareas de monitorización y configuración de equipos dentro del propio escenario. Estas sondas son «invisibles» para los usuarios del escenario y cuentas con herramientas como Ansible para realizar las configuraciones de los equipos.

Interfaz de usuario

Ya que el generador de escenarios está desarrollado utilizando como lenguaje de programación Python y el entorno de desarrollo web Django, la interfaz gráfica está formada por las plantillas, hojas de estilos y funciones JavaScript, que forman el *FrontEnd* de la aplicación. En la figura 2 se muestran dos capturas de las diferentes áreas a las que se puede acceder dependiendo del perfil de usuario.

El área de gestión, accesible únicamente por usuarios administradores, permite realizar de forma gráfica funciones como: dar de alta credenciales de acceso a las plataformas de virtualización; definir la configuración de las redes de gestión; dar de alta, modificar, o borrar plantillas de equipos; o la creación, administración y borrado de usuarios de tipo «operario».

Cuando un usuario de tipo «operador» accede a la aplicación, podrá visualizar las opciones que le haya permitido utilizar su administrador.

Figura 2. Interfaz gráfica del generador de escenarios. 2a) Área de gestión accesible por los administradores de la aplicación. 2b) Ejemplo de una de las páginas de la interfaz de usuario.

De forma general, las principales opciones que se pueden realizar desde esta vista son:

- Cargar / guardar definición de escenarios desde archivos XML.
- Crear un escenario desde cero, pudiendo definir: las redes que lo forman (red, máscara y puerta de enlace, los equipos (plantilla correspondiente a un sistema operativo concreto) y los servicios asociados a cada equipo (programas que se instalarán y estarán disponibles en cada equipo tras su despliegue).
- Visualización gráfica del escenario. En la figura 1b se muestra un ejemplo de la representación que se genera.
- Despliegue de un escenario.
- Interacción con los equipos desplegados. La aplicación permite tanto arrancar, reiniciar, o detener los equipos desplegados, como ejecutar órdenes en ellos de forma remota.

3. Resultados y discusión

Para analizar los resultados obtenidos, nos centraremos en el demostrador final desarrollado en el contexto del proyecto PREDECIBLE. El objetivo de este demostrado fue el poner en práctica un caso

práctico donde intervinieran todos los módulos implementados, que permitiera validar los desarrollos realizados y mostrar la utilidad de los mismo. Para ello se diseñó un escenario que incluyera los nodos y redes necesarios para validar los requisitos, incluyendo los sistemas operativos y servicios mínimos. En la figura 4 se muestran los diferentes módulos que intervienen en el demostrador y la comunicación directa o indirecta que existe entre ellos.

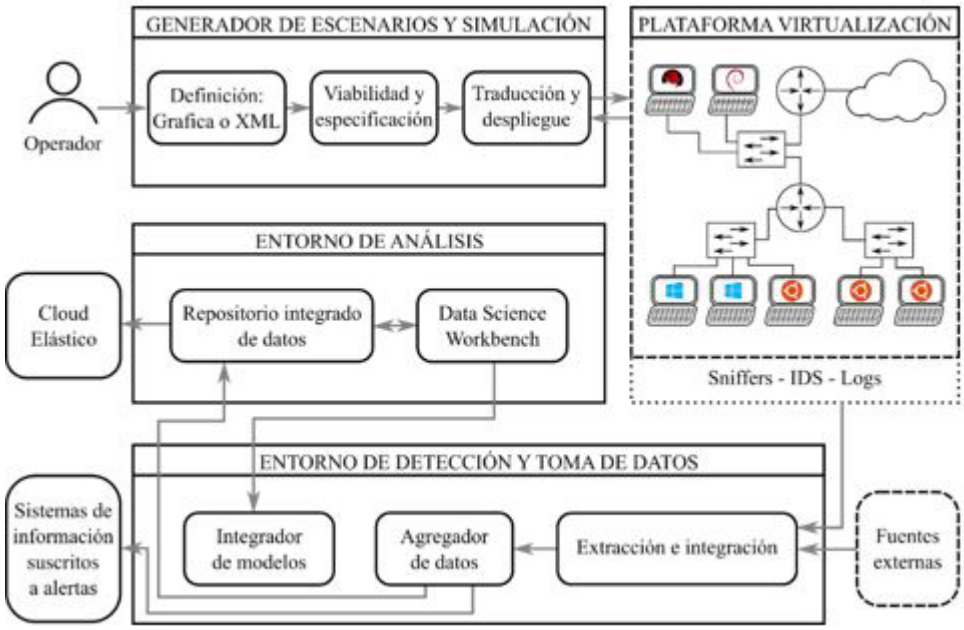


Figura 3. Esquema de los módulos que intervienen en el demostrador de PREDECIBLE.

Para mostrar la integración en el demostrador de los diferentes módulos se han empleado las imágenes de máquinas virtuales necesarias para crear y configurar los nodos encargados de extraer la información necesaria del escenario y transmitirla a puntos de análisis, generando alertas en caso de detectar alguna amenaza o anomalía. El demostrador diseñado para llevar a cabo el escenario piloto tiene la siguiente estructura:

1. Generador de escenario y simulación
   - Funcionamiento básico. Acceso a la aplicación, comprobación de credenciales, etc.
   - Importar/exportar definición en XML.
   - Crear un equipo y un conjunto de equipo de forma automatizada.
   - Configuración de servicios previos al despliegue y una vez desplegado un equipo.
   - Ejecución de órdenes desde la interfaz gráfica.
   - Arrancar/parar el escenario completo.
   - Liberar el sistema de virtualización. Ejecutar la orden desde la interfaz capaz de detener de forma contralada todos los equipos desplegados y liberar los recursos del cluster de virtualización.
2. Entorno de detección y toma de datos (EDTD) y entorno de análisis (EAN)
   - Una vez desplegado el escenario, se generan un conjunto de ataques. De forma previa, se han desplegados equipos con vulnerabilidades conocidas.
   - Se comprueba que los agentes encargados de monitorizar el escenario recogen la información necesaria para interpretar de forma autónoma la situación.
   - Se verifica que el flujo de información entre el EDTD y el EAN se genera de forma correcta.
   - En el repositorio integrado de datos, incluido en el EAN, se comprueba que los datos están siendo almacenados de forma correcta.

- Se utilizan las herramientas desarrolladas para crear los modelos.
- Datos repositorio ® *Data Science Workbench* ® reglas a sistemas de detección.

Para completar cada uno de los puntos anteriormente mencionados se definieron de forma previa un conjunto de pruebas que, tras su correcta ejecución, se consideraría como validado. El demostrador se llevó a cabo en las instalaciones que dispone el ITM-INTA utilizando su infraestructura de virtualización basada en las tecnologías de CloudStack y XenServer, estando planificado un futuro despliegue en la plataforma de Cyber Range disponible en el Mando Conjunto de Ciberdefensa. Esta prueba piloto se realizó bajo la supervisión del director técnico del proyecto, perteneciente al grupo de simulación del Mando Conjunto de Ciberdefensa, y con el apoyo de ingeniería de la encomienda de gestión de ISDEFE, representando a la Dirección General de Armamento y Material del Ministerio de Defensa.

El demostrador se pudo completar con éxito y permitió validar los desarrollos realizados. Además, mostró las ventajas de esta plataforma para recoger información sobre posibles ataques y cómo las técnicas de *Big Data* propuestas pueden ser muy útiles en este tipo de entornos.

4. Conclusiones

Los ataques en el ciberespacio se han convertido actualmente en un problema prioritario para los gobiernos dada la dependencia de la sociedad actual de las redes de comunicación. La rápida evolución de las técnicas de ataque hace que tengamos que proporcionar cada vez respuestas más rápidas. El uso de técnicas de análisis de datos es un camino apropiado para avanzar en este sentido, y para ellos se hace necesario contar con entornos de trabajo en los que poder probar estas técnicas de forma rápida y sencilla. Con el objetivo de comenzar a abordar este problema hemos desarrollado una primera versión de una plataforma que permite poder aplicar analítica de datos sobre escenario desplegados, con el objetivo de investigar y mejorar los mecanismos de detección de anomalías. Esta plataforma supone una semilla para conseguir un entorno en el que poder, de forma sencilla, acelerar el desarrollo y pruebas de nuevos métodos de detección de ataques basados en la analítica de datos.

Agradecimientos

Este documento ha sido elaborado en el marco del contrato firmado con la Dirección General de Armamento y Material del Ministerio de Defensa. Expediente número 1003215005600. Programa COINCIDENTE. Agradecimiento especial al Mando Conjunto de Ciberdefensa por su apoyo y participación en el proyecto.

Referencias

1. *Ponemon Institute. Big Data Analytics in Cyber Defense. Ponemon Institute, 2013.*
2. *Zeidanloo, H. R., Shooshtari, M. J. Z., Amoli, P. V., Safari, M., & Zamani, M. A taxonomy of botnet detection techniques. Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on: IEEE; 2010.*
3. *Veeramachaneni K, Arnaldo I, Korrapati V, Bassias C, Li K. AI^ 2: training a big data machine to defend. IEEE 2nd International Conference on Big Data Security on Cloud, IEEE International Conference on High Performance and Smart Computing, IEEE International Conference on Intelligent Data and Security, 2016: 49-54.*
4. *Jajodia S, Noel S, Kalapa P, Albanese M, Williams J. Cauldron mission-centric cyber situational awareness with defense in depth. MILCOM, 2011:1339-1344.*
5. *Sicilia M, Bermejo-Higuera J, García-Barriocanal E, Sánchez-Alonso S, Domínguez-Álvarez D, Monzón-Fernández M. Querying streams of alerts for knowledge-based detection of long-lived network intrusions. International Conference on Flexible Query Answering Systems, 2017:186-197.*

6. *Comparison of CORE network emulation platforms. Military Communications Conference, 2010-MILCOM 2010: IEEE; 2010.*
7. *Davis J, Magrath S. A survey of cyber ranges and testbeds. Defence Science and Technology Organisation Edinburgh (Australia) Cyber And Electronic Warfare Div., 2013.*
8. *Machado, A. F. A., Costa, F. A. C. R., & de Rezende, J. L. Use of simulation to achieve better results in cyber military training. Military Communications Conference, MILCOM 2015, 2015.*
9. *Subaşu, G., Roşu, L., & Bădoi, I., Modeling and simulation architecture for training in cyber defence education. Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 2017 9th International Conference on: IEEE; 2017.*
10. *Marsá-Maestre, I., de la Hoz, E., Gimenez-Guzman, J. M., & Lopez-Carmona, M. A., Using a scenario generation framework for education on system and internet security. Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2012 IEEE: IEEE; 2012.*
11. *Pridmore, L., Lardieri, P., & Hollister, R., National Cyber Range (NCR) automated test tools: Implications and application to network-centric support tools. AUTOTESTCON, 2010 IEEE: 2010.*

Técnicas avanzadas para el uso de la simulación en el apoyo a la toma de decisiones

Debán Blanco, J.[1,*], García Luque, A.[2], Castillo Chamorro, J.M.[3]

[1] Cte. CIPET. Parque y Centro de Mantenimiento de Sistemas Antiaéreos, Costa y Misiles. Pozuelo de Alarcón (Madrid). Correo electrónico: jdebbla@et.mde.es

[2] Tcol. médico. Jefe Servicio de Farmacología Clínica. Hospital Central de la Defensa. Madrid.

[3] Doctor Ingeniero de Telecomunicaciones. Universidad Internacional de La Rioja (UNIR). Tcol. Artillería (Res.)

* Autor principal y responsable del trabajo.

Resumen

Introducción: la simulación es una de las técnicas más utilizadas para el apoyo a la toma de decisiones. En este estudio, se muestran las posibilidades de nuevas técnicas y áreas de aplicación en la simulación para el apoyo a la toma de decisiones y en concreto en la planificación inteligente. **Desarrollo**: usando el entorno de programación MATLAB, se plantea la simulación basada en reglas combinada con el uso de agentes inteligentes para ajustar datos de entrada hasta alcanzar unos objetivos. También se incluyen agentes inteligentes para la búsqueda y clasificación de soluciones. Las reglas permiten implementar un plan o un conocimiento previo sobre el funcionamiento del sistema. Además, como es habitual en simulación, se utiliza análisis estadístico, descriptivo y analítico, de los resultados. **Resultados**: se muestran modelos de simulación, enriquecidos con el uso de nuevas técnicas, que permiten abordar problemas de planificación como son: 1) alternativas que cumplan las reglas de funcionamiento (planificación lógica); 2) alternativas que permiten conseguir unos resultados óptimos, contradiciendo unas reglas (planificación ilógica); 3) reglas válidas o más adecuadas para alcanzar unos objetivos y 4) rango de los valores de las entradas y resultados (clasificación de resultados). **Conclusiones**: los resultados de las técnicas expuestas, permiten ir más allá del uso actual de la simulación.

Palabras clave

Apoyo a la toma de decisiones, simulación, planificación inteligente, simulación basada en reglas.

1. Introducción

Las técnicas usadas para resolver problemas de apoyo a la toma de decisiones (en adelante ATD) son muchas y muy variadas: la programación lineal, la regresión y la correlación, la simulación, etc. Se entiende por *simulación*, la imitación del comportamiento de un sistema, usando un modelo simplificado del mismo, pudiendo utilizarse para ATD. De hecho, la simulación es una de las técnicas más utilizadas para ATD, pero hasta la fecha apenas ha evolucionado, ni en sus planteamientos ni en sus aplicaciones. En este estudio, se muestran las posibilidades de nuevas técnicas y áreas de aplicación en la simulación para ATD y en concreto en la *planificación inteligente*. Toda metodología empleada para el uso de la simulación para ATD pasa por tres etapas (ver figura 1): en una etapa A, se establece el problema de toma de decisiones; en una etapa B, se construyen las herramientas de simulación necesarias y por último, en una etapa C se usa el simulador para la toma de decisiones.

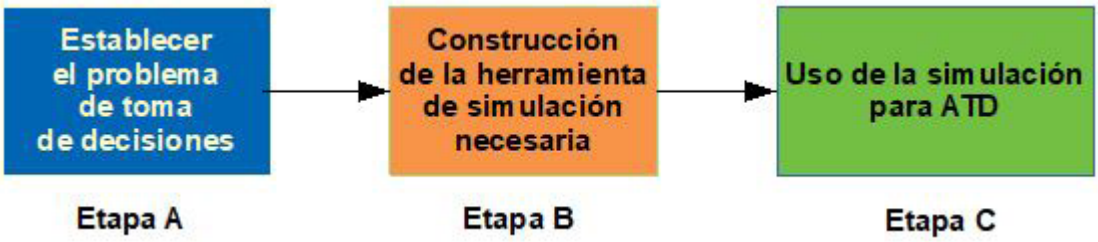


Figura 1. Esquema general de la metodología empleada para el uso de la simulación para la toma de decisiones.

2. Estado del arte

Las herramientas de simulación, tal y como se usan habitualmente en ATD, se basan en la generación de números aleatorios, por el método de Monte Carlo y en el uso de la Teoría de Colas, para la evaluación del desempeño del sistema, analizando e interpretando los resultados por medio de estadística descriptiva e inferencia estadística respectivamente. Este esquema tradicional de simulación (ver figura 2) se usa para evaluar alternativas. Ejemplo de ello son los artículos publicados por los autores, sobre optimización de despliegues militares sanitarios [1] o sobre la planificación de despliegues antiaéreos [2].

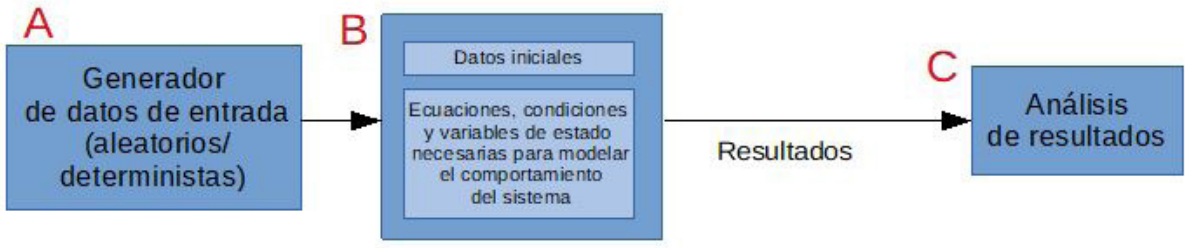


Figura 2. Esquema del uso tradicional de la simulación para la toma de decisiones.

3. Objetivo de la investigación

El objetivo de este trabajo de investigación consiste en una propuesta metodológica de empleo de la simulación ([3] y [4]) en la que se incluye una evolución en el diseño de las herramientas de ATD, para alcanzar el calificativo de planificación óptima o inteligente.

4. Propuesta de solución

Entre los inconvenientes del esquema tradicional de simulación (fig. 1 y 2) se pueden citar:

1. cómo implementar adecuadamente el conocimiento que tenemos sobre el sistema;
2. cómo ampliar los usos de la simulación, de forma que sirva para explorar soluciones con eficacia, y no solo para comparar alternativas.

En el esquema de la figura 2, solo podemos implementar el conocimiento del sistema usando ecuaciones y condiciones que modelen el comportamiento del mismo. Por lo general, las reglas que rigen el comportamiento del sistema, o la generación de los datos son muchas y muy complejas y convertir dichas reglas en ecuaciones y condiciones requiere un esfuerzo tal, que nos puede disuadir de usar la simulación. Además, añadir nuevas reglas al sistema puede suponer modificar en profundidad el programa de simulación. Es necesario que el *software* de simulación pueda trabajar directamente con reglas (ver figura 3). Es lo que llamamos simulación basada en reglas (SBR). ¿Qué tipos de reglas hacen falta? A priori, parece que las reglas pueden ser necesarias para especificar: 1) la generación de los datos de entrada al simulador; 2) el funcionamiento del sistema y 3) las condiciones que se deben cumplir para dar por encontrada una solución al problema. Las reglas (elementos E, F y G de la figura 3) permiten implementar un plan o un conocimiento previo sobre el funcionamiento que creemos que tiene un sistema. Es la mejor forma de «volcar» el conocimiento que tenemos sobre el problema que queremos estudiar para la toma de decisiones. Además de las reglas, es necesario un programa para poder manejar dichas bases de reglas (elemento D de la figura 3).

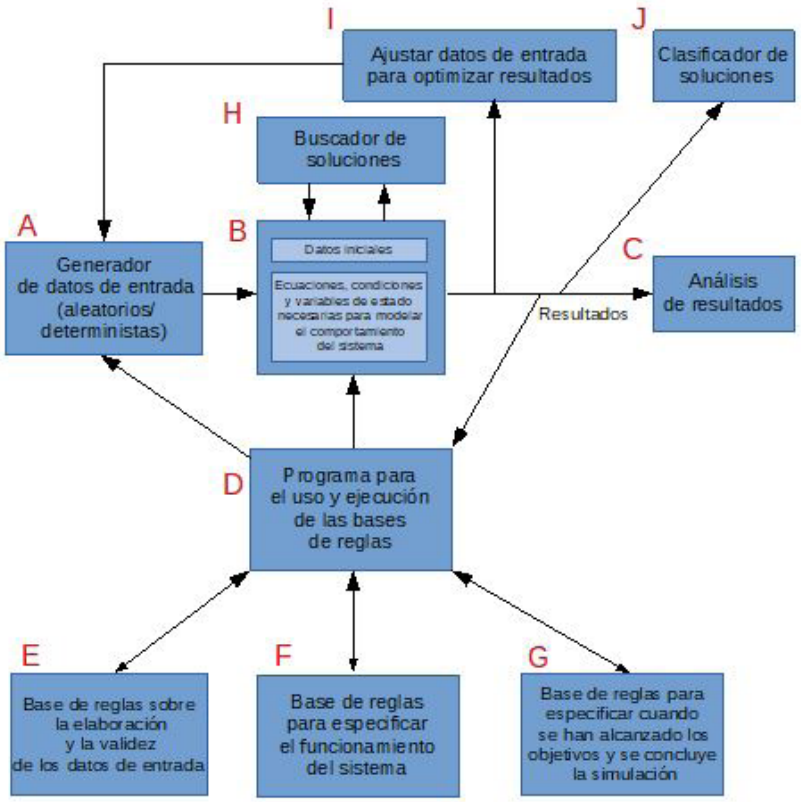


Figura 3. Esquema general del uso de la simulación basada en reglas, con capacidades de exploración de soluciones.

Así, usando reglas, se puede estudiar cómo afectan dichas reglas a los resultados de la simulación. Esta circunstancia nos abre un abanico de posibilidades de cara al ATD: 1) qué alternativas, que cumplan las reglas de funcionamiento establecidas, permiten alcanzar unos resultados óptimos (planificación lógica); 2) qué alternativas permiten conseguir unos resultados óptimos, contradiciendo las reglas (planificación ilógica); 3) qué reglas son válidas o son más adecuadas para alcanzar unos objetivos (evaluación de reglas).

Una vez que se ha implementado la simulación basada en reglas, se pretende ampliar las capacidades asociadas a la simulación, no solo para evaluar alternativas, sino para poder usar eficazmente la simulación en tareas de exploración de soluciones: búsqueda y clasificación.

Para tareas de búsqueda de soluciones, cabrían dos posibilidades: 1) la primera sería buscar soluciones ajustando los datos de entrada (elemento I de la figura 3) hasta encontrar unos resultados óptimos, de acuerdo a unas reglas (elemento G de la figura 3). Esta opción es válida en el caso de que nos interese optimizar unos resultados, sin importarnos cuál ha sido el camino para llegar a esos resultados óptimos; 2) otra opción es implementar búsquedas inteligentes [5], en el caso de que nos interese conocer cuál ha sido el camino recorrido para llegar al resultado deseado (elemento H de la figura 3).

La clasificación de soluciones, usando simulación, permite explorar dónde se encuentran las distintas soluciones posibles, y qué rangos de los valores de entrada se corresponden con cada posible solución (elemento J de la figura 3).

5. Ejemplo de aplicación

Para asentar ideas, se comenzará proponiendo un problema de ATD, que pueda ser abordado con simulación: *la elaboración del presupuesto económico del Ministerio de Defensa para el próximo ejercicio*. Para la elaboración de dicho presupuesto, contamos con la ayuda de expertos que pueden describir las reglas que rigen la elaboración de dicho presupuesto. Por ejemplo: «los gastos de personal no deben superar el 71 % del presupuesto»; «el consumo público de Defensa no debe superar el 87 % del presupuesto»; «la inversión pública debe ser, al menos, el 13 % del presupuesto»; «el presupuesto de Defensa no debe superar 8.000 millones de euros», «los gastos de compra de bienes y servicios para el próximo ejercicio serán de entre 440 y 450 millones de euros».

El objetivo es encontrar un presupuesto, dividido en capítulos, que permita hacer frente con éxito a los gastos previstos. Para ello, se propondrán posibles presupuestos, que se ajusten a unas reglas de elaboración, que serán evaluados frente a gastos aleatorios (gastos de personal, compras de bienes y servicios, compras de material de oficina, gastos de apoyo logístico, etc.) que se presenten, todo ello conforme a las reglas previamente establecidas.

El presupuesto del Ministerio de Defensa se divide en nueve capítulos: el *capítulo I*, gastos de personal, incluye todos los sueldos y salarios pagados; el *capítulo II*, compras de bienes y servicios, recoge las compras de bienes y servicios a las empresas; el *capítulo III*, gastos financieros, recoge, fundamentalmente, el pago de intereses de la deuda pública; el *capítulo IV*, trasferencias corrientes, recoge las trasferencias a las familias o a las empresas, para la adquisición de bienes y servicios; el *capítulo V*, fondo de contingencia, recoge la financiación de gastos que no estaban previstos; el *capítulo VI*, inversiones reales, se refiere a los gastos de inversión realizada directamente por el Ministerio de Defensa; el *capítulo VII*, trasferencias de capital, recoge los pagos a empresas privadas para que lleven a cabo proyectos de inversión; el *capítulo VIII*, activos financieros, incluye los gastos destinados a la adquisición de activos financieros y el *capítulo IX*, pasivos financieros, se incluyen aquellos desembolsos destinados a amortizar títulos previamente emitidos por el sector público.

De acuerdo con la metodología expuesta, lo primero que haría falta es que un equipo de expertos establezca las reglas necesarias para la elaboración y la validez de un presupuesto, por ejemplo:

R1: Los gastos de personal no deben superar el 71 % del presupuesto.

R2: El consumo público de Defensa no debe superar el 87 % del presupuesto.

R3: La inversión pública debe ser, al menos, el 13 % del presupuesto.

R4: El presupuesto de Defensa no debe superar los 2.518 millones de euros.

R5: Los gastos de personal deben ser de entre 1.700 y 1.800 millones de euros.

R6: Los gastos de compra de bienes y servicios deben ser de entre 440 y 450 millones de euros.

R7: Los gastos de compra de transferencias corrientes deben ser de entre 5 y 5,5 millones de euros.

R8: Los gastos de inversiones reales deben ser de entre 340 y 355 millones de euros.

R9: Los gastos de activos financieros de capital deben ser de entre 0,8 y 1 millón de euros.

De estas nueve reglas, las cuatro primeras se refieren a la validez de un presupuesto. Un presupuesto que no cumpla con dichas reglas no sería válido. Las cinco últimas son reglas de elaboración. No son imprescindibles para encontrar una solución, pero sirven para acelerar el proceso de búsqueda de soluciones. Con estas reglas, el generador aleatorio de datos (elemento A de la figura 3), genera un presupuesto, desglosado en 9 capítulos, de acuerdo con las reglas anteriores. Dicho presupuesto es válido en el momento en que cumpla las cuatro primeras reglas, pero eso no significa que sea un presupuesto adecuado. Para ello, se procede a evaluar el desempeño de dicho presupuesto, usando Monte Carlo [6], por medio de un generador aleatorio de gastos y comprobar el porcentaje de ocasiones en las que el presupuesto permite hacer frente a los gastos generados (elemento B de la figura 3).

El generador de gastos anuales, para poder simular el desempeño del simulador, necesita de unas reglas (elemento F de la figura 3), que por ejemplo, podrían ser las siguientes:

R10: Los gastos de personal previstos están entre 1.700 y 1.750 millones de euros.

R11: Los gastos de compra de bienes y servicios previstos están entre 440 y 443 millones de euros.

R12: Los gastos de compra de transferencias corrientes previstos están entre 5 y 5,1 millones de euros.

R13: Los gastos de inversiones reales previstos están entre 340 y 345 millones de euros.

R14: Los gastos de activos financieros de capital previstos están entre 0,8 y 0,85 millones de euros.

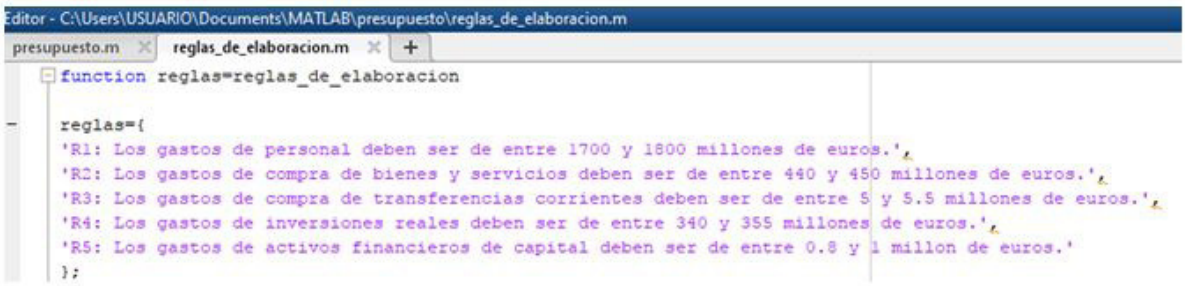


Figura 4. Base de reglas de elaboración.

Las reglas se introducen de forma textual (ver figura 4), siendo un programa específico (ver elemento D de la figura 3), el encargado de interpretarlas e implementarlas directamente en el programa de simulación.

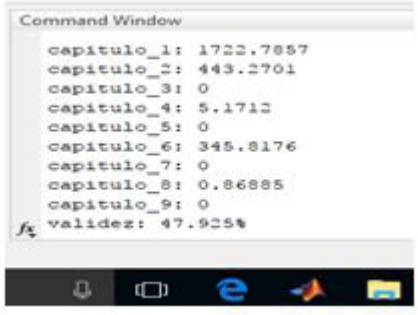


Figura 5. Salida del programa.

A veces, el presupuesto permite hacer frente a los gastos aleatorios generados y a veces no. La generación de gastos anuales se realiza un elevado número de iteraciones hasta que se estabiliza el procedimiento Monte Carlo; lo que permite evaluar la validez del presupuesto, al conocer el porcentaje medio de ocasiones en que el presupuesto permite hacer frente a todos los gastos previstos (ver figura 5).

Pero no solo se busca calcular la validez de un presupuesto, sino encontrar cuál es el presupuesto más adecuado. Esto supone usar la simulación para buscar soluciones. Para este problema, como solo nos interesa una solución y no el camino seguido para encontrarla, interesa ir ajustando aleatoriamente el presupuesto (elemento I de la figura 3), por medio de técnicas de optimización (en este caso algoritmos genéticos [7] y [8]), comprobando que sigue siendo válido mediante la reevaluación de su desempeño. Finalmente en la figura 5 se puede ver cómo se ha encontrado un presupuesto con un valor óptimo de validez de casi el 50 %. No es posible encontrar un presupuesto con un valor más alto, con las reglas establecidas. Tanteando, quitando y poniendo reglas, se puede comprobar que, eliminando la regla R4 *(el presupuesto de Defensa no debe superar los 2.518 millones de euros*), se puede alcanzar un presupuesto 100 % válido. La regla R4 es la «*regla falsa*», en el sentido de que es la que nos impide alcanzar la validez plena de un presupuesto.

Por otra parte, si nos interesa profundizar en la exploración de soluciones, debemos proceder a clasificar las soluciones distinguiendo las regiones en donde se pueden encontrar soluciones óptimas del resto de regiones inútiles. En nuestro caso, se separan las regiones, usando agentes inteligentes basados en redes neuronales [9] y [10] (elemento J de la figura 3). En la figura 6 se puede ver que existe una zona donde podemos esperar encontrar una solución óptima. Por ejemplo, los gastos del capítulo 2 deben estar entre 443 y 444 millones de euros y los gastos del capítulo 6 debe estar entre 344 y 346. Esto coindice con la solución encontrada anteriormente. Además, por medio de un clasificador de soluciones se puede comprobar que no existen otras zonas donde se pueda encontrar una solución.

Por último, se utiliza estadística descriptiva e inferencia estadística [11] (elemento C de la figura 3), para considerar válida una solución.

Al ejecutar el programa de MATLAB, la salida es la que se observa en la figura 5. En este ejemplo, la salida del programa es la cuantía económica del presupuesto, desglosado en capítulos, y el valor de validez del desempeño. En este caso, el presupuesto ha sido capaz de hacer frente a los gastos, generados aleatoriamente, en casi el 48 % de los casos.

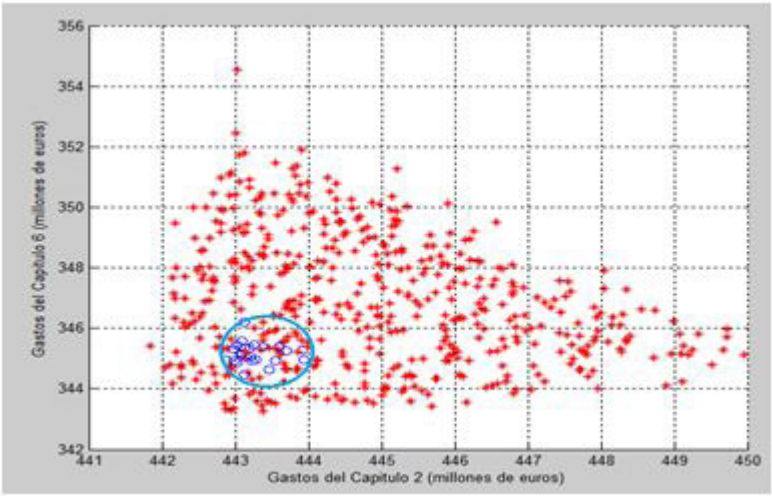


Figura 6. Clasificación de resultados. En azul los presupuestos con un valor de validez superior al 45 %.

Por otra parte, la clasificación de resultados (figura 6) nos muestra que no hay otras posibles soluciones. Esta forma de estudiar el problema de ATD, se puede considerar que forma parte de la planificación lógica; es decir, cuáles de las alternativas que cumplan las reglas de funcionamiento establecidas permiten

alcanzar unos resultados óptimos. Otras posibilidades de plantear el problema de ATD serían: 1) qué alternativas permiten conseguir unos resultados óptimos, contradiciendo unas reglas (planificación ilógica). Como ya se ha visto, incumpliendo la regla R4 se puede alcanzar un 100 % de validez, lo cual no es de mucha utilidad en este caso, porque es sabido de sobra que lo más complicado a la hora de ajustar un presupuesto es que existe un techo de gasto; 2) qué reglas son válidas o más adecuadas para alcanzar unos objetivos en donde, en vez de establecer las reglas, se busca que el elemento D de la figura 3 sea el que genere las reglas que permitan alcanzar los objetivos deseados.

6. Futuros trabajos

Nos planteamos, como futuros trabajos, el seguir investigando en la aplicación de búsquedas inteligentes, redes neuronales y algoritmos genéticos con el objetivo de facilitar su inclusión en la metodología expuesta en esta ponencia, de forma que agilice la creación de módulos de clasificación de patrones o reglas, así como la búsqueda optimizada de soluciones dentro del plan. La modularización de estas herramientas de inteligencia artificial facilitaría su uso dentro de los entornos de planificación. Con tal motivo, nos planteamos conectar la actual investigación con la obra publicada por el Ministerio de Defensa [12], en la que se aborda la creación de modelos multiagente en entornos de planificación y se presentan ejemplos de aplicación en la planificación militar táctica.

7. Conclusiones

En la presente ponencia se expone un modelo completo, desde un punto de vista metodológico, en el que confluyen tecnologías de simulación con tecnologías de inteligencia artificial. La fusión de ambas ramas dentro del campo de las tecnologías para el apoyo a la toma de decisiones (ATD) augura la obtención de planes optimizados altamente fiables con fácil capacidad de modificación de las condiciones del problema. Esto permite encuadrar la propuesta de esta ponencia dentro del área de la planificación inteligente en tiempo útil tanto en tareas administrativas de planificación como en entornos tácticos en el empleo de unidades militares.

La ponencia ilustra la aplicación de la metodología mediante un ejemplo de planificación basada en reglas del presupuesto anual del Ministerio de Defensa.

El código de MATLAB, usado en este trabajo, está disponible para aquellos que quieran probar su funcionalidad, mediante contacto con el autor principal.

Bibliografía

1. Debán Blanco, J.; García Luque, A.; Castillo Chamorro, J.M. *Optimización de despliegues militares sanitarios en operaciones mediante técnicas de modelado y simulación*. Revista de Sanidad Militar. Volumen 70-1. Enero-marzo 2016.
2. Castillo, J.M.; Martínez A. *Monte Carlo y la planificación de despliegues antiaéreos*. Memorial de Artillería. Num 167-1. 2011.
3. Shephard, R. *Applied Operations Research, examples for research assessment*. Plenum Press. 1988.
4. Shannon, R. *Simulación de Sistemas, diseño, desarrollo e implantación*. Trillas. 1988.
5. Castillo, J.M. *Búsquedas inteligentes*. https://youtu.be/OOpr2MHOvDw. Youtube Lic Estándar. 2017.
6. Castillo, J.M. *El procedimiento Monte Carlo*. https://youtu.be/BWWw68AjSi4. YouTube Lic Estándar. 2017.
7. Castillo, J.M. *Algoritmos genéticos*. https://youtu.be/-rxGSe2ROX4YLuW6. YouTube Lic Estándar. 2017.
8. Lozano J.A. *Algoritmos Geneticos*. https://www.youtube.com/watch? v=8oVCYgJEWBg. YouTube Lic Estándar. 2017.

9. García J. *Redes Neuronales: Fácil y desde cero*. https://www.youtube.com /watch?v=jaEIv_E29sk. YouTube Lic Estándar. 2017.
10. Castillo, J.M. *Redes Neuronales*. https://youtu.be/UGFWJ1U5eZw. YouTube Lic Estándar. 2017.
11. Peña, D. *Fundamentos de Estadística*. Alianza Editorial. 2014.
12. Castillo, J.M. Una solución a la planificación de operaciones para la defensa basada en agentes inteligentes. MINISDEF 2009.

Simulación de bajo coste para el adiestramiento en el Ejército de Tierra

Cajal Hernando, Carlos[1,*], Gracia Ramos, Ángel[1], Aguado Jiménez, Sergio[1], Jiménez Pacheco, Roberto[1] y Vicente Oliva, Silvia[1]

[1] Centro Universitario de la Defensa. Zaragoza. Academia General Militar. Ctra. de Huesca s/n, 50090 Zaragoza (España). ccajal@unizar.es: (CCH).

Email:

* Autor principal y responsable del trabajo; ccajal@unizar.es: cch

Resumen

Hoy en día, los sistemas de simulación sirven para la reducción de costes y la toma de decisiones en sistemas productivos y tecnológicos de todo tipo. Un aspecto muy significativo, donde la simulación tiene un largo recorrido, es el de la formación y el entrenamiento. La recreación de situaciones reales permite la reducción de costes a la vez que asegura la integridad de personal y equipos.

En el ejército el adiestramiento continuo y especializado es una base fundamental del trabajo. Es por ello, que en este artículo se describen algunos casos donde la simulación puede resultar útil. Para ello, se aprovecha el abaratamiento y la universalización de los dispositivos y equipos electrónicos de uso doméstico, no hace mucho restringidos a entornos profesionales.

Por poner un ejemplo, cualquier teléfono móvil, de hoy en día, dispone de conexión de banda ancha, pantalla de alta resolución, giroscopios, brújula, GPS de precisión y cámara de fotos de alta calidad por un precio, que, en algunos casos, no supera los 100€. De igual manera, existen multitud de librerías y recursos, normalmente destinados a la industria del videojuego y el ocio, cuyo uso puede ser dual, aprovechándose también para labores de adiestramiento.

Por todo lo anterior, en este artículo se proponen soluciones tecnologías de bajo coste que pueden ser utilizadas en el adiestramiento, a diferentes niveles, y que permiten ilustrar el potencial de la simulación para posteriormente desarrollar aplicaciones de carácter profesional.

Palabras clave

Simulación, 3D, formación, virtual.

1. Introducción

El cambio en el plan de estudios de los centros de formación de militar para la escala de oficiales ha dado lugar a la creación de los centros universitarios de la defensa (CUD). Estos centros, que imparten estudios de grado universitario, están formados por profesores según la Ley Orgánica de Universidades (LOU). Es labor de estos profesores realizar tarea investigadora con su inherente producción científica para su uso y divulgación. Dicha investigación permite, conformando equipos multidisciplinares, aprovechar la experiencia en distintos campos para trabajar en el campo de la defensa y seguridad. En la figura 1 se muestran los ámbitos que se han unido con el fin de trabajar en el ámbito de la seguridad y la defensa en sistemas tridimensionales.

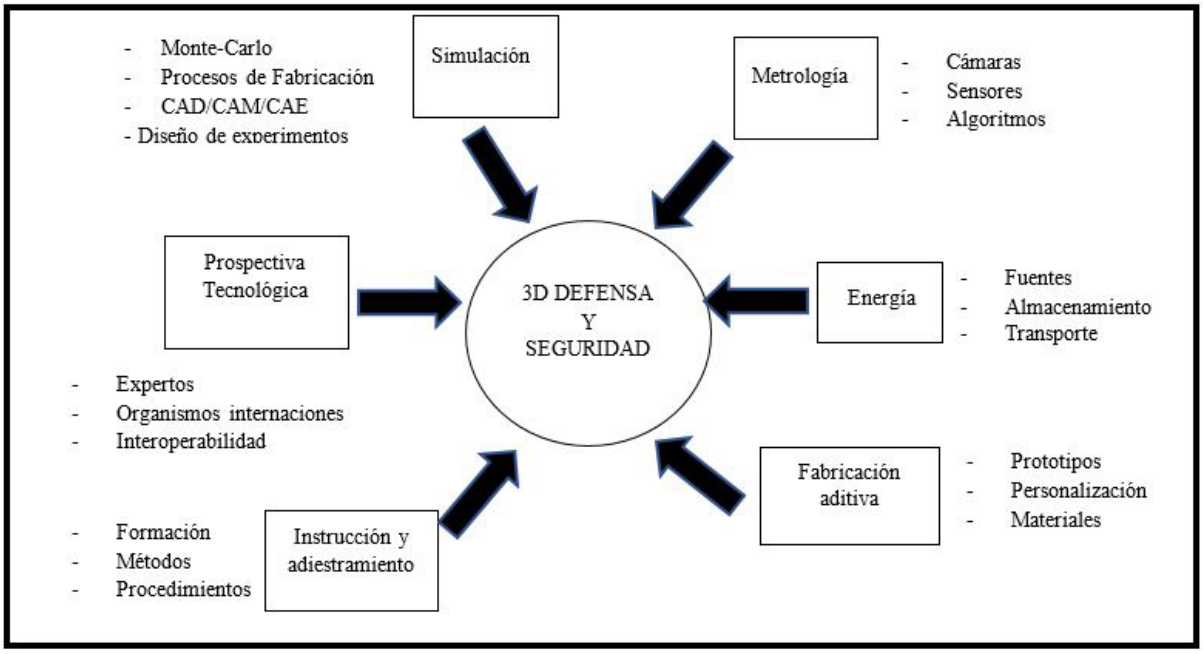


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema.

En este artículo se cubren los sistemas de simulación 3D [1–3] para la formación y el entrenamiento. La recreación virtual de situaciones reales tiene múltiples beneficios relativos a los costes y la seguridad. En el Ejército se da una gran importancia a la formación. Es por ello que la experiencia acumulada en el ámbito civil en sistemas de visión, láser, sensores, sobre todo en el ámbito de la metrología y de la simulación (4–8) se va a aplicar al desarrollo de sistemas de simulación de seguridad y defensa.

Además, es una tecnología de interés como se recoge en la actual Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID) (9) Meta Tecnológica MT 4.2.1. Rendimiento efectivo en operaciones, las tecnologías de simulación y realidad aumentadas son las que se concretan para el «entrenamiento adaptativo (para un amplio espectro de operaciones y con diferentes niveles), predictivo (que permita

predecir el rendimiento operacional), personalizado y/o colectivo». Cualquier modelo del mundo real puede ser utilizado para las siguientes funciones [10]: investigar procesos, relaciones y escenarios de actuación; transformar condiciones existentes en otras más adecuadas; y, finalmente, crear «memoria de futuro» de los participantes. El primer uso mencionado es sumamente importante en aspectos de política tecnológica –ver por ejemplo [11]– y como metodología de prospectiva [12,13].

El segundo uso, como poder transformador, se reconocen estas tecnologías como capacitadoras para integración efectiva de pruebas de desarrollo de conceptos y experimentación (CD&E) en el entorno OTAN [14]. Crear una «memoria de futuro» requiere tecnología aplicada porque está encaminada al entrenamiento y a la educación, como es el caso de la presente propuesta de proyecto. Los mecanismos de la memoria hacen que una situación vivida como actual, cuando se recupera en el futuro haya dejado efectos cognitivos y de comportamiento que pueden ser reutilizados en el futuro [15]. Y esta experiencia, puede irse mejorando y retomando para entrenarla mediante herramientas basadas en simulación y realidad aumentada, con experiencias en el entorno militar, como por ejemplo [16].

Dentro de esta temática se pretende avanzar en herramientas que sean útiles en la formación y adiestramiento de los miembros de las Fuerzas Armadas. Entre otros usos que se pudieran encontrar, se plantean los siguientes trabajos los cuales son cubiertos en este artículo:

- Sistema de simulación de perspectiva para conectar con un simulador.
- Creación de escenarios virtuales para planeamiento virtual.
- Sistema portátil de comunicación full dúplex de mando y control (basado en teléfono móvil).

Por todo lo anterior, en este artículo se proponen soluciones tecnologías de bajo coste que pueden ser utilizadas en el adiestramiento, a diferentes niveles, y que permiten ilustrar el potencial de la simulación para posteriormente desarrollar aplicaciones de carácter profesional. En esta etapa inicial del proyecto, que se cubre en el presente artículo, se pretende analizar las tecnologías anteriormente mencionadas y empezar líneas de investigación que resulten en un medio plazo en prototipos funcionales.

2. Desarrollo

2.1. Sistema de simulación de perspectiva para conectar con un simulador

La realidad virtual exige que el usuario pueda interaccionar con su entorno. Quizás el método más inmediato para interacción sea el de la vista, y el efecto de cambiar la perspectiva según el usuario gira su cabeza. Actualmente existen sistemas donde mediante giroscopios se puede obtener la orientación del usuario gracias a la gravedad. Sin embargo, esto no es posible cuando lo que se necesita es la posición relativa respecto al vehículo en el que el usuario está embarcado. Es así como se hace, por ejemplo, en los más modernos cazas de combate, donde se necesita la perspectiva del usuario respecto a la aeronave y no respecto a la superficie terrestre.

Figura 2. Posicionamiento y orientación del usuario.

Es por ello, que se puede utilizar la visión artificial para situar al usuario respecto a 2 cámaras (ver figura 2) funcionando en estereovisión y así recrear cambios de perspectiva en el entorno de simulación. Mediante algoritmos de análisis de imágenes se puede identificar marcadores situados en el casco que porta el usuario y trasmitir al sistema su posición y orientación, lo que permite variar la vista subjetiva del sistema de realidad virtual. Al casco de combate Marte, reglamentario en el Ejército de Tierra, se le acoplan marcadores que permiten calcular los movimientos relativos entre imágenes del usuario.

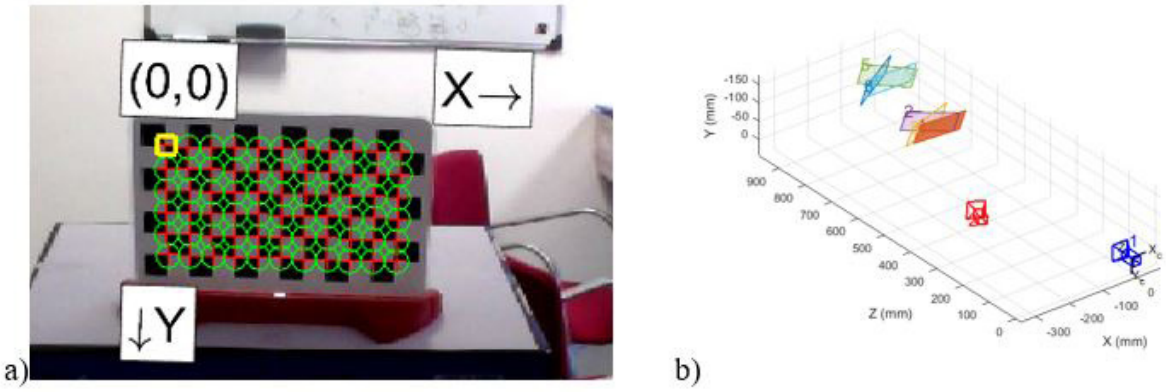


Figura 3. Calibración estéreo del sistema y posicionamiento global de las cámaras.

Según se ilustra en la figura 3 el sistema se encuentra previamente calibrado mediante la técnica del tablero de ajedrez [18]. Esta que permite relacionar todos los elementos (cámaras y marcadores) en un único sistema de referencia global. Una vez detectados los marcadores solo es necesario aplicar que se trata de un sólido rígido para calcular los movimientos y giros y modificar la perspectiva subjetiva del usuario.

El sistema se basa en que una vez identificado un marcador, solidario al casco, en varias cámaras, sus coordenadas 3D pueden ser determinadas mediante la resolución analítica de un sistema de ecuaciones redundante. Esta redundancia se debe al hecho de que cada cámara proporciona 2 ecuaciones de plano que se cortan en una única recta, lo cual proporciona 4 ecuaciones para cada coordenada (3 incógnitas) de un marcador 3D. A mayor número de cámaras mayor redundancia y por lo tanto menor el error cometido en el proceso al permitir esta redundancia reducir el ruido.

Técnicamente, el mayor problema radica en la correcta identificación de los puntos en las imágenes, puesto que no todos son visibles al mismo tiempo ni se dispone de ningún código que mediante visión pueda identificar el marcador. Esto se solventa mediante una ponderación de los resultados de las múltiples combinaciones posibles, ya que la posición relativa de los marcadores entre ellos es fija y conocida.

2.2. Creación de escenarios virtuales para planeamiento virtual

Como ya se ha comentado con anterioridad, los sistemas de virtualización 3D son ampliamente utilizados en el mundo de los videojuegos y en otros campos como por ejemplo la educación [19].

En la figura 4 se puede ver el modelo inmersivo HTC VIVE pro, y a la derecha el entorno de desarrollo Unity.

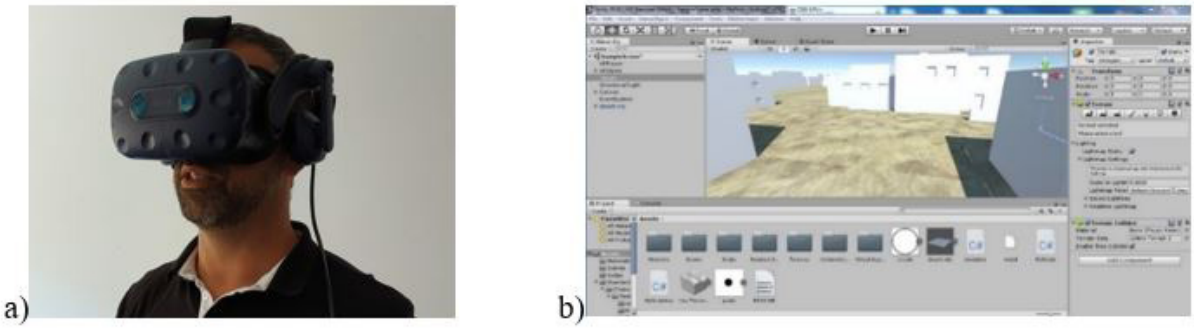


Figura 4. Gafas de realidad virtual y creación de escenarios.

Con la ayuda de este equipamiento se pretende recrear virtualmente algún entorno (figura 5) para su utilización en la formación y el adiestramiento y posteriormente diseñar experimentos que permitan cuantificar la utilidad de estos sistemas en labores de planeamiento de operaciones.

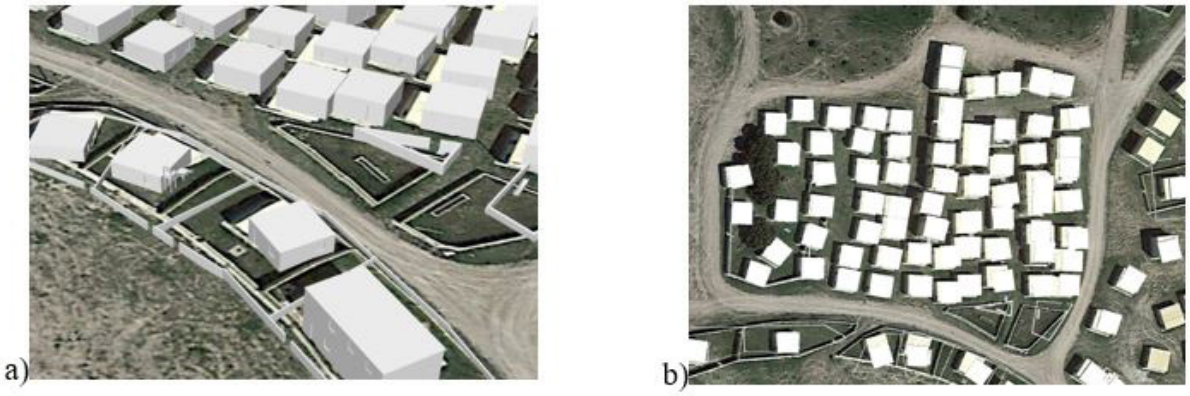


Figura 5. Digitalización de campos de entrenamiento del ET en el CENAD. Fuente: MADOC/SUBDIRINS.

El trabajo de digitalización de campos de maniobras está actualmente en desarrollo según se puede ver en la figura 5.

2.3. Sistema portátil de comunicación full dúplex de mando y control (basado en teléfono móvil)

Aprovechando las múltiples funcionalidades de los teléfonos móviles se pretende desarrollar un asistente para mando y control.

Las características de los dispositivos móviles actuales a utilizar son las siguientes:

- Pantalla de alta resolución.
- Dos cámaras de alta calidad con posibilidad de trasmisión de vídeo en tiempo real y superposición de información para realidad aumentada.
- GPS & A-GPS.
- Giroscopios.
- Brújula.
- Sistema de vibración insonoro.
- Altavoz.
- Enlace de comunicaciones de alto ancho de banda.
- Dispositivo de computación.
- Trazabilidad y registro.

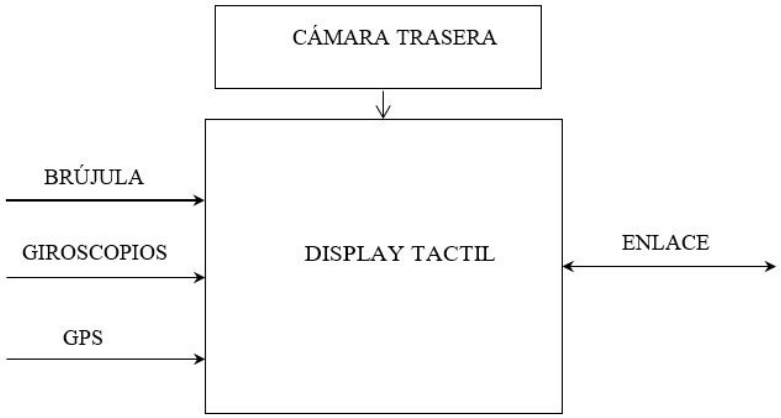


Figura 6. Diagrama de sensores e interfaces del sistema.

Según se puede apreciar en la figura 6 el sistema tiene 4 entradas principales y un enlace bidireccional de información.

La cámara frontal permite servir de fondo contextualizado para superponer la información (figura 7). En una primera instancia, se descarta la utilización de la cámara frontal.

La brújula permite orientar la perspectiva según su latitud o longitud. Es aquí donde se prevé una dificultad de estandarización puesto que todos los móviles no disponen de esta funcionalidad y en muchos casos se encuentra limitada a una orientación vertical del dispositivo.

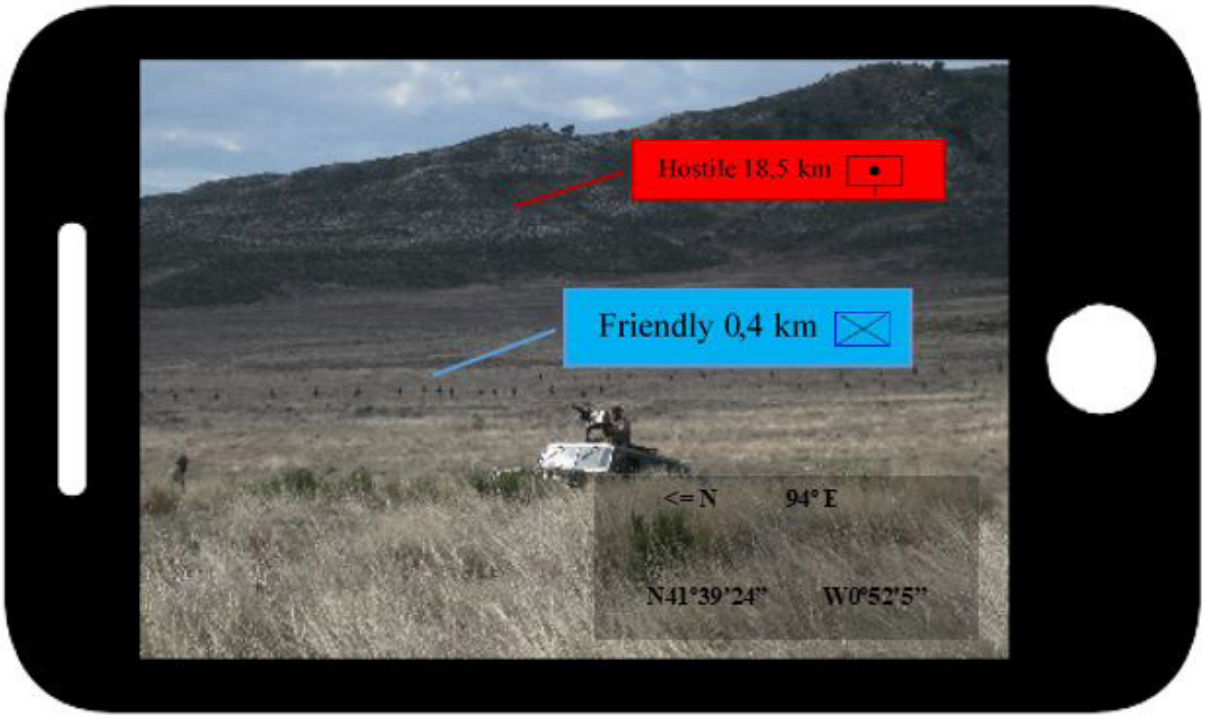


Figura 7. Recreación del interfaz del dispositivo móvil.

Los giroscopios son imprescindibles para ajustar la salida gráfica de información y asegurar su correcto correlado con la imagen captada por la cámara.

El GPS, es sus diferentes variantes (A-GPS) permite situar relativamente al dispositivo en el entorno de operaciones del sistema de mando y control.

Finalmente, pero no menos importante, se establece un enlace vía red móvil de telefonía de banda ancha. Aunque está previsto que el sistema permita enviar información a través del uso del interfaz táctil del dispositivo, el uso será fundamentalmente de recepción de mensajes e información sobre POI (puntos de interés). Al tratarse de información muy concreta y de pequeño tamaño puesto que mayoritariamente serán datos numéricos y de identificación, no se requiere ni un gran ancho de banda ni una latencia reducida.

3. Conclusiones

Resultan evidentes las ventajas de la simulación en ámbitos como el militar y el educativo por lo que al unirse ambos campos aún resulta más necesario el desarrollo y utilización de sistemas de virtualización. En este artículo se muestran tres ejemplos de simulación que se basa en equipamientos de bajo coste y que puede ser utilizada en procesos de formación y adiestramiento.

A las mencionadas ventajas de los sistemas de simulación, como son el ahorro de costes y la disminución de riesgos, hay que añadir que el mero hecho del desarrollo de estas herramientas ya supone un aná-

lisis crítico de los sistemas y procedimientos actualmente en uso, así como una mejora del conocimiento específico en defensa y seguridad de todos los agentes implicados.

Todo lo anterior es posible con una utilización muy reducida de recursos y adaptando sistemas de uso civil. El ejemplo más significativo son las librerías de desarrollo multiplataforma de videojuegos Unity cuya licencia para formación y mientras no se haga un uso comercial, resulta gratuita. Sí que se necesita invertir una cifra superior a los 1.000€ en las gafas 3D, puesto que se trata de uno de los modelos más avanzados actualmente y se han adquirido con vistas a futuros desarrollos.

4. Líneas futuras

Hasta ahora los desarrollos realizados son a nivel prototipo, llegando incluso alguna de las tareas a realizarse de manera manual o en postprocesado. Claramente queda pendiente una labor de integración y dotar a los sistemas de ejecución en tiempo real.

Una vez se alcance el nivel de producto operativo, queda la parte más importante que es la validación de los sistemas en procesos reales y su cuantificación como herramienta que implementa una mejora en el sistema.

Puesto que las herramientas en desarrollo son para formación, es la utilidad en la formación la que debe ser evaluada. Para conseguir una evaluación válida hay que tomar una muestra representativa del alumnado para ver si se produce una mejora en su formación, bien sea en nivel o en acortamiento de tiempos, y cómo se puede cuantificar.

Finalmente, hace falta un estudio económico detallado de los sistemas, porque a pesar que se parte de la premisa de que los materiales resultan asequibles, los medios humanos no lo son tanto. No se puede evaluar los costes adecuadamente en términos de personal hasta que el proceso de desarrollo no esté concluido.

Referencias

1. *OTAN. NATO MODELLING AND SIMULATION STRATEGIC PLAN. 2012.*
2. *Axelrod R. Advancing the art of simulation in the social sciences. Simulating social phenomena. Springer; 1997. p. 21–40.*
3. *Abdulmalek FA, Rajgopal J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. Int J Prod Econ. Elsevier; 2007;107(1):223–36.*
4. *Cajal C, Jimenez R, Santolaria J, Pueo M, García M. Rapid tooling aplicado a defensa , potenciales usos. III Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad. Marin; 2015.*
5. *Cajal C, Santolaria J, Samper D, Garrido A. Simulation of Laser Triangulation Sensors Scanning for Design and Evaluation Purposes. Int J Simul Model [Internet]. 2015 Jun 15;14(2):250–64. Available from: http://www.ijsimm.com/Full_Papers/Fulltext2015/text14-2_250-264.pdf*
6. *Aguado S, Samper D, Santolaria J, Aguilar J. Machine Tool Rotary Axis Compensation Trough Volumetric Verification Using Laser Tracker. Procedia Eng [Internet]. 2013 [cited 2014 Feb 10];(June). Available from: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813014021*
7. *Santolaria J, Guillomía D, Cajal C, Albajez J, Aguilar J. Modelling and Calibration Technique of Laser Triangulation Sensors for Integration in Robot Arms and Articulated Arm Coordinate Measuring Machines. Sensors [Internet]. Molecular Diversity Preservation International; 2009 Sep 11 [cited 2014 Mar 16];9(9):7374–96. Available from: http://www.mdpi.com/1424-8220/9/9/7374/*
8. *Yagüe-Fabra J a., Ontiveros S, Jiménez R, Chitchian S, Tosello G, Carmignato S. A 3D edge detection technique for surface extraction in computed tomography for dimensional metrology applications. CIRP Ann - Manuf Technol [Internet]. 2013 [cited 2014 Sep 5];62(1):531–4. Available from: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850613000176*
9. *Ministerio de Defensa D. Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID - 2015. 2015.*

10. *Zackery A, Shariatpanahi P, Zolfagharzadeh MM, Pourezzat AA. Toward a simulated replica of futures: Classification and possible trajectories of simulation in futures studies. Futures. Elsevier Ltd; 2015;81.*
11. *Australia DF-. Defence simulation strategy and roadmap. Camberra: Department of Defence; 2011. 78 p.*
12. *Reger G. Technology Foresight in Companies: From an Indicator to a Network and Process Perspective. Technol Anal Strateg Manag. 2001 Dec;13(4):533–53.*
13. *Chen H, Yu J, Wakeland W. Generating technology development paths to the desired future through system dynamics modeling and simulation. Futures. Elsevier Ltd; 2016;81:81–97.*
14. *Harrison MN, Lestage R. Science and Technology Support to Concept Development & Experimentation. October. 2004;(October):7–8.*
15. *Ingvar D. Memory of the future: an essay on the temporal organization of conscious awareness. Hum Neurobiol. 1985;4(3):127–36.*
16. *Sisodia A, Riser A, Bayer M, McGuire JP. Advanced Helmet Mounted Display (AHMD) for simulator applications. In: Brown RW, Marasco PL, Rash CE, Reese CE, editors. 2006. p. 62240O.*
17. *Library M. Guides: Vancouver citation style: Web pages.*
18. *Meng Y, Zhuang H. Autonomous robot calibration using vision technology. Robot Comput Integr Manuf [Internet]. 2007 Aug [cited 2014 Feb 25];23(4):436–46. Available from: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584506000743*
19. *Martín-Gutiérrez J. Virtual Technologies Trends in Education. EURASIA J Math Sci Technol Educ [Internet]. 2017 Jan 30;13(1):469–86. Available from: http://www.ejmste.com/Virtual-Technologies-Trends-in-Education,75042,0,2.html*

6E. Aseguramiento de la información y las comunicaciones

Implementación y validación de un cifrador de flujo en tiempo real basado en un *Skew Tent Map*

García Bosque, Miguel[1,*], Aznar Tabuenca, Francisco[2], Pérez Resa, Adrián[1], Sánchez Azqueta, Carlos[1], Aldea Chagoyen, Concepción[1] y Celma Pueyo, Santiago[1]

[1] Grupo de Diseño Electrónico. Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones. Universidad de Zaragoza. Campus San Francisco. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza. {aprz, csanaz, caldea, scelma} @unizar.es: (APR, CSA, CAC, SCP).

[2] Centro Universitario de la Defensa. Academia General Militar. Ctra. Huesca s/n. 50090 Zaragoza. faznar@unizar.es: (FAT).

Email:

* Autor principal y responsable del trabajo; mgbosque@unizar.es: (MGB).

Resumen

En las últimas décadas, ha habido un creciente interés en el ámbito de la criptografía debido a la necesidad de cifrar gran cantidad de información en tiempo real. Prueba de ello es el proyecto eSTREAM o, más recientemente, los proyectos PQCrypto y SAFECrypto. En este contexto, los cifradores basados en sistemas caóticos han demostrado ser una buena alternativa a los cifradores convencionales, pues presentan ciertas propiedades intrínsecas como la ergodicidad, alta sensibilidad a las condiciones iniciales e impredecibilidad que están estrechamente relacionadas con las propiedades de confusión y difusión que deben tener todos los criptosistemas seguros. En este trabajo, se propone un nuevo cifrador de flujo (*stream cipher*) basado en la digitalización de una aplicación caótica conocida como *Skew Tent Map*. Dado que al digitalizar este tipo de sistemas se suelen obtener secuencias cíclicas de periodos cortos, inadecuadas para ser usadas en comunicaciones seguras, el cifrador propuesto incluye una técnica capaz de incrementar drásticamente los periodos de las secuencias aumentando, de esta forma, la aleatoriedad de las mismas. Dicha técnica consiste en perturbar periódicamente las órbitas usando un registro de desplazamiento con realimentación lineal (LFSR*: Linear Feedback Shift Register*). El cifrador diseñado ha sido implementado en una FPGA Virtex 7, obteniendo una tasa de transmisión en torno a 1 Gbps usando unas 800 LUT (*Look Up Tables*). Para analizar la seguridad del cifrador, se han generado numerosas secuencias a partir de distintos parámetros iniciales y se han sometido a los test de aleatoriedad propuestos por el NIST (*National Institute of Standards and Technology*). Para todos los valores iniciales, las secuencias han pasado dichos test, probando las buenas propiedades estadísticas de las secuencias generadas. Finalmente, el estudio de la seguridad del sistema se complementa con un criptoanálisis más completo que demuestra su robustez frente a diversos ataques.

Palabras clave

Comunicaciones seguras, criptografía caótica, *Skew Tent Map*, cifradores, FPGA.

1. Introducción

El diseño e implementación de nuevos sistemas de cifrado que sean seguros y capaces de cifrar secuencias binarias a gran velocidad es actualmente un importante campo de investigación, siendo fundamentales sus aplicaciones en defensa, donde es imprescindible garantizar la confidencialidad de ciertas comunicaciones [1].

Normalmente, los criptosistemas se dividen en dos tipos genéricos: de clave simétrica (también llamada privada) y de clave asimétrica (también llamada pública). El primer grupo utiliza la misma clave para encriptar y desencriptar los mensajes y suelen ser más apropiados para aplicaciones que requieran una alta velocidad de transmisión de datos o que requieran ser implementados en sistemas con unos recursos limitados (criptografía ligera). El principal inconveniente es que, previamente a realizar la comunicación, tanto el transmisor como el receptor deben haber compartido la clave privada a través de un canal seguro. Para resolver este inconveniente, en los criptosistemas de clave asimétrica el receptor genera una clave pública (conocida por cualquiera) y una privada (solo conocida por él). La clave pública se usa para encriptar el mensaje mientras que la clave privada se utiliza para desencriptar el mensaje. Dado que la clave privada solo es conocida por el receptor, no es necesario realizar ningún intercambio de claves como sí hacía falta en los sistemas de cifrado simétrico. El principal inconveniente de estos cifradores es que suelen ser más lentos que los cifradores de clave simétrica. Por tanto, un esquema habitual en criptografía, consiste en utilizar un sistema de cifrado asimétrico para intercambiar las claves (que suelen consistir en una cantidad pequeña de datos) y utilizar un sistema de cifrado simétrico para transmitir el mensaje.

A su vez, los cifradores simétricos se pueden dividir en cifradores de bloques, donde el mensaje se divide en bloques y se encripta cada bloque individualmente (e.g. AES) y cifradores de flujo, que cifran cada bit individualmente. La principal ventaja de los cifradores de flujo es que no necesitan almacenar bloques de datos, por lo que suelen necesitar menor área de silicio para ser implementados. Además, no necesitan añadir bits extra para completar bloques incompletos (*padding*), como suelen necesitar los cifradores de bloques. Por tanto, los cifradores de flujo suelen ser, en general, más adecuados para comunicaciones a alta velocidad [2].

En este tipo de sistemas, partiendo de una clave secreta (semilla) y un determinado algoritmo, se genera una secuencia binaria (*keystream*) que es utilizada para encriptar el mensaje. En los últimos años, los algoritmos basados en sistemas caóticos han surgido como una buena posibilidad para generar los *keystreams*. Esto se debe a que estos sistemas presentan algunas propiedades intrínsecas como la ergodicidad, alta sensibilidad a las condiciones iniciales y un comportamiento aleatorio que están estrechamente relacionadas con las propiedades de confusión y difusión que fueron propuestas por Shannon como las principales propiedades que un cifrador debe tener para ser considerado seguro [3].

Por otro lado, algunos de los criptosistemas caóticos propuestos hasta la fecha, presentan algunos inconvenientes que los hacen inadecuados para comunicaciones seguras. Algunos de estos problemas son la ausencia de un espacio de claves bien definido y los malos resultados de aleatoriedad debido a la digitalización del algoritmo.

En este trabajo, se ha propuesto un nuevo cifrador de flujo basado en la digitalización de una aplicación caótica conocida como *Skew Tent Map*. Para aumentar la aleatoriedad de las secuencias generadas, el cifrador propuesto perturba las órbitas usando un registro de desplazamiento con realimentación lineal.

El cifrador se ha implementado en una FPGA Virtex 7 y se han analizado las secuencias generadas por este, demostrando que es seguro.

2. Algoritmo del cifrador de flujo

2.1. Skew Tent Map

El *Skew Tent Map* (STM), es una aplicación matemática, en la que, partiendo de un valor inicial y un parámetro , se genera una secuencia en la que cada elemento se obtiene a partir del anterior, siguiendo las posteriores ecuaciones:

$$f(x_i) = x_{i+1} = \begin{cases} x_i/\gamma & x_i \in [0,\gamma] \\ (1-x_i)/(1-\gamma) & x_i \in (\gamma,1] \end{cases} \quad (1)$$

Donde $x_0, \gamma \in (0,1)$. Esta aplicación caótica tiene la propiedad de que, para cualquier valor de x_0 y γ, presenta un comportamiento caótico, es decir, no tiene ventanas periódicas. Además, debido a su sencillez, se puede implementar fácilmente, utilizando pocos recursos y consiguiendo una alta velocidad de transmisión. Por ello, se ha elegido este algoritmo para ser utilizado en el cifrador de flujo propuesto.

2.2. Digitalización del Skew Tent Map

Cuando el STM se implementa con una precisión de *n* bits, solo existen 2^n posibles valores para cada y, dado un γ, cada x_i determina unívocamente el siguiente valor x_{i+1} Por tanto, las secuencias generadas por este algoritmo son periódicas y su periodo máximo es teóricamente 2^n. No obstante, los periodos que se obtienen normalmente son mucho menores que el periodo máximo. Para aumentar el periodo de estas secuencias y, por tanto, la seguridad del sistema, en este trabajo se propone modificar ligeramente los valores de cada x_i $\left(x_i \to \tilde{x}_i\right)$ y usar este valor modificado, x_{i+1} , para obtener el siguiente valor de la secuencia como $x_{i+1} = f(\tilde{x}_i)$. En nuestra propuesta, los valores de $\tilde{x}_i$ se obtienen combinando mediante una puerta XOR el bit menos significativo (LSB) de cada $x_i, x_i^{\vee}$, con el bit de salida de un LFSR, y_i^0 . Usando este método, se puede garantizar que el periodo de la secuencia sea mayor que un cierto numero usando la siguiente proposición [4].

Proposición: sean las secuencias binarias $a(k), b(k)$ y $c(k) = a(x) \oplus b(k)$, con $k \in \mathbb{N}$ y P_a, P_b y P_c y sus respectivos periodos. Si P_b es primo, entonces $P_c \geq mP_b$ con $m \geq 1$

Por tanto, si consideramos $c(k)$ como el LSB de $\tilde{x}_i, \tilde{x}_i^0$, $a(k)$, como el LSB de $\tilde{x}_i, \tilde{x}_i^0$, $a(k)$ y como los bits de salida y_i^0 de un LFSR con periodo primo P_b, el periodo de la secuencia { $\tilde{x}_i$ }será $P_c \geq P_b$. En este trabajo, se ha utilizado un LFSR de orden 61, lo que nos garantiza que los periodos de las secuen-

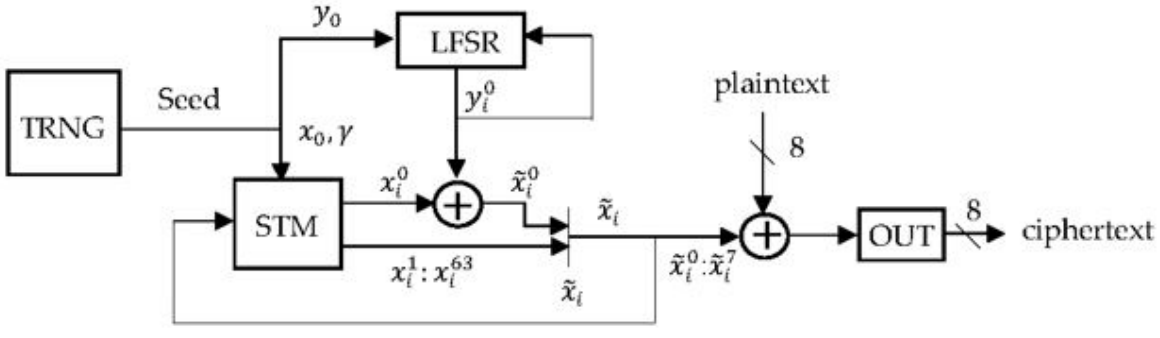


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema propuesto.

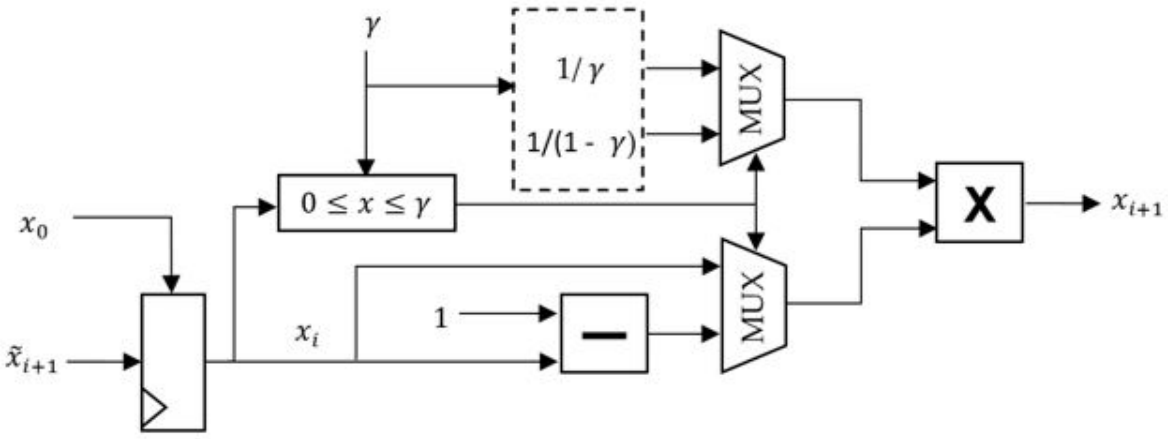


Figura 2. Diagrama de bloques del Skew Tent Map.

cias sean de, al menos . Con esta elección, se garantiza que el periodo es lo suficientemente grande para nuestros propósitos (una secuencia de periodo transmitida a 1 Gbps tardaría unos 73 años en comenzar a repetirse).

2.3. Algoritmo del cifrador de flujo

El esquema del cifrador de flujo propuesto se muestra en la figura 1. El principio de operación es el siguiente: partiendo de una semilla generada por un TRNG (*True Random Number Generator*), compuesta por un valor de *y* x_0, el sistema genera una secuencia pseudoaleatoria { $\tilde{x}_i$ } usando el algoritmo del STM (figura 2) y combinando con una puerta XOR el LSB de cada ,x_i, x_i^0 , con un bit generado por un LFSR, y_i^0 . Además, para aumentar la seguridad del sistema, solo se han usado los 8 bits menos significativos de cada $\tilde{x}_i$ ($\tilde{x}_i^0, \tilde{x}_i^1, \ldots \tilde{x}_i^7$)para encriptar el mensaje. De esta forma, se restringe la cantidad de información que un posible atacante podría obtener, por lo que se dificulta que un atacante pueda realizar con éxito ataques que traten de reconstruir el sistema caótico a partir de sus ecuaciones.

El receptor, también se compone de un STM y un LFSR. Usando los mismos parámetros iniciales, el receptor puede generar una secuencia pseudoaleatoria idéntica a la del emisor y, de esta forma, recuperar el mensaje original combinando con una puerta XOR dicha secuencia con el mensaje cifrado.

3. Resultados de la implementación

El sistema propuesto se ha implementado en una FPGA Virtex 7, usando una precisión de 64 bits. Dado que tanto como se encuentran en el intervalo , se pueden implementar fácilmente en

Tabla 1. Comparación del cifrador propuesto con otros cifradores caóticos publicados recientemente

Referencia	**[5]**	**[6]**	**[7]**	**[8]**	**Este trabajo**
Plataforma	Virtex 5	Virtex 6	Virtex 6	Virtex II	Virtex 7
Algoritmo caótico	*Logistic Map*	*Henon Map*	*Logistic Map*	*Lorenz System*	*Skew Tent Map*
LUTs	50	1600	643	2.718	805
Registros	48	64	160	791	70
DSPs	9	16	16	40[1]	16
Frecuencia (MHz)	43,2	25,7	93	15,5	134
Velocidad (Mbps)	43,2	25,7	1.500	124	1.072

Slices[2]	25	408	181	1.755	210
Mbps/slice	1,728	0,063	8,287	0,07065	5,105

[1] Virtex II utiliza multiplicadores 18 × 18 en lugar de DSPs. [2] El número de *slices* ha sido estimado a partir del número de registros y LUT, asumiendo que cada *slice* utiliza solo registros o LUT (lógica no relacionada).

la FPGA usando una aritmética de punto fijo. Los recursos utilizados por el transmisor, incluyendo el número total de LUT, registros y DSP así como la tasa de transmisión obtenida, se muestran en la tabla 1. Para comparar con otros trabajos, en esta tabla se muestran también los recursos y tasa de transmisión obtenidos por otros cifradores caóticos propuestos anteriormente implementados en plataformas similares.

Realizar una comparación directa entre estos sistemas no es sencillo ya que han sido implementados en plataformas distintas y es difícil analizar el nivel de seguridad proporcionado por cada propuesta. Por ejemplo, el criptosistema propuesto en [7] obtiene una mayor tasa de transmisión que el algoritmo propuesto (STM-LFSR) pero transmite 16 bits en vez de 8 tras cada iteración, lo que podría implicar una mayor vulnerabilidad. No obstante, se puede considerar que, en general, nuestro sistema presenta buenos resultados en comparación con otros criptosistemas caóticos propuestos.

Por último, se ha estimado el consumo de potencia. Para ello, se han usado los informes de consumo de potencia que proporciona el fabricante. Tras realizar simulaciones post-implementación, el consumo de potencia dinámico para una frecuencia de operación de 125 MHz (1 Gbps) ha sido 60 mW, que también se puede expresar como $60\ pJ/bit$..

Este valor es similar al consumo de potencia de otros cifradores ligeros implementados en FPGA como [9] donde el consumo de potencia por bit cifrado es de $155\ pJ/bit$ para un cifrador AES y $62\ pJ/bit$ para un cifrador *Present*.

4. Criptoanálisis

4.1. Análisis de aleatoriedad

Una de las principales propiedades que un cifrador de flujo debe tener para considerarse seguro es que, para cualquier semilla, la secuencia generada por el mismo sea indistinguible de una secuencia «verdaderamente aleatoria». Para verificar que el sistema propuesto satisface esta condición, se han generado varias secuencias con parámetros iniciales distintos y se han sometido a los test de aleatoriedad proporcionados por el NIST (*National Institute of Standards and Technology*) [10]. Además, para comprobar cómo afecta la inclusión del LFSR para aumentar los periodos a la aleatoriedad de las secuencias, se han generado algunas secuencias utilizando solo el STM. Tras analizar varias secuencias, se ha comprobado que nuestro cifrador es capaz de generar secuencias con buenas propiedades de aleatoriedad y que la presencia del LFSR aumenta considerablemente la

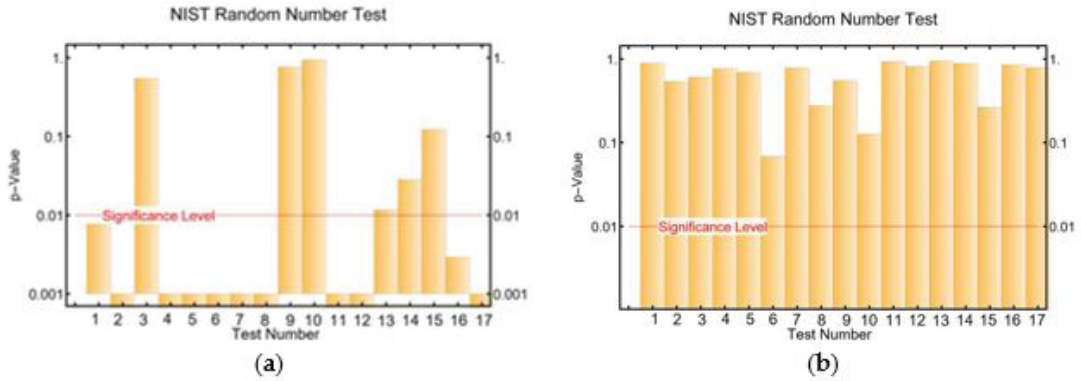


Figura 3. Resultados de los test NIST para una secuencia generada por (a) el algoritmo STM; (b) el algoritmo STM-LFSR.

aleatoriedad de un STM digitalizado. Como ejemplo, en la figura 3 se muestran los resultados de los test NIST para una secuencia generada utilizando solo el algoritmo STM junto a los resultados para una secuencia generada por el algoritmo propuesto STM-LFSR.

4.2. Tamaño del espacio de claves

Otra propiedad importante que debe tener un buen cifrador es que su espacio de claves sea lo suficientemente grande para prevenir ataques de fuerza bruta. El espacio de claves del sistema propuesto, κ, viene determinado por todos los posibles valores de γ, x_0 así como el estado inicial del LFSR, y_0. Por tanto, con la implementación propuesta, que utiliza una precisión de 64 bits y un LFSR de orden 61, el espacio de claves es: $\kappa=2^{(64+64+61)}=2^{189}$.

Aunque algunos algoritmos de encriptado populares como *Present* utilizan claves de 80 bits ($\kappa=2^{80}$), algunas directrices [11, 12] recomiendan que, para garantizar que el sistema sea seguro en los próximos años, el espacio de claves sea $\kappa\geq2^{112}$. Por tanto, se puede considerar que nuestro espacio de claves es lo suficientemente grande.

4.3. Sensibilidad con la clave y con el texto plano

Para evitar que un atacante pueda encontrar alguna relación entre la clave y los mensajes cifrados, es necesario que el criptosistema presente una alta sensibilidad con la clave. Gracias a la naturaleza caótica del STM, claves casi idénticas dan lugar a secuencias completamente distintas, por lo que se cumple este requisito.

Por otro lado, al tratarse de un cifrador de flujo, no existe sensibilidad con el mensaje, es decir, al cambiar un bit del mensaje, solo cambia un bit del texto cifrado. Esto hace que el sistema pueda ser vulnerable a ataques tipo *known plaintext*, si utiliza la misma clave para cifrar varios mensajes. Por tanto, para garantizar que este sistema sea seguro, es importante no reutilizar claves.

4.4. Reconstrucción del mapa

Otro ataque típico para algunos cifradores de flujo caóticos consiste en tratar de reconstruir la aplicación caótica, encontrando los parámetros iniciales analizando la secuencia de salida. Por ejemplo, si un atacante conoce el valor de x_i *y* x_{i+1} *y* , podría usar la ecuación (1) para $f(x_i)$ *y* $f(x_{i-1})$ y para calcular los valores de γ y x_{i-1}.

Sin embargo, para el sistema propuesto, es impracticable realizar este tipo de ataques ya que, al estar transmitiendo solo 8 bits de cada x_i, la información de la que podría disponer un atacante es muy limitada. Por tanto, aunque un atacante consiguiera obtener los últimos 8 bits de x_i *y* x_{i+1} y , quedarían $(2^{56})^2=2^{112}$ posibles valores de x_i *y* x_{i+1} que debería probar. Ademas, dado que tras cada iteración, el LSB de cada x_i se combina con la puerta XOR con el bit generado por un LFSR, la reconstrucción del mapa sería todavía más difícil. Por tanto, podemos concluir que no es posible reconstruir el mapa caótico en un tiempo razonable.

5. Conclusiones

En este trabajo, se ha propuesto un cifrador de flujo basado en una aplicación caótica, *Skew Tent Map*. Además, para aumentar los periodos medios de las secuencias y, por tanto, aumentar su aleatoriedad, el cifrador propuesto perturba las órbitas utilizando un LFSR.

El sistema ha sido implementado en una FPGA Virtex 7, obteniendo una tasa de transmisión de 1.072 Gbps utilizando 805 LUT, 70 registros y 16 DSP. Un análisis comparativo con otros cifradores caóticos propuestos anteriormente, demuestra la competitividad del sistema propuesto.

Las secuencias generadas por el cifrador propuesto han sido sometidas a los test de aleatoriedad del NIST. Todas las secuencias han pasado los test de aleatoriedad y, además, se ha demostrando que la in-

clusión del LFSR para perturbar las órbitas aumenta la aleatoriedad de las secuencias considerablemente. Otros métodos para aumentar la aleatoriedad de las órbitas, se han publicado recientemente en [13].

Por último se ha completado el criptoanálisis estudiando otros aspectos del sistema tales como el espacio de claves, la sensibilidad con la clave y el mensaje como su robustez frente a un ataque que trate de reconstruir el mapa. Por tanto, se puede concluir que el sistema propuesto es seguro.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por MINECO-FEDER (TEC2014-52840-R y TEC2017-85867-R) y beca FPU de Miguel García Bosque (FPU14/03523).

Referencias

1. *Katz J, Lindell Y. Introduction to Modern Cryptography. Chapman and Hall; 2008.*
2. *Stamp M. Information Security: Principles and Practice. New York: Wiley; 2011.*
3. *Shannon C E. A Mathematical Theory of Cryptography. Bell System Technical Mmo 1945; MM. 45-110-02.*
4. *Kocarev L, Lian S. Chaos Based Cryptography. Springer; 2009.*
5. *Dabal P, Pelka R. A chaos-based pseudo-random bit generator implemented in FPGA device. Proceedings of the International Symposium Design and Diagnostics of Electronics Circuits and Systems (DDECS). 2011; 151-154.*
6. *Dabal P, Pelka R. FPGA implementation of chaotic pseudo-random bit generators. Proceedings of the 19th International Conference Mixed Design on Integrated Circuits and Systems (MIXDES). 2012; 260-264.*
7. *Pande A, Zambreno J. A chaotic encryption scheme for real-time embedded systems: Design and implementation. Telecommun. Syst. 2013; 52: 515-561.*
8. *Azzad M S, Tanougast C, Sadoudi S, Dandache A. Real-time FPGA implementation of Lorenz's chaotic generator for ciphering telecommunications. Proceedings of the IEEE International Circuits and Systems and TAISA Conference. 2009; 1-4.*
9. *Banik S, Bogdanov A, Regazzoni F. Exploring the energy consumption of lightweight blockciphers in FPGA. Proceedings of the International Conference on ReconFigurable Computing and FPGAs (ReConFig). 2014.*
10. *Rukhin A, Soto J, Nechvatal J, Smid M, Barker E, Leigh S, Levenso M, Vangel M, Banks D, Heckert A, Banks D L. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. NIST Special Publication 800-22 Rev.1a. 2010.*
11. *ENISA. Algorithms, Key Size and Parameters Report. 2014. Disponible online: www.enisa.europa.eu/activities/identity-and-trust/library/deliverables/algorithms-key-size-and-parameters-report-2014*
12. *Barker E, Roginsky, A. Transitions: Recommendation for Transitioning the Use of Cryptographic Algorithms and Key Lengths. NIST Special Publication 800-131 A. 2011.*
13. *Garcia-Bosque M, Pérez-Resa A, Sánchez-Azqueta C, Celma S. A new simple technique for improving the random properties of chaos-based cryptosystems. AIP Advances. 2018; 8(3): 1-11.*

Técnicas de inteligencia artificial aplicadas al reconocimiento de personas a través de la marcha

Dranca, Lacramioara[1,*], Lozano Rojo, Álvaro[1,3], Vigara, Rubén[1,3], Bernad, Jorg [2], Huitzil, Ignacio[2] y Bobillo, Fernando[2]

[1] Centro Universitario de la Defensa Zaragoza. {licri, alozano, rvigara}@unizar.es: (DL, LRA, VR).

[2] Universidad de Zaragoza. {jbernad, ihuitzil, fbobillo}@unizar.es: (BJ, HI, BF).

[3] I.U.M.A. Universidad de Zaragoza.

Email:

* Autor principal y responsable del trabajo; licri@unizar.es: (DL).

Resumen

El problema del reconocimiento de personas a través de la marcha consiste en la clasificación de manera automática de personas, analizando datos relacionados con su forma de andar. El análisis de la marcha considera medidas objetivas como la velocidad, ángulos de articulaciones, etc. En los últimos años se han publicado varios trabajos que han abordado el reconocimiento de personas a partir de datos recogidos con sensores Kinect, con resultados prometedores. Sin embargo, estas propuestas son preliminares y presentan notables limitaciones. Este tipo de reconocimiento tiene importantes ventajas frente a otros reconocimientos basados en características biométricas, al tratarse de una técnica no intrusiva que se podría realizar desde cierta distancia y que no requiere colaboración directa de la persona a reconocer. Dentro del ámbito de la seguridad, el reconocimiento a través de la marcha podría ser utilizado tanto en procesos de autenticación como en tareas de videovigilancia. En este trabajo nos proponemos evaluar la posibilidad de utilizar métodos basados en redes neuronales convolucionales para el reconocimiento automático de individuos a partir de datos obtenidos con un sensor Kinect. Utilizamos una base de datos de 90 individuos que hemos grabado para tal propósito. Los resultados obtenidos se comparan con los obtenidos empleando el método del vecino más cercano (*k-nearest neighbour*), el método que mejores resultados ha dado hasta la fecha. Concluimos que las redes neuronales convolucionales son apropiadas para el problema estudiado

Palabras clave

Kinect, redes neuronales convolucionales, análisis de la marcha, reconocimiento de personas.

1. Introducción

El problema del reconocimiento de personas a través de la marcha consiste en clasificar de manera automática personas analizando datos relacionados con su forma de andar. Este análisis de la marcha incluye realizar medidas objetivas de la marcha como la velocidad, ángulos de articulaciones, etc. La evolución de estas medidas se suele analizar durante las diferentes fases de lo que se conoce como el *ciclo de la marcha*. El ciclo de la marcha es la secuencia de acontecimientos que tiene lugar desde el contacto de un talón con el suelo, hasta el siguiente contacto del mismo talón con el suelo [1].

El reconocimiento a través de la marcha tiene múltiples aplicaciones, incluida la medicina (p. ej. como soporte automático en el diagnóstico de enfermedades neurológicas) y seguridad (p. ej. en tareas de autenticación y vigilancia). La autenticación de un individuo suele depender de tres factores: algo que el individuo conoce (p. ej. una contraseña), algo que el individuo posee (p. ej. un dispositivo o una tarjeta de identidad) y algo que el individuo es (p. ej. una huella dactilar). El reconocimiento a través de la marcha entraría en este último apartado, con clara ventaja frente a otros reconocimientos a través de medidas biométricas. El reconocimiento a través de la marcha es un método completamente no-invasivo, que funciona desde cierta distancia con el individuo, sin necesidad de contacto físico como es el caso de la huella dactilar. Además, la forma de andar de una persona es difícil de imitar por otra.

Hay una larga trayectoria de investigación del reconocimiento de personas a través de la marcha utilizando grabaciones vídeo [2]. La aparición en el mercado en los últimos años de cámaras 3D (como Kinect, Orbbec, Intel RealSense, etc.) favorecen nuevas líneas de investigación en el reconocimiento a través de la marcha. En este trabajo nos hemos basado en el sensor Kinect. Este integra en realidad varios sensores: uno de profundidad, una cámara RGB, un *array* de micrófonos y un sensor de infrarrojos (emisor y receptor). Además el dispositivo provee un modelo del esqueleto humano en un sistema cartesiano de coordenadas.

Hay varios trabajos que han abordado el problema del reconocimiento a través de la marcha utilizando el sensor Kinect. Uno de los primeros trabajos es [3], donde los autores obtienen resultados prometedores utilizando un clasificador Naive Bayes y un conjunto de características obtenido a partir de 9 personas. Un enfoque en tiempo real se presenta en [4]. En ese caso un clasificador basado en el método del vecino más cercano (KNN) obtuvo alrededor del 80 % de precisión para 10 personas. En [5] se propone un marco para el reconocimiento basado en la marcha, usando un conjunto de datos de Kinect disponible públicamente con 30 personas. Los autores extraen 16 vectores del conjunto de datos y utilizan varias pruebas de semejanza y logran una tasa de identificación del 93,29 %. En un trabajo posterior [6] los autores mejoran sus primeros resultados y alcanzan un 95,67 % de precisión sobre un conjunto de datos capturado de 30 personas utilizando el Kinect V2. La misma base de datos ha sido utilizada en [7] utilizando un enfoque basado en ontologías difusas y el método KNN, obteniendo un 89,03 % de precisión.

En [8] los autores abordan el reconocimiento de personas con aplicación a la seguridad en aeropuertos. Para ello utilizan 60 grabaciones de dos cámaras Kinect para capturar datos de la vista frontal y de espaldas, sobre los cuales aplican una estrategia de clasificación jerárquica con tres niveles de detección: biométrico, cinemático y de profundidad y logran una tasa de reconocimiento de 80 %. El método de clasificación empleado es de nuevo KNN.

Otro enfoque de reconocimiento de personas a partir de datos proporcionados por una cámara Kinect es utilizando grabaciones con pose lateral. Uno de los primeros trabajos en este sentido es [9] con 20 sujetos utilizados para el reconocimiento. Los autores proponen para el reconocimiento características horizontales (para medir cambios de distancias entre diferentes articulaciones en el plano horizontal) y verticales (con referencia al suelo), junto con el método del vecino más cercano y obtienen un tasa de reconocimiento de 92 %. Una propuesta mejorada, basada en este trabajo, encontramos en [10], donde los autores utilizan 140 sujetos y un conjunto de características mejorado y obtienen una tasa de acierto de 95,4 %. De nuevo el método KNN es el utilizado para la clasificación junto con la distancia Manhattan, reforzados por un método de subespacio aleatorio de características y un esquema de votación mayoritaria.

Tal como se puede apreciar, KNN, en muchas ocasiones junto con la distancia Manhattan, es el método más utilizado para el problema que nos ocupa.

Las redes neuronales [11] son modelos computacionales que consisten en muchas unidades simples y conectadas llamadas neuronas, cada uno produciendo una secuencia de activaciones de valor real. Las neuronas de entrada se activan a través de sensores percibiendo el entorno, otras neuronas se activan a través de conexiones ponderadas de neuronas previamente activas. En los últimos años las redes neuronales han recibido una especial atención con el enfoque del aprendizaje profundo, demostrando su superioridad en problemas de inteligencia artificial frente a otros métodos de aprendizaje automático [11]. Sin embargo, a pesar de sus ventajas en otros ámbitos, hasta donde conocemos, no han sido utilizadas para el problema del reconocimiento de personas a partir de la marcha con datos obtenidos de cámaras 3D.

En este trabajo nos proponemos analizar la viabilidad de utilizar el método de las redes neuronales, concretamente las redes neuronales convolucionales al problema del reconocimiento de personas a partir de la marcha con datos obtenidos de una cámara Kinect.

2. Desarrollo

2.1. Captura de datos y detección de pasos

La cámara Kinect integra varios sensores –tal como se ha mencionado antes–, de los que se obtienen varios puntos correspondientes a articulaciones del esqueleto humano. Estos puntos se recuperan como puntos en un espacio tridimensional donde el origen de coordenadas es el centro del sensor Kinect.

En el proceso de captura de datos, hemos utilizado el sensor Microsoft Kinect Versión 2, que se colocó en un pasillo a 1 m por encima del suelo. Se definió un camino donde cada sujeto que participaba en las grabaciones caminaba de forma normal, en línea recta y mirando hacia la cámara. Cada sujeto realizó el paseo por delante de la cámara diez veces. De este modo se grabaron 10 secuencias por individuo, cada secuencia incluyendo entre 69 y 163 fotogramas y correspondiendo a 3-4 pasos del individuo. En las grabaciones participaron 91 individuos, aunque por razones de calidad de las grabaciones, en este trabajo hemos utilizado solo los datos de 90 de ellos.

En la figura 1 se pueden apreciar varios fotogramas con las articulaciones del esqueleto humano detectadas por el sensor Kinect en una secuencia grabada de una persona andando. Tal como se aprecia en la figura, Kinect detecta 25 puntos que conforman el esqueleto.

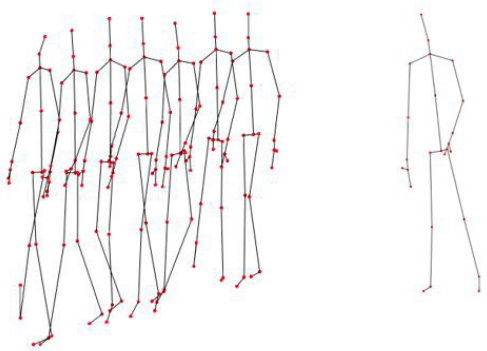


Figura 1. Ejemplo de esqueletos capturados con Kinect. Parte izquierda secuencia de esqueletos en desplazamiento. Parte derecha esqueleto vista frontal.

A continuación, los datos capturados han sido preprocesados. En esta etapa se ha realizado la segmentación de las secuencias en pasos y se han eliminado algunos datos con ruido. Para detectar los pasos dentro de una secuencia, se ha utilizado una estrategia basada en los máximos locales en la serie temporal de la distancia entre los pies. Se han aislado dos tipos de pasos: los que la pierna izquierda se desplaza y los que la pierna derecha se desplaza. A cada esqueleto se ha aplicado una rotación para alinearlo en el plano frontal con la posición de las caderas.

2.2. Identificación de individuos

Las *redes neuronales convolucionales* (CNN en sus siglas en inglés) son unas redes *feed-fordward* derivadas del perceptrón multicapa clásico especialmente adecuadas para la clasificación de imágenes. La idea fundamental detrás de ellas es reducir el número de parámetros dentro del perceptrón al aplicar los mismos núcleos de convolución (*kernels*) y reducciones locales de dimensión a lo largo de toda la imagen, ya que las características de una imagen son *locales*. El algoritmo de aprendizaje «decide» qué *kernels* deben aplicarse de entre los de un tamaño (pequeño) fijo. De esta manera, el número de parámetros a estimar es menor que en el perceptrón clásico, donde deberían estimarse tantos valores como el producto del tamaño en pixeles de la imagen y la segunda capa seleccionada.

La estructura general de las redes es una o varias capas de convolución seguidas de unas capas de reducción, hasta obtener un vector de características que la propia red elige, terminado con un perceptrón multicapa que actúa sobre este vector.

En nuestro caso, para construir la imagen sobre la que haremos actuar la CNN procederemos como sigue. La figura 2 describe el «esqueleto» de puntos capturados por la Kinect 2. Junto a él se muestra un recorrido de vértices por el «exterior» del esqueleto. Para cada fotograma concreto, asignando a cada vértice o nodo de este recorrido una o varias magnitudes geométricas (longitudes, ángulos, coordenadas,...) asociadas a dicho vértice se va construyendo un vector del tamaño del recorrido.

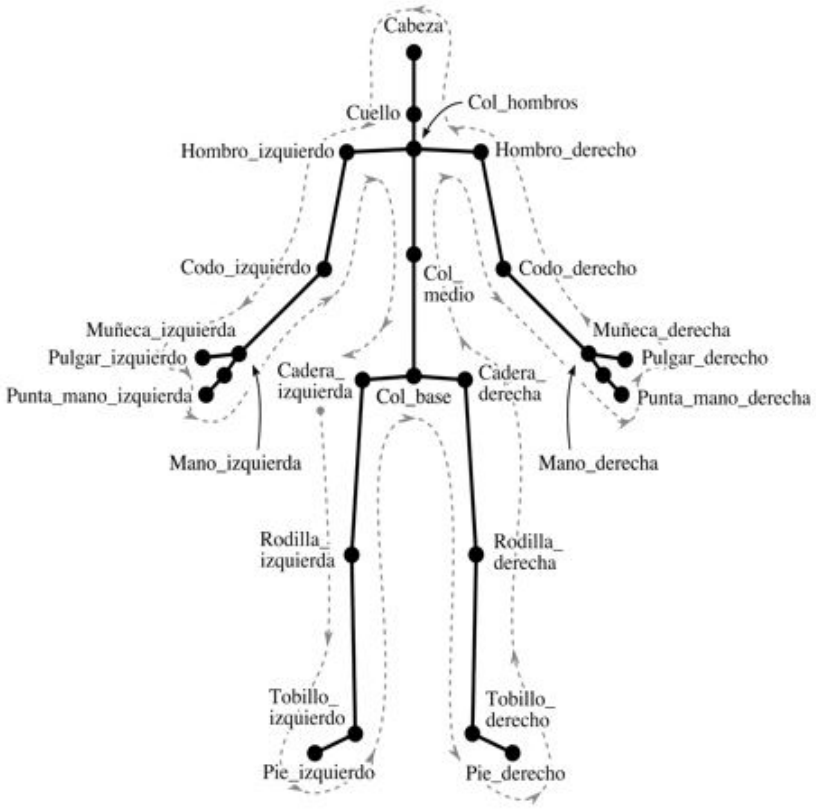


Figura 2. Los puntos del esqueleto capturado por Kinect junto al recorrido para construir las características de clasificación.

Por ejemplo, podemos asignar a un vértice del recorrido el ángulo que forman las dos aristas que confluyen en él según el orden descrito por el propio camino, o cada entrada de dicho vector podrían ser las propias coordenadas del punto normalizadas adecuadamente. Así, las entradas del vector podrían tener más de un «canal». Apilando ordenadamente los vectores asociados a cada fotograma, obtenemos una imagen con tantas filas como fotogramas capturados y columnas como la longitud de los vectores. El número de canales de dicha imagen corresponderá a la longitud de la característica seleccionada en cada nodo (véase la figura 3).

En este trabajo hemos usado las siguientes características:

tipo1. Ángulos que forman las dos aristas que confluyen en cada punto del esqueleto

tipo2. Coordenadas de los puntos (x, y, z), teniendo como origen de las coordenadas la base de la columna vertebral («Col_base» en la figura 2).

La CNN que hemos configurado para trabajar con imágenes de pasos ha tenido dos capas convolucionales. La primera capa filtra la imagen de entrada (redimensionada a 32x50) con 8 *kernels* de dimensión 32x3. Su capa de agrupación correspondiente es una capa de reducción máxima de agrupamiento en vecindades de 1x2. La segunda capa utiliza 16 *kernels* de 1x5 con una capa de agrupación similar a la primera capa de agrupación. La salida es conectada a un nivel denso de 160 neuronas que a su vez conectan con la salida final de la red de una dimensión igual a las clases a clasificar (90).

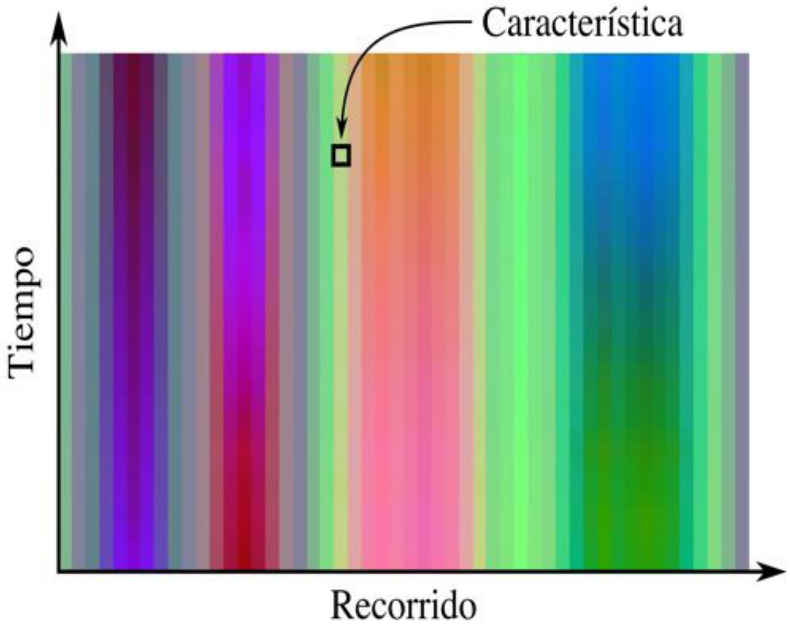


Figura 3. La «imagen» de un paso de un sujeto. En este caso la entrada a la red CNN es un vector tridimensional a partir de características tipo 2, y por lo tanto la visualizamos como una imagen RGB.

3. Resultados y discusión

Para la evaluación del método propuesto hemos dividido los datos en mitad como conjunto de entrenamiento y mitad como conjunto para evaluar la precisión de cada modelo. La tabla 1 recoge los diferentes experimentos realizados. Se han entrenado varias redes CNN, tanto con características tipo1, como con características tipo2 o combinación de ambas. También se han realizado pruebas donde a la(s) capa(s) inicial(es) de característica(s) se ha(n) añadido capa(s) a partir de un recorrido en «espejo» (donde los puntos de un lado del cuerpo se reemplazan por los puntos del otro lado del cuerpo). Además se ha evaluado la precisión del método KNN para los diferentes tipos de características. En este caso las características se han presentado como vector unidimensional, donde la dimensión del tiempo se ha reducido a través de la media.

Método	Características	Precisión
CNN	tipo1	82,54 %
CNN	tipo2	91,34 %
CNN	tipo1 (con canal en «espejo»)	87,08 %
CNN	tipo2 (con canales en «espejo»)	94,42 %
CNN	tipo1 + tipo2	94,71 %
KNN	tipo1	87 %
KNN	tipo2	97 %
KNN	tipo1 + tipo2	98 %

Tabla 1. Resultados de clasificación de individuos a partir de pasos

Tal como se puede apreciar en la tabla 1, las características tipo2 funcionan mejor con ambos métodos. Sin embargo, las características tipo1 son más independientes de la talla del individuo que las características tipo2 y más propias de la dinámica de andar. Resultados en torno al 87 % con ambos métodos demuestran que la forma de andar sí puede caracterizar a una persona.

Los primeros dos resultados del método CNN se quedan por debajo del KNN. Sin embargo, añadir canales en «espejo» mejoran los primeros resultados, acercándose en ocasiones al método KNN. En el caso de las CNN, hay que destacar que los modelos se entrenan con datos de pasos de ambos tipos, sin distinción. Entrenar modelos diferentes para según qué pierna se desplace en el paso debería mejorar estos primeros resultados. Por la naturaleza del método KNN, esta estrategia no debería afectar a sus resultados. Nótese que los porcentajes de la tabla 1 corresponden a la probabilidad de acertar el individuo correspondiente evaluando un único paso. Si consideramos una secuencia completa de un individuo compuesta por varios pasos, y combinamos los resultados que se obtienen aplicando los clasificadores a cada paso de la secuencia empleando estrategias de votación, con ambos métodos se obtienen resultados superiores al 99 % de precisión. Es decir, a partir de una grabación completa de un individuo del grupo (compuesta por varios pasos), hay más de un 99 % de probabilidades de acertar su identidad, tanto con el método KNN como con las CNN.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto un nuevo método basado en las redes neuronales convolucionales para el reconocimiento de individuos a través de la marcha a partir de datos del esqueletos capturados con un sensor Kinect. Para ello se ha utilizado una base de datos propia a partir de 90 individuos. Los primeros resultados son prometedores, con posibilidades de mejora y comparables con el método con mejores resultados hasta la fecha (el vecino más cercano). Las redes neuronales convolucionales son apropiadas para el problema estudiado y el método propuesto podría ser de aplicabilidad a otros problemas donde se realiza el análisis de la marcha.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CUD2017-17 (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza) y TIN2016-78011-C4 (Ministerio de Economía y Competitividad). I. Huitzil ha sido parcialmente financiado por Universidad de Zaragoza -Santander Universidades (Ayudas de Movilidad para Latinoamericanos - Estudios de Doctorado).

Referencias

1. *Marco-Sanz C. Cinesiología de la marcha humana normal, Universidad de Zaragoza [Internet]. [Retrieved 2018 Sep 5]. Available from: http://wzar.unizar.es/acad/cinesio/Documentos/Marcha%20humana.pdf*

2. *Whittle MW. Clinical gait analysis: A review. Hum Mov Sci. 1996.*
3. *Preis J, Kessel M, Werner M, Linnhoff-Popien C. Gait Recognition with Kinect. International Workshop on Kinect Pervasive Comput Pervasive. 2012.*
4. *Jiang S, Wang Y, Zhang Y, Sun J. Real time gait recognition system based on Kinect skeleton feature. In: Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2015.*
5. *Kastaniotis D, Theodorakopoulos I, Theoharatos C, Economou G, Fotopoulos S. A framework for gait-based recognition using Kinect. Pattern Recognit Lett. 2015.*
6. *Kastaniotis D, Theodorakopoulos I, Economou G, Fotopoulos S. Gait based recognition via fusing information from Euclidean and Riemannian manifolds. Pattern Recognit Lett. 2016.*
7. *Bobillo F, Dranca L, Bernad J. A fuzzy ontology-based system for gait recognition using kinect sensor. Proceedings of the 11th International Conference on Scalable Uncertainty Management (SUM 2017).Vol.10564 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 397-404. 2017.*
8. *Chattopadhyay P, Sural S, Mukherjee J. Frontal gait recognition from incomplete sequences using RGB-D camera. IEEE Trans Inf Forensics Secur. 2014.*
9. *Ahmed M, Al-Jawad N, Sabir A. Gait recognition based on kinect sensor. In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2014.*
10. *Yang K, Dou Y, Lv S, Zhang F, Lv Q. Relative distance features for gait recognition with Kinect. J Vis Commun Image Represent. 2016.*
11. *Schmidhuber J. Deep Learning in neural networks: An overview. Neural Networks. 2015.*

Desanonimización y categorización de servicios ocultos de la red Tor

Rodríguez, Ricardo J.[1] y García de Quirós, Jorge[2]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Academia General Militar, Carr. de Huesca s/n, 50090 Zaragoza. Correo electrónico: rjrodriguez@unizar.es (R.J. Rodríguez).

[2] Dpto. de Informática e Ingeniería de Sistemas, Universidad de Zaragoza, María de Luna 1, 50018 Zaragoza. Correo electrónico: 680258@unizar.es (J. García de Quirós).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: rjrodriguez@unizar.es (R.J. Rodríguez).

Resumen

La red Tor garantiza el anonimato y la privacidad de sus usuarios durante la navegación por Internet, mediante el establecimiento de circuitos entre los diferentes nodos de la red. Además del uso de la red Tor con fines lícitos, existen usuarios que se amparan en la propia anonimicidad proporcionada por la red Tor para cometer actividades ilícitas. Por ejemplo, existen páginas web dentro de la red Tor como la venta de drogas, documentación falsa, armas, o pornografía infantil. Estos servicios (comúnmente conocidos como servicios de la *dark web*) se denominan servicios ocultos, según la terminología Tor, estando únicamente accesibles a través de Tor. Sin embargo, muchos de estos servicios ocultos pueden presentar alguna mala configuración o elementos suficientemente identificativos que ayuden a localizar el origen real del servicio y por tanto, se pueda proceder a su eliminación y detención del autor. En este estudio, se presenta un sistema automático que recopila diversas fuentes de direcciones .onion, accede a ellas y las analiza con el objetivo de encontrar elementos que sirvan para su desanonimización. Además, se ha realizado un estudio estadístico sobre la temática y el idioma de estos sitios.

Palabras clave

Tor, privacidad, servicios ocultos, desanonimización.

1. Introducción

La red Tor [1] (*The Onion Router*) es una red formada por nodos puestos a disposición de los usuarios voluntariamente para mejorar su anonimato y privacidad durante la navegación por Internet. El proyecto Tor se mantiene por una organización sin ánimo de lucro encargada de gestionar el desarrollo de la aplicación y de los protocolos de la red Tor (o simplemente *protocolo Tor*, por simplificar), así como de controlar el estado de la red.

Originalmente la red Tor fue diseñada por el U.S. Naval Research Laboratory con la idea de proteger las comunicaciones gubernamentales. Hoy en día, se usa por una amplia comunidad de individuos y con diferentes propósitos, como por ejemplo periodistas para contactar con sus fuentes de manera anónima, activistas para denunciar abusos en zonas de conflicto, miembros y fuerzas de los cuerpos de seguridad de los estados para llevar a cabo operaciones encubiertas o de vigilancia, e incluso propósitos militares.

La red Tor proporciona un servicio de comunicación anónima de baja latencia basado en circuitos. En concreto, se forma un circuito virtual entre un nodo origen y un nodo destino garantizando así que las organizaciones y usuarios puedan compartir información sin comprometer su privacidad. Este circuito virtual se compone de numerosos nodos dentro de la red Tor que retransmiten el tráfico entre ellos, de modo que finalmente se consiguen comunicar el nodo origen y el nodo destino, pero a través de múltiples «saltos» intermedios (cada uno de estos saltos es un nodo de la red). Estos circuitos virtuales garantizan que no hay una conexión directa entre cliente y servidor, sino a través de los diferentes nodos de la red donde cada uno conoce únicamente a su siguiente nodo en la cadena. El objetivo de estos circuitos virtuales es ocultar mediante las retransmisiones intermedias la dirección IP de los partícipes en la comunicación. Recuérdese que una dirección IP es un valor numérico que se asigna a cada dispositivo cuando se conecta a Internet, permitiendo identificarlo de manera inequívoca.

Para mantener la privacidad en la navegación, todo el tráfico que discurre por un circuito Tor se encuentra cifrado. Además, cada par de nodos que se comunican dentro del circuito se mandan también entre ellos el tráfico cifrado punto a punto. Es decir, el tráfico de red se va cifrando por capas. Es por ello que el tipo de encaminamiento que realiza la red Tor recibe el nombre de *encaminamiento de cebolla*.

La propia red Tor permite que los usuarios publiquen páginas web únicamente accesibles a través de la red Tor, y no accesibles por la red de Internet convencional. Estos sitios se conocen como *servicios ocultos* de la red Tor, comúnmente conocidos como sitios de la *dark web* [2, 3]. La dirección de dominio de estos servicios es .onion, aprobada oficialmente por la IETF/IANA en 2015.

A pesar de que la red Tor y sus servicios ocultos tienen un objetivo y usos legítimos, desgraciadamente en ocasiones se han explotado con objetivos ilegítimos. El caso más conocido es *SilkRoad*, un mercado negro online creado en 2011 y clausurado dos años más tarde por el FBI que operaba en la red Tor, mayormente conocido por la venta de drogas ilegales a través de Internet [4]. Además de mercados de drogas, en la red Tor existen otros servicios ocultos orientados hacia otras actividades ilícitas, como venta de documentos falsificados, venta de armas o radicalización terrorista. Es por tanto de interés disponer

de mecanismos que permitan una rápida actuación de las fuerzas y cuerpos de seguridad del Estado (FCSE) para la identificación de los posibles criminales detrás de estos servicios ocultos.

Este trabajo presenta un sistema automático que recopila direcciones .onion de diferentes fuentes y accede a cada una de ellas para analizarlas, distinguiendo elementos para su desanonimización. Además, se ha realizado un estudio estadístico sobre la temática y el idioma de los sitios recopilados. De las 1.796 direcciones recopiladas y con acceso, se ha conseguido localizar un dispositivo similar para 346 de ellas. Respecto al estudio estadístico, se han detectado servicios ocultos relacionados con el terrorismo, la pornografía, la venta de drogas y las criptomonedas, mayoritariamente en lengua inglesa.

Trabajo relacionado. Diversos tipos de aproximaciones se han utilizado con éxito para desanonimizar un servicio oculto mediante la participación directa en el circuito virtual [5] o para identificar el servicio oculto al que se conecta un usuario mediante análisis del tráfico [6, 7]. Una categorización más exhaustiva de los servicios ocultos de Tor se presenta en [8]. Similar a este trabajo, en [9] se analizan 6.426 direcciones .onion, estableciendo conexión con 1.974 y con un porcentaje de éxito en la desanonimización del 5 %.

Implicaciones éticas. Conviene destacar que se ha accedido a los servicios ocultos de manera automática y solo a su página principal, descartando cualquier contenido gráfico y procesando solo texto, evitando así la descarga de contenido ilegal y no deseado. El sistema desarrollado sirve a las FCSE a encontrar servicios ocultos con fines ilegítimos, evitando que actúen bajo el amparo del anonimato sobre la red Tor.

Este artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se describe el funcionamiento de los servicios ocultos en más detalle. Después, la sección 3 describe el sistema desarrollado para la desanonimización. La discusión de los resultados de las direcciones .onion capturadas se explica en la sección 4. Por último, la sección 5 concluye el artículo.

2. Los servicios ocultos de la red Tor

Los servicios ocultos se introdujeron en el año 2004 como un mecanismo que permitía la anonimicidad de quien responde a las peticiones de un cliente dentro de la red Tor. Los servicios ocultos proporcionan servicios de Internet (e.g., páginas web, conexiones SSH, servidores FTP, etc.) de manera similar a un servidor convencional, pero con la peculiaridad de que los clientes no conocen la dirección IP del servidor. Para lograr este tipo de conexión, la conexión entre el servicio oculto y el cliente sucede a través de un punto de cita (*rendezvous*).

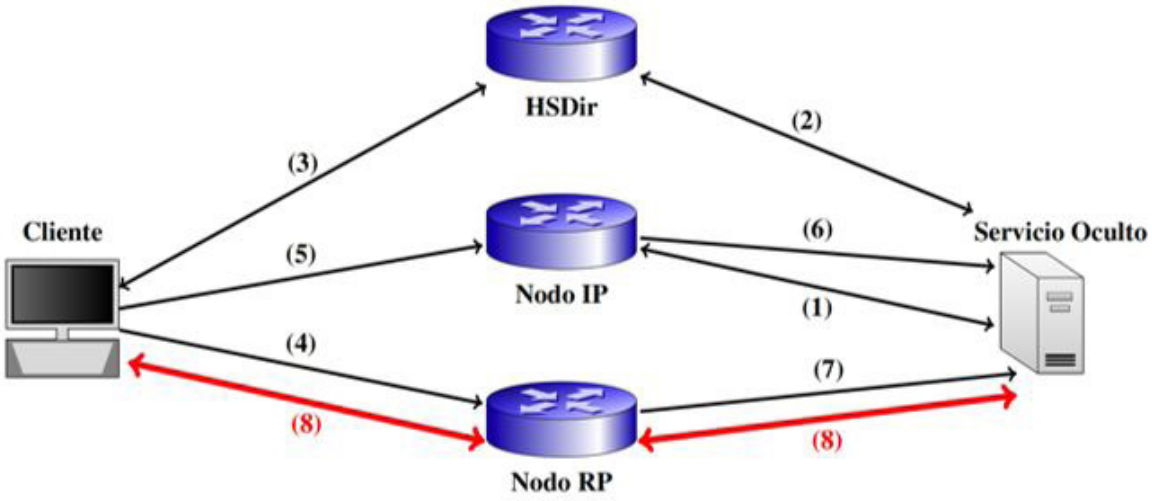


Figura 1. Funcionamiento de los servicios ocultos de la red Tor.

En concreto, la forma de conexión con los servicios ocultos se ilustra en la figura 1. Nótese que las conexiones que se ilustran en la figura son circuitos virtuales. En primer lugar, el servicio oculto escoge aleatoriamente una serie de nodos en la red Tor, llamados puntos de introducción (*nodo IP*), y establece un circuito virtual con ellos (paso 1). Después (paso 2), el servicio oculto comunica su descriptor y la lista de nodos IP escogidos a una lista de nodos directorio de servicio oculto (*HSDir*). El descriptor del servicio oculto está formado por una cadena no nemotécnica codificada en base 32. Para conectarse al servicio, el cliente solo tiene que proveer el nombre de dominio del mismo, que es el identificador del servicio oculto junto con el dominio .onion. El cliente solicitará a los HSDir los nodos IP del servicio oculto (paso 3). Tras ello, escogerá de manera aleatoria un nodo de la red Tor para hacer de nodo *rendezvous* (*nodo RP*; paso 4) y lo comunicará a uno de los nodos IP (paso 5). El nodo IP mandará la información al servicio oculto (paso 6), quien establecerá un circuito virtual con el nodo *rendezvous* seleccionado anteriormente (paso 7). A partir de entonces, el cliente y el servicio oculto se comunican a través de este nodo *rendezvous* (paso 8).

3. Sistema desarrollado para captura de direcciones .onion y desanonimización

Esta sección explica el sistema desarrollado para la captura de direcciones .onion y los datos relevantes usados para la desanonimización. Este sistema, mostrado esquemáticamente en la figura 2, realiza dos tareas diferenciadas:

- **Recopilación de direcciones .onion.** Las direcciones que permiten el acceso a los servicios ocultos a través de Tor no están publicadas en ningún documento de la red Tor, así que hay que obtenerlas por otros medios. Esta parte del sistema, denominada *Crawler*, establece conexiones a través de un cliente Tor (*Onion proxy*) con los servicios ocultos asociados a un repositorio de direcciones .onion dadas, almacenando información sobre ellos en una base de datos MySQL. Además, de manera automática se analiza la página principal del servicio oculto en busca de nuevas direcciones .onion que serán procesadas posteriormente.

La información recopilada para la desanonimización han sido las cabeceras del servicio web proporcionado. Estas cabeceras contienen información adicional sobre el servicio, como información del servidor, lenguaje del contenido, y otras características técnicas del servidor. Adicionalmente, también se han recopilado los certificados SSL/TLS dado que suministran más información de interés, como la identidad del propietario del certificado, la firma de la entidad que lo expide, su fecha de validez, etc. Por último, el código HTML de la página principal del servicio oculto ha sido usado para la categorización del tipo de actividad ofertado por el servicio oculto.

- **Desanonimización y detección de actividades ilegítimas de servicios ocultos**. La otra parte del sistema se encarga del análisis de los datos recopilados anteriormente. Así, *Onion tool* extrae las características que permiten acotar el número de dispositivos conocidos asociados a un servicio oculto. A este respecto, se ha utilizado Shodan, un motor de búsqueda de metadatos (conjunto de información que da información sobre otros datos) de servicios en todo el espectro de direcciones IPv4 ubicados en puertos accesibles en Internet. Para la obtención de la combinación de cabeceras que acote un menor número de dispositivos para cada servicio oculto se ha desarrollado un algoritmo voraz que permite encontrar dispositivos en Shodan con cabeceras de sus servicios muy similares o iguales a los servicios ocultos encontrados en el punto anterior.

Esta parte del sistema también detecta el tipo de actividades ofrecidas por los servicios ocultos analizados. Para ello, se ha definido un diccionario con un conjunto de términos relacionados con actividades ilegítimas en lengua inglesa. En concreto, se han considerado las categorías de drogas (*marijuana*, *cocaine*, *meth*, etc.), contenido sexual (*porn*, *pedophile*, *anal*, etc.), criptomonedas (*bitcoin*, *ethereum*, *litecoin*, etc.) y terrorismo (*terrorism*, *yihad*, *IED*, etc.). El análisis realizado consiste en contar el número de apariciones de palabras de estos diccionarios contenidas en la página principal del servicio oculto. De

manera adicional también se ha detectado el lenguaje utilizado en el servicio oculto usando herramientas de procesamiento de lenguaje natural (como la librería NLTK).

Toda la información extraída de los servicios ocultos puede consultarse a partir de la herramienta *Onion query*, desarrollada adicionalmente.

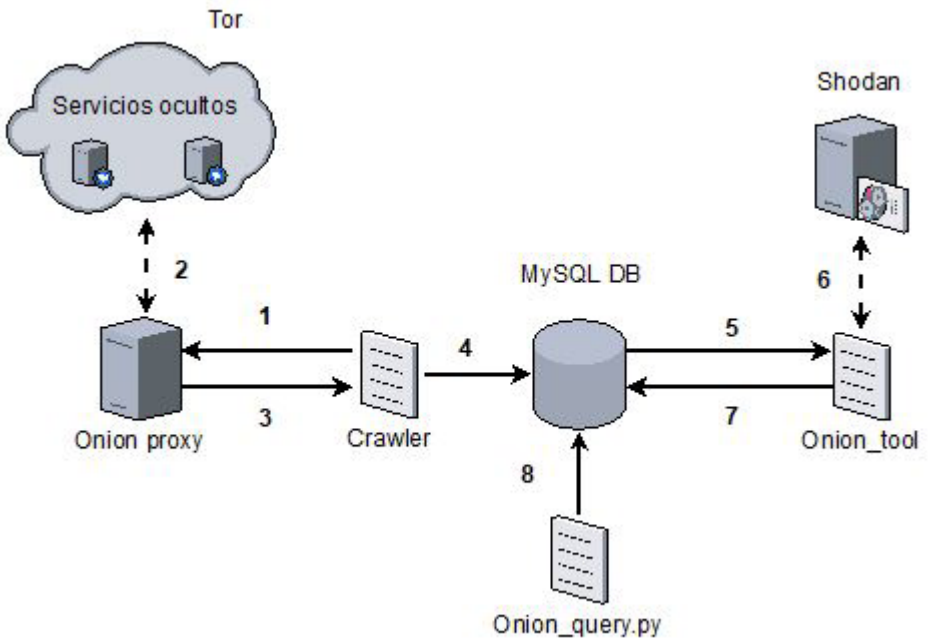


Figura 2. Esquema del sistema desarrollado.

4. Análisis y discusión de resultados obtenidos

Se han obtenido 17.328 direcciones .onion (poco más de un 15 % de las 110.000 direcciones reconocidas oficialmente). De todas ellas, únicamente se ha logrado establecer una conexión HTTP/HTTPS al 10 %, considerando un tiempo máximo de respuesta de alrededor de 30 segundos. Este número tan bajo de conexiones puede ser debido a que los servicios ocultos permiten configurarse para solicitar una contraseña de acceso. Además, los servicios ocultos pueden ofrecer otros protocolos distintos del estudiado aquí (como conexión mediante SSH o Telnet, entre otros). Por último, cabe destacar que algunas direcciones de muchos de los servicios ocultos que se estiman se encuentran caídos o eliminados, existiendo además una alta rotación de direcciones de los servicios ocultos actuales (cada cierto tiempo cambian su dirección para evitar ser perseguidos).

De las 1.796 direcciones recopiladas, con 346 de ellas se ha conseguido acotar a un solo dispositivo con cabeceras idénticas o muy similares. En términos generales, el sistema desarrollado consigue acotar el 30 % de los servicios ocultos analizados a 10 dispositivos o menos. En la figura 3 se muestra una gráfica del número de dispositivos acotados por servicio oculto.

Nótese, sin embargo, que el sistema no garantiza una relación directa entre el servicio oculto y el dispositivo encontrado como similar. Esto no implica un error, dado que puede ocurrir que el servicio oculto sea una web diferente al servicio accesible por el Internet convencional pero la configuración del servidor sea idéntica para ambos servicios. Por ejemplo, en la figura 4(a) se muestra un caso de identificación encontrado donde las páginas web son diferentes, pero se trata de la misma organización. Por tanto, los resultados sí que implican que los metadatos suministrados por una cantidad considerable de los servicios ocultos accedidos pueden llevar a una desanonimización de los mismos, en caso de que se disponga de otro servicio con similar configuración en un puerto abierto a la red convencional. Este es el caso, por ejemplo, de una de las identificaciones realizadas, mostrado en la figura 4(b).

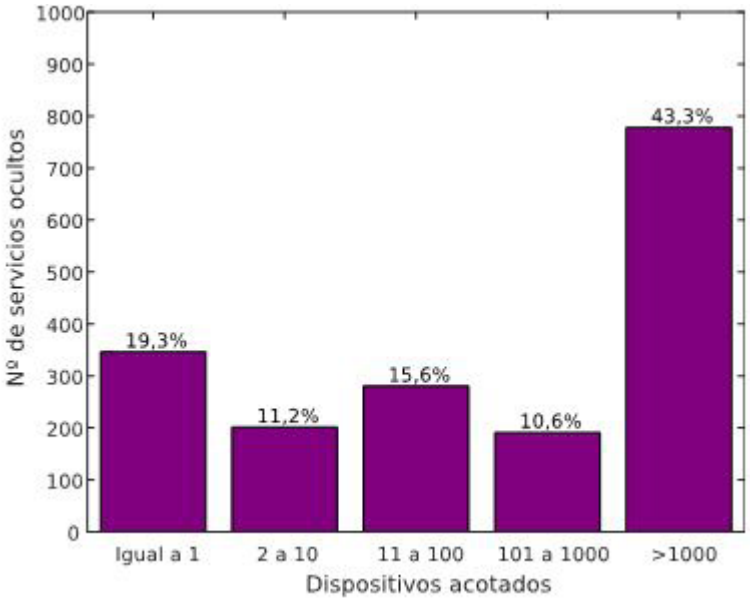


Figura 3. Dispositivos acotados por servicio oculto.

En la parte de detección de actividades ilegítimas se han detectado servicios ocultos relacionados con el terrorismo, la pornografía, la venta de drogas y las criptomonedas (orden creciente de servicios). Aunque no se ha realizado un sistema de clasificación automático, se pueden detectar servicios con una cantidad importante de palabras de estas categorías, identificándolo como sospechoso de este tipo de actividades para una posterior revisión humana. El estudio preliminar (y fácilmente ampliable) muestra que existen en Tor servicios ocultos con finalidades cuestionables.

Respecto a los idiomas, se han detectado 28 idiomas diferentes de los 55 soportados por la herramienta usada. El más utilizado es con diferencia el inglés, asociado a 1.314 servicios ocultos. El idioma castellano aparece únicamente en 25 servicios.

5. Conclusiones y trabajo futuro

La red Tor nació para mejorar el anonimato y la privacidad de sus usuarios durante la navegación por Internet. Basada en el establecimiento de circuitos entre los diferentes nodos de la red se garantiza la no trazabilidad de las conexiones. Además, Tor permite la creación de servicios ocultos únicamente accesibles a través de la propia red Tor y no mediante el Internet convencional, garantizando el anonimato del proveedor de servicios. Este anonimato conlleva a que proliferen sitios en la red Tor de dudosa reputación.

En este trabajo se ha desarrollado un sistema que permite analizar los servicios ocultos para desanonimizarlos. El sistema desarrollado consigue acotar la búsqueda a menos de 10 dispositivos en más de un 30 % de los servicios analizados, usando simplemente los metadatos de los protocolos web HTTP/HTTPS. Además, un estudio estadístico realizado sobre la temática y el idioma ha detectado muchos servicios ocultos relacionados con la venta de drogas y las criptomonedas, mayoritariamente en lengua inglesa. Como trabajo futuro, se plantea la mejora del proceso de desanonimización y la categorización de los servicios.

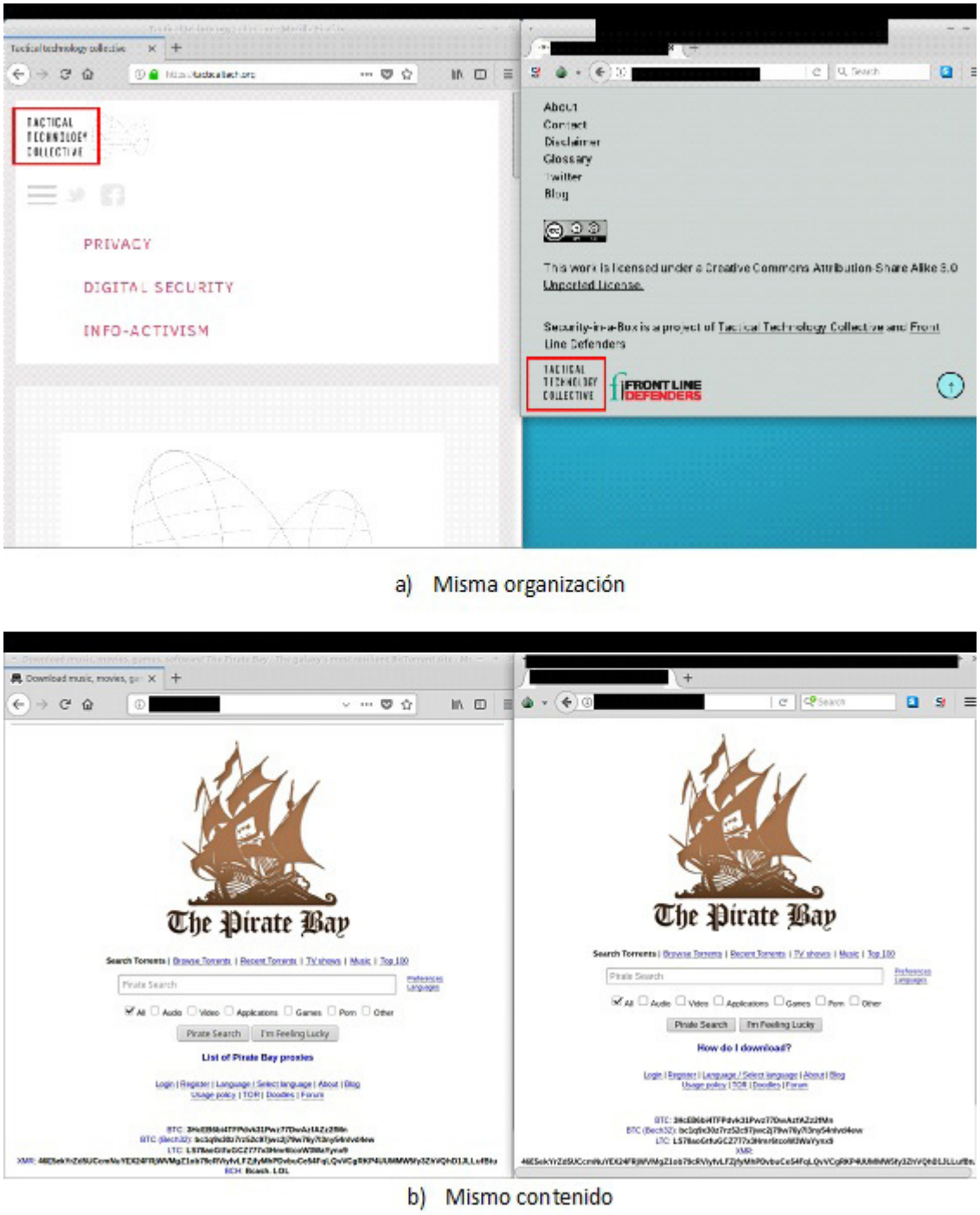


Figura 4. Ejemplos de desanonimización: (a) misma organización y (b) mismo contenido.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado en parte por el proyecto MINECO CyCriSec (TIN2014-58457-R) y en parte por el proyecto CUD-2017-14 (financiado por el Centro Universitario de la Defensa-Zaragoza). Los autores quieren mostrar su agradecimiento a José Merseguer, de la Universidad de Zaragoza, y a Francisco Monserrat Coll, de RedIris, por toda la ayuda prestada durante la realización de este trabajo.

Referencias

1. *McCoy D, Bauer K, Grunwald D, Kohno T, Sicker D. Shining Light in Dark Places: Understanding the Tor Network. Springer Berlin Heidelberg; 2008. p. 63–76.*
2. *Chen H. Dark Web: Exploring and Data Mining the Dark Side of the Web. Integrated Series in.*
3. *Information Systems. Springer New York; 2011.*
4. *Goulet D, Johnson A, Kadianakis G, Loesing K. Hidden-service statistics reported by relays. The Tor Project; 2015. 2015-04-001.*
5. *Christin N. Traveling the Silk Road: A Measurement Analysis of a Large Anonymous Online Marketplace. En Proceedings of the 22nd International Conference on World Wide Web, WWW '13. ACM; 2013. p. 213–224.*
6. *Overlier L, Syverson P. Locating hidden servers. En: 2006 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP'06); 2006. p. 15 pp.–114.*
7. *Panchenko A, Mitseva A, Henze M, Lanze F, Wehrle K, Engel T. Analysis of Fingerprinting Techniques for Tor Hidden Services. En: Proceedings of the 2017 on Workshop on Privacy in the Electronic Society, WPES '17. ACM; 2017. p. 165–175.*
8. *Overdorf R, Juarez M, Acar G, Greenstadt R, Diaz C. How Unique is Your .Onion?: An Analysis of the Fingerprintability of Tor Onion Services. En: Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, CCS '17. ACM; 2017. p. 2021–2036.*
9. *Owen G, Savage N. Empirical analysis of Tor Hidden Services. IET Information Security. 2016;10(3):113–118.*
10. *Matic S. Active Techniques for Revealing and Analyzing the Security of Hidden Servers [phdthesis]. Università degli Studi di Milano, Milan, Italy; 2016.*

Ciberseguridad de sistemas autónomos basados en *software* abierto en el ámbito de la defensa

Francisco Javier Rodríguez Lera*, Ángel Manuel Guerrero-Higueras, Eloy García Marcos, Camino Fernández Llamas y Vicente Matellán Olivera

Grupo de Robótica - Escuela de Ingenierías Industrial e Informática. Campus de Vegazana s/n. Universidad de León. 24071 León.

Email: {fjrodl, am.guerrero, eloy.garcia, camino.fernandez, vicente.matellan}@unileon.es

* Autor principal y responsable del trabajo; fjrodl@unileon.es

Resumen

El principal objetivo de este trabajo es proponer un plan de evaluación de la ciberseguridad del *software* libre asociado a sistemas autónomos, tales como vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés), terrestres (UGV) y robots de otras categorías, en particular los basados en el *framework* ROS (*Robot Operating System*). En el ámbito de defensa y seguridad, se está incrementando el interés en este tipo de sistemas dadas sus posibles aplicaciones tanto de un modo pasivo, en actividades de defensa, como de un modo más activo, en actividades de ataque. Desafortunadamente, la ciberseguridad de esos sistemas no está adecuadamente establecida.

En este trabajo se identifican los tipos de incidentes que pueden afectar al *software* de un sistema autónomo de acuerdo a la categorización multi-dimensional propuesta en el Esquema Nacional de Seguridad[1] (ENS). Del mismo modo, se enumeran los requisitos mínimos de seguridad necesarios en soluciones de *software* libre en entornos de ciberdefensa. A nivel práctico, esta categorización se traduce en el análisis de disponibilidad, autenticidad, integridad, confidencialidad y trazabilidad del *software* libre desplegado en diversos sistemas autónomos. Centrándonos en ROS, estándar *de facto* para el desarrollo de *software* para sistemas autónomos, se analizan componentes de alto nivel, como por ejemplo el módulo de navegación, y varios de bajo nivel dedicados al control de sensores como cámaras, láseres y elementos de localización. Además, presenta las directrices para llevar a cabo el análisis y auditoría de sistemas ROS para proporcionar evidencias que dictaminen el grado de seguridad del sistema.

Palabras clave

Ciberseguridad, sistemas autónomos, robótica, *Robot Operating System* (ROS).

1 *BOE*-A-2010-1330.

1. Introducción

En el ámbito militar el uso de sistemas autónomos o semi-autónomos más extendido es el uso de vehículos aéreos (UAV) [5] cuyo uso se está generalizando en labores de vigilancia doméstica y combate en territorio hostil. Los beneficios de la aplicación de sistemas autónomos en el ámbito militar han sido ampliamente documentados [10] tanto para acciones pasivas o de defensa, por ejemplo, para la retirada de militares heridos en terreno hostil [7], como de ataque. Ejemplos de estos sistemas son los desarrollados por el TARDEC (*Tank Automotive Research Development and Engineering Center*), entre los que se encuentra la construcción de un carro de combate autónomo [9] que podría desarrollarse utilizando el sistema ROS Military (ROS-M) [11], una versión de ROS (*Robot Operating System*) para despliegue de vehículos autónomos con requerimientos de seguridad militares [8].

La rapidez con la que se están desplegando y adoptando dichas tecnologías abre un escenario en el que hay que valorar de nuevo el nivel de seguridad asociado a su uso. Partiendo de la base en la que dichos sistemas autónomos se construyen sobre plataformas informáticas tradicionales, los sistemas son vulnerables a ataques similares a los que se vienen dando en otras plataformas [20]. Sin embargo, la conexión de dichos sistemas a una serie de sensores y actuadores físicos incrementan los clásicos problemas digitales abriendo la puerta a daños físicos sobre aquellos individuos que interactúan con la plataforma.

ROS[2] es un *middleware* de control robótico considerado el estándar de facto de programación en robótica. Su distribución como *open software* y su gran comunidad de desarrollo ha permitido su adopción masiva por la comunidad científica y empresarial. Este *middleware* permite el prototipado rápido y desarrollo de soluciones robóticas (autónomas, semi-autónomas o teleoperadas.). ROS fue desarrollado como herramienta aplicada a la investigación obviando su nivel de seguridad. De este modo, la fragilidad de ROS a ataques constituye su mayor desventaja. Dicha fragilidad podría ser heredada por los sistemas que ahora se despliegan en entornos industriales, domésticos, e incluso de defensa.

Para solventar este problema, la comunidad está trabajando en una nueva versión de ROS (ROS2) que mejoraría la validación, adopción y despliegue de plataformas basadas en este *software*. Sin embargo, será un proceso lento dada la gran cantidad de usuarios trabajando sobre la versión 1 de ROS que registró más de 200.000 descargas solo en el año 2017, el último con estadísticas publicadas. Por ello, creemos que la determinación de la categoría del sistema para la valoración del impacto de un incidente que afectara a la seguridad del sistema. La métrica necesaria para evaluar el impacto de un ataque sería la misma que se define en el Esquema Nacional de Seguridad (ENS) para otros sistemas, entre los que se encuentran factores como alcance de objetivos, protección de los activos a su cargo o cumplimiento de las obligaciones de servicio.

De este modo, este trabajo busca explorar las vulnerabilidades ante un ataque a un sistema autónomo que esté usando ROS en entornos militares. Para ello, utilizaremos las categorías clásicas: disponibilidad, autenticidad, integridad, confidencialidad y trazabilidad. Dentro de cada categoría se expondrán las particularidades de ROS (protocolos y artefactos *software*) susceptibles de sufrir un ataque por parte

2 http://www.ros.org/

de usuarios malintencionados. Del mismo modo expondremos algunas soluciones que se encuentran en estudio o en la literatura habitual.

El resto de este documento se organiza de la siguiente manera: la sección 2 introduce una visión general del problema, centrándonos en el problema del flujo de datos de un sistema autónomo y de un sistema basado en ROS. La sección 3 realiza un análisis de las cinco diferentes categorías de seguridad expuestas en el párrafo anterior, así como las susceptibilidades y posibles soluciones para evitar el ataque o mejorar la seguridad. El documento termina con las conclusiones obtenidas de este trabajo.

2. Visión general

El propósito de esta sección es definir el flujo de información de un sistema autónomo (término que será usado indistintamente junto con robot) y revisar el estado actual de la arquitectura ROS.

2.1. Sistemas autónomos

La figura 1 muestra el flujo habitual de datos en un robot. A ambos lados de la figura están representados los puntos físicos de interacción con el entorno, sensores y actuadores. Los sensores, integrados o externos, reciben información del entorno que es enviada al sistema autónomo de forma directa o indirecta a través de un sistema local o de un servicio en la nube. El procesado de la información repercute en la selección de la acción a realizar por los actuadores. Sobre estos dos puntos, sensores y actuadores, es necesario realizar las comprobaciones de seguridad habitual en los sistemas de control. Sobre los sistemas lógicos del robot, representados por rectángulos en la figura, se han de aplicar los sistemas de ciberseguridad de la tecnología de la información.

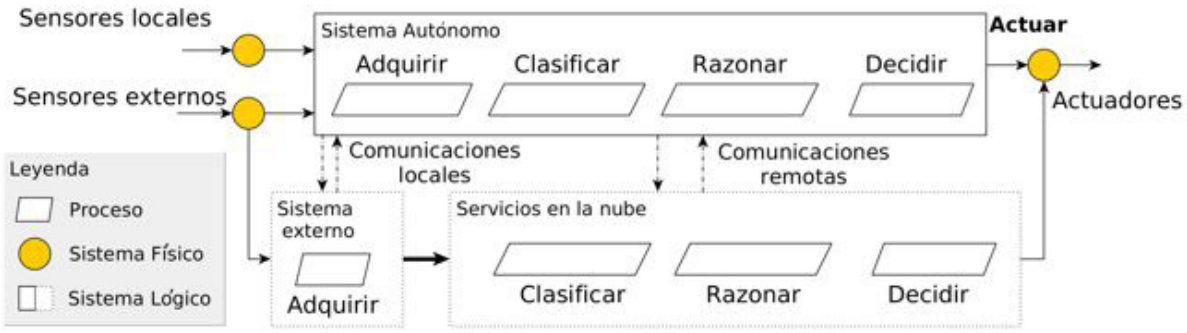


Figura 1. Flujo de datos en un robot. Los sensores y actuadores se representan a ambos lados de la figura mientras que el centro muestra el proceso de toma de decisiones de la máquina (adquisición de datos, clasificación, razonamiento y decisión) tanto de un modo local, en el sistema autónomo, como en un servicio en la nube.

2.2. Robot Operating System (ROS)

ROS provee un conjunto de servicios para gestionar tanto a alto nivel el *hardware* de uno o múltiples robots, como a bajo nivel con control directo sobre el *hardware*. La figura 2 muestra el flujo habitual de datos en un sistema basado en ROS. Se trata de un sistema distribuido, utilizando el paradigma de publicación-subscripción. Entre las tareas que se pueden realizar con ROS está la posibilidad de enviar mensajes con información procesada (por ejemplo, información semántica extraída de imágenes) o sin procesar (información extraída directamente de los sensores), multiplexación de sensores, información de control de los actuadores, estado actual o previo del sistema y, en ciertos casos, planificaciones de tareas. La red de componentes que maneja el flujo de información en un sistema ROS está definida por nodos, un servidor de parámetros, mensajes, servicios, *topics* y *bags*.

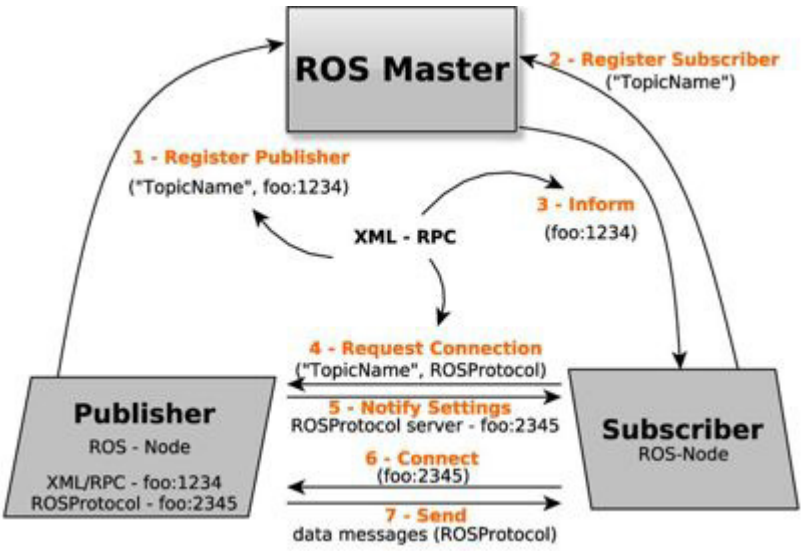


Figura 2. Flujo de datos ROS (figura derivada de [22] y de Establishing a topic connection publicada en (ROS Wiki, 2014) con licencia CC BY 3.0).

3. Análisis de seguridad de un sistema autónomo

A lo largo de esta sección se revisan los vectores de ataque que se pueden encontrar en un sistema autónomo que utiliza ROS. Se identifican dos vectores de ataque. En primer lugar, los ejecutados sobre el sistema físico para modificar el comportamiento del dispositivo con el propósito de obtener algún beneficio. Este tipo de ataque puede ser ejecutado sobre cualquiera de los elementos *hardware* del sistema (sensor, actuador o procesador [19]). En segundo lugar, los ataques ejecutados sobre el sistema lógico de los sistemas locales asociados al robot o aquellos ataques realizados a alguno de los procesos asociado a la toma de decisiones.

La formalización se realizó siguiendo un paralelismo respecto a los parámetros de seguridad indicados en el anexo I y II definidos en [5]. Del mismo modo, las posibles contramedidas se dividen en dos grupos: *el marco operacional*, formado por las decisiones a tomar para proteger la operación del sistema como conjunto integral de componentes para un fin y las *medidas de protección,* que se centran en proteger activos concretos, según su naturaleza y la calidad exigida por el nivel de seguridad de las dimensiones afectadas. En este punto no hemos tenido en cuenta las disposiciones a nivel organizativo, que son aquellas normas relacionadas con la organización global de la seguridad y que corresponderá al ente militar correspondiente.

3.1. Disponibilidad

La disponibilidad define la capacidad del sistema para realizar la tarea o tareas para la que fue construido cuando se necesita, de forma autónoma o bien siguiendo una serie de interacciones con humanos. Este factor es clave cuando trabajamos en un entorno militar. Por un lado, debe estar garantizada solamente para aquellas personas autorizadas. Esto, que se aplica fácilmente en drones y otros vehículos teleoperados desde control de operaciones, queda más borroso cuando el vehículo es desplegado en tierra y controlado desde terminales móviles. Por otro lado, debe responder en una ventana temporal adecuada. En este caso, la situación es problemática ya que ROS no se considera un sistema de tiempo real [4] y se han delegado los desarrollos sobre ROS2.

Uno de los principales problemas asociados a la disponibilidad viene dado por la naturaleza del protocolo de intercambio de mensajes XML/RCP que utiliza ROS. Dicho protocolo es bien conocido por su susceptibilidad a ataques de fuerza bruta y denegación de servicio [21]. Dado que uno de los mayores problemas viene dado por su uso del lenguaje XML para definir la estructura de datos es necesario ac-

tualizar los sistemas operativos para evitar la explotación de dicha vulnerabilidad, por ejemplo mediante paquetes de *defusedxml*[3]**.** Alternativamente, se puede contemplar cifrar el protocolo para evitar inyecciones de código tal y como propone SROS (*Security enhancements for ROS*) [15].

3.2. Autenticidad

Esta categoría se centra en garantizar la identidad del origen de cada uno de los mensajes intercambiados entre el robot y cualquier otro sistema. Las medidas de protección se pueden implementar mediante transmisiones seguras utilizando el protocolo criptográfico TLS (*Transport Layer Security*), tal y como propone SROS. La implementación de SROS admite la autenticación cliente/servidor con infraestructura de clave pública (PKI) lo que permitirá verificar la validez y autenticidad de los mensajes mediante certificadoras autorizadas. SROS permite el uso de claves privadas cifradas de forma nativa.

Alternativamente, es posible utilizar la solución *Secure ROS* [14] que propone el cifrado de comunicaciones de ROS modificando su núcleo. La modificación de ROS propuesta se basa en usar el protocolo IPSec (*Internet Protocol Security*), garantizando que los paquetes IP no se manipulan o falsifican. Dispone además de una serie de reglas para filtrar las IP de los dispositivos que se conectan a la red ROS.

3.3. Integridad

La integridad define la protección propia del sistema para garantizar que solo pueda ser modificado por las personas autorizadas. Cuando se aplica a un sistema autónomo, estamos hablando de garantizar la persistencia y completitud, no solo del contenido de la información gestionada por el sistema, sino a la persistencia del agente en sí mismo.

Las medidas de protección vienen definidas por la perspectiva *hardware* y *software*. Aunque las posibilidades de un ataque asociado a la inclusión de un dispositivo compatible con ROS y con interfaces de fácil despliegue (USB o serial) requerirían un análisis paralelo y pormenorizado, es posible imponer ciertas medidas básicas de protección. Por ejemplo, la inclusión de un sistema de control *hardware*, imposibilitando la adición de dispositivos y en caso de sustituir/añadir un dispositivo en caliente debería realizarse a nivel de sistema operativo mediante la inclusión de reglas *udev* para evitar conexiones de dispositivos no reconocidos. En el caso de que llegase a su etapa de reconocimiento por el componente ROS, sería necesario añadir una validación del *vendor* and *hardware ID* desde este nivel.

En lo relativo a la seguridad de los componentes *software*, es posible realizar la conexión de clientes no nativos ROS con los sistemas ROS utilizando *Rosbridge* [12] y su sistema de autenticación *Rosauth* [13]. Este último utiliza el protocolo criptográfico SSL (*Secure Sockets Layer*) para realizar una autenticación web y verifica los mensajes de las conexiones de clientes remotos inspirado por códigos de autenticación de mensajes (MAC), aceptando o rechazando mensajes de acorde a dicha autenticación.

3.4. Confidencialidad

Consiste en la habilidad del sistema para garantizar que la información que se encuentra almacenada en el sistema autónomo, la que se transmite por la red, o la que se procesa en la nube, solamente está disponible para los usuarios autorizados. De este modo, ante la captura física del dispositivo, no debe existir una manera de acceder a la información mediante interacción y debe impedirse cualquier tipo de acceso al sistema remoto. Algunas de las soluciones propuestas anteriormente solventan también este problema: SROS, *Secure* ROS, *Secure-ROS-Transport* propuesto por Dieber *et al*. [16], o soluciones de cifrado específico como la propuesta por Lera *et al*. [17].

Además de las precauciones necesarias para la transmisión de información, es necesario cifrar cualquier tipo de información almacenada en el sistema [18], por ejemplo activando los sistemas de encriptado TLS/SSL sobre MongoDB[4], una de las bases de datos más utilizada en las soluciones desarrolladas sobre ROS.

3 *https://pypi.org/project/defusedxml/*
4 www.mongodb.com

3.5. Trazabilidad

Define los mecanismos de un sistema autónomo para identificar y rastrear las acciones realizadas teniendo en cuenta todos los accesos al mismo, tanto las locales, definidas en el mismo entorno del robot como las remotas, procedentes de otra localización. Del mismo modo, es posible clasificarlas según su tipología como físicas, procedentes de lecturas de un sensor, o virtuales, información generada por un componente virtual.

De forma general, cualquier sistema debe incorporar un módulo para registrar los eventos y actividades que están siendo lanzadas en el sistema. Dicho módulo debe proveer un sistema para proteger la integridad de los registros que a su vez definirán diferentes niveles y se configurarán de acuerdo al sistema legal vigente y a las restricciones militares reglamentarias.

Por defecto, ROS tiene un sistema de registro que graba gran parte de las acciones realizadas por los procesos activos, pero este sistema guarda la información sin cifrar. De nuevo, es posible plantear una solución como la definida por SROS en la que se modifica el sistema de registro a nivel semántico y sintáctico. Para la lectura posterior de archivos de registro, SROS propone una solución similar a la ofrecida por *AppArmor*, distribuyendo una aplicación para terminal que facilita su control y manejo desde línea de comandos.

4. Conclusiones

La seguridad de los sistemas autónomos en entornos militares es crítica ya que afecta a nivel socioeconómico y humano. Las diferentes soluciones presentadas en este trabajo pueden ser consideradas como recomendaciones para el despliegue de cualquier tipo de robot o agente utilizando ROS. A partir de los datos extraídos de la literatura, observamos que no hay una solución concreta que proteja completamente ROS y es necesario desplegar una o varias soluciones aquí referenciadas para evitar la explotación de vulnerabilidades. La inclusión de estas aplicaciones deberá ir acompañada de un documento con el análisis del despliegue seguro, en el que se valoran las categorías evaluadas junto con otros conceptos tales como desarrollo, mantenimiento y actualización del *software*, sistema remoto para el bloqueo del robot, restauración a valores de fábrica y finalmente un estudio de la adecuación del personal encargado del manejo del robot.

Dentro del entorno de investigación, sería interesante analizar la posibilidad de importar nuevas tecnologías provenientes del ámbito de ciberseguridad en redes o en sistemas autogestionados. Por ejemplo, en los últimos tiempos, las herramientas inteligentes, basadas en *machine learning* o inteligencia artificial, proveen modelos para detectar cuándo un sistema está siendo atacado o si la información que reciben es adecuada. De ese modo, con la inclusión de estas herramientas en los entornos ROS, los vehículos o sistemas autónomos deberían ser capaces de reevaluar la situación, buscando alternativas para alcanzar el objetivo definido.

Agradecimientos

Este proyecto fue parcialmente subvencionado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y por la Junta de Castilla y León LE028P17 y por el Instituto Nacional de Ciberseguridad (INCIBE) en su Adenda21 ULE-INCIBE.

Referencias

1. *Jackie Kay, Proposal for a test-driven approach to the real-time performance requirement in ROS 2. Recurso disponible en: http://design.ros2.org/articles/realtime_proposal.html*
2. *RealDecreto951/2015,de23deoctubre,demodificacióndelRealDecreto3/2010,de8deenero,porelqueseregulaelEsquemaNacionaldeSeguridadenelámbitodelaAdministraciónElectrónica.Recursodisponibleen: https://www.ccn-cert.cni.es/publico/ens/ens/index.html#!1073*

3. *Guía de seguridad, CCN-STIC-803, Esquema Nacional de Seguridad - Valoración de los sistemas. Recurso disponible en: https://www.ccn-cert.cni.es/publico/seriesCCN-STIC/series/800-Esquema_Nacional_de_Seguridad/803-Valoracion_en_el_ENS/803_ENS-valoracion_ene-11.pd*
4. *Oudes, C, Zwijnenburg, W. Does Unmanned Make Unacceptable? Exploring the Debate on Using Drones and Robots in Warfare. IKV Pax Christi, (2011): Recurso disponible en: https://www.paxforpeace.nl/media/files/ikv-pc-does-unmanned-make-unacceptable.pdf*
5. *AIRBUS press release, European MALE RPAS (Medium Altitude Long Endurance Remotely Piloted Aircraft System) Programme takes off. Recurso disponible en: https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2016/09/european-male-rpas-medium-altitude-long-endurance-remotely-piloted-aircraft-system-programme-takes-off.html*
6. *Kelsey D. Atherton, US Army Wants Robot Medics To Carry Wounded Soldiers Out Of Battle, Popular Science, Recurso disponible en: https://www.popsci.com/army-wants-robot-medics*
7. *Jonathan Chu, Army Robotics in the Military, SEI Blog, Recurso disponible en: https://insights.sei.cmu.edu/sei_blog/2017/06/army-robotics-in-the-military.html*
8. *U.S. Army Tank Automotive Research Development and Engineering Center. Recurso disponible en: https://tardec.army.mil/*
9. *Bob Sadowski, Shaping the Future: Army Robotics and Autonomous Systems, TARDEC, March 2016. Recurso disponible en: https://ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2016/GRCCE/Saowski.pdf*
10. *ROS - M Summary NDIA GRCC 2017. Recurso disponible en: https://ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2017/groundrobot/OrinRosM.pdf*
11. *Crick C, Jay G, Osentoski S, Pitzer B, Jenkins OC. Rosbridge: Ros for non-ros users. InRobotics Research 2017 (pp. 493-504). Springer, Cham.*
12. *Toris R, Shue C, Chernova S. Message authentication codes for secure remote non-native client connections to ros enabled robots. InTechnologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2014 IEEE International Conference on 2014 Apr 14 (pp. 1-6). IEEE.*
13. *Secure ROS, SRI International, Recurso disponible en: https://sri-csl.github.io/secure_ros/*
14. *White R, Caiazza G, Christensen H, Cortesi A. SROS1: Using and Developing Secure ROS1 Systems. InRobot Operating System (ROS) 2019 (pp. 373-405). Springer, Cham.*
15. *Dieber B, Kacianka S, Rass S, Schartner P. Application-level security for ROS-based applications. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016 IEEE/RSJ International Conference on 2016 Oct 9 (pp. 4477-4482). IEEE.*
16. *Lera FJ, Balsa J, Casado F, Fernández C, Rico FM, Matellán V. Cybersecurity in Autonomous Systems: Evaluating the performance of hardening ROS. Málaga, Spain. 2016 Jun 16;47.*
17. *Nemati HR, editor. Applied Cryptography for Cyber Security and Defense: Information Encryption and Cyphering: Information Encryption and Cyphering. IGI Global; 2010 Aug 31.*
18. *Lipp M, Schwarz M, Gruss D, Prescher T, Haas W, Mangard S, Kocher P, Genkin D, Yarom Y, Hamburg M. Meltdown. arXiv preprint arXiv:1801.01207. 2018 Jan 3.*
19. *Cesar Cerrudo,Lucas Apa, IOActive, Hacking Robots Before Skynet 1, Recurso disponible en: https://ioactive.com/pdfs/Hacking-Robots-Before-Skynet.pdf*
20. *XSL Transformations (XSLT) Version 2.0 (Second Edition) Recurso disponible en: https://www.w3.org/TR/2009/PER-xslt20-20090421/*
21. *Rodríguez-Lera FJ, Matellán-Olivera V, Balsa-Comerón J, Guerrero-Higueras ÁM, Fernández-Llamas C. Message Encryption in Robot Operating System: Collateral Effects of Hardening Mobile Robots. Frontiers in ICT. 2018 Mar 2;5:2.*

Encriptación cuántica para comunicaciones seguras

Poudereux Sánchez, David[1,*], Barbero, Juan[1], Cordero Garrido, Enrique[1] y López Molina, Demetrio[1]

[1] Alter Technology TÜV Nord, Tres Cantos, Madrid, Spain.

david.poudereux@altertechnology.com: (DPS), juan.barbero@altertechnology.com: (JBG), enrique.cordero@altertechnology.com: (ECG), demetrio.lopez@altertechnology.com: (DLM).

* David Poudereux Sánchez; David.poudereux@altertechnology.com: (DPS).

Resumen

Las comunicaciones cuánticas ofrecen muchas ventajas para una transmisión de datos segura, como la confidencialidad, integridad y detectabilidad de espías. La física cuántica permite la codificación de la información usando la correlación entre dos o más partículas gracias a la criptografía cuántica (QKD), método de procesamiento de la información. El QKD permite que dos (o más) partes sepan cuándo un canal de comunicación está completamente seguro para intercambiar una clave encriptada. El QKD se usa antes de que la información clásica sea transmitida sobre un canal convencional no seguro de comunicación como redes de fibra óptica. Ya que las leyes de la física cuántica afirman que una sola partícula como un fotón no se puede dividir o clonar, certifica la seguridad absoluta de la comunicación. Sin embargo, los canales de comunicación cuántica están limitados en la Tierra. Las pérdidas del enlace de fibra óptica y el estado actual de la tecnología de detección de fotones hacen que la longitud máxima del tramo sin usar la regeneración (amplificación) sea de aproximadamente 100 km, mientras para la transmisión por espacio libre el límite es el horizonte visible. Tales problemas están en principio casi ausentes en el espacio, y son menos severos en enlaces de tierra a espacio. De hecho, enlaces cuánticos en el espacio libre combinado con fibra óptica pueden extender la comunicación segura en la tierra a un nivel mundial.

Palabras clave

Criptografía cuántica, encriptación, comunicación segura.

1. Introducción

En la sociedad moderna donde todo está conectado y las comunicaciones representan todo, una comunicación segura y libre de espías es fundamental. Es en este campo en donde la física cuántica brinda la oportunidad de codificación y encriptación más segura que se conoce. La seguridad está basada en las leyes inviolables de la mecánica cuántica: que un estado cuántico desconocido no se puede copiar (teorema de no clonación) ni tampoco ser medido sin perturbarlo (principio de incertidumbre de Heisenberg) [1]. La codificación de la información mediante la criptografía cuántica se denomina *Quantum Key Distribution* (QKD). El QKD se basa en ciertas propiedades de los sistemas cuánticos diferenciándose principalmente dos categorías. La primera se basa en protocolos de medida que necesariamente modifican la propia medición. Estos protocolos se basan generalmente en fuentes de un solo fotón con un cierto estado cuántico. La segunda categoría se basa en el denominado entrelazamiento cuántico en el cual se usan dos o más partículas (átomos, fotones) correlacionadas de tal forma que, en cuanto se conoce el estado de una partícula, se desvela el estado de su compañera entrelazada, por muy lejos que esta esté. Gracias a esta propiedad puramente cuántica se puede saber cuándo un canal ha sido espiado (o por el contrario es absolutamente seguro) para intercambiar la clave encriptada. Esto es debido a la imposibilidad física de clonar o dividir una partícula, certificando así la absoluta seguridad de dicho canal de comunicación. Posteriormente se envía la información encriptada por un canal convencional no seguro como puede ser una red de comunicaciones ópticas [2].

Hasta no hace mucho, los canales de comunicación cuántica estaban limitados a la Tierra. Las pérdidas del enlace de fibra óptica y el estado de la tecnología de detección de fotones hacían que la longitud máxima del tramo sin usar la regeneración (amplificación) fuera del orden de cientos de km, mientras para la transmisión por espacio libre el límite es el horizonte visible [3,4], siendo la decoherencia cuántica de los estados entrelazados producida por la gravedad uno de los parámetros limitantes más importantes [5]. Por tanto, enlaces cuánticos en el espacio libre combinado con fibra óptica extienden la comunicación segura entre los puntos en la tierra a un nivel mundial (figura 1). Un ejemplo de comunicaciones cuánticas en espacio libre fue el enlace de 144 km entre La Palma y Tenerife en 2007 [6,7]. El último hito en comunicación cuántica espacial lo consiguió China en 2017 tras poner en órbita el primer satélite de comunicaciones cuántico (QSS, siglas de *Quantum Science Satellite*). Los científicos chinos consiguieron enviar dos fotones entrelazados a dos estaciones terrestres (dos telescopios) alejados entre sí 1.200 km [8].

ALTER Technology, que ya formó parte del proyecto SPACE-QUEST [9,10], está inmerso en un estudio de viabilidad destinado a desarrollar, testar y empaquetar un transductor óptico para comunicaciones cuánticas. En este proyecto, se han analizado las tecnologías necesarias como los cristales no lineales, espejos dicroicos, láseres, lentes, etc, desde el punto de vista de la viabilidad para aplicaciones espaciales incluyendo ensayos de vibración, radiación, vacío térmico, etc.

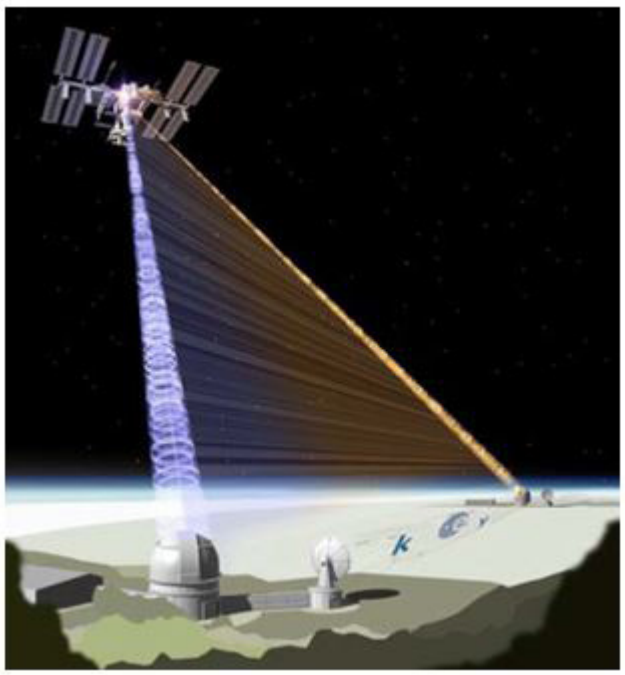


Figura 1. Fotones entrelazados usando la Estación Espacial Internacional.

2. Descripción técnica del transductor

Para poder crear un enlace de comunicaciones cuánticas efectivo el transductor óptico debe de ser capaz de las siguientes tareas:

1. Generación de fotones entrelazados.
2. Generación de fotones individuales y pulsos láser débiles.
3. Acoplar fotones a fibras ópticas monomodo.
4. Adquisición, *tracking* y posicionamiento de dos telescopios en estaciones de tierra.
5. Detección a bordo de fotones polarizados mediante análisis y detección de su polarización.
6. Capacidad de realizar test y calibraciones a bordo.
7. Capacidad de alineamiento activo de la polarización de las señales cuánticas.
8. Almacenar a bordo la detección de eventos y señal de tiempo.
9. Transmitir y recibir un láser de referencia para adquisición, *tracking* y determinación del plano de polarización.
10. Transmisión de información del reloj y de otra información vía enlace clásico.

Teniendo en cuenta estas necesidades, el transmisor fotónico está constituido por cuatro módulos: una fuente de fotones entrelazados (EPS, *Entangled Photons Source*) junto con al menos una fuente de pulsos débiles (FPS, *Faint Pulse Source*), un módulo de ópticas combinado y la correspondiente electrónica asociada. Tanto el EPS como el FPS se pueden usar para transmitir desde un satélite de baja órbita (LEO, *Low Earth Orbiot*) a dos estaciones de tierra separadas, ya sea una clave de seguridad común simultánea o dos claves de seguridad diferentes consecutivas. Las salidas de las fuentes se acoplan utilizando un combinador óptico. Los fotones se envían a través del espacio desde el satélite a cada equipo de soporte terrestre, donde se analizan. En el caso de transmisión de la clave simultánea, una estación revela públicamente a la otra una cantidad de elementos aleatorios de la clave recibida. Si los elementos coinciden con su clave adecuada, entonces la clave es segura. En el caso de transmisión de clave consecutiva, una estación envía una combinación lógica (XOR) de ambas claves a la otra estación. A partir de esto, se calcula una clave de seguridad incondicional.

2.1. Fuente de fotones entrelazados (EPS)

Genera y prepara pares de fotones entrelazados (ver figura 2). Estos pares de fotones correlacionados (lo que significa que modificar una propiedad de una partícula también afectará a la compañera entrelazada) se pueden usar en esquemas QKD basados en entrelazamiento, o alternativamente, como una fuente de fotón único. Los estados entrelazados se generan por medio de una conversión descendente paramétrica espontánea (SPDC, *Spontaneous Parametric Down Conversion*). Este tipo de fuente proporciona un elemento inherente de seguridad debido a su mecanismo de generación de claves completamente aleatorio. Se ha dedicado un gran esfuerzo al desarrollo de fuentes ultrabrillantes y compactas.

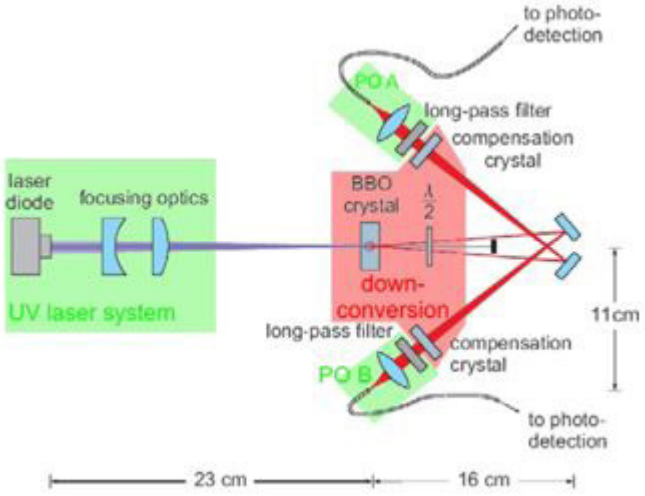


Figura 2. Esquema de generación de fotones entrelazados.

2.2. Fuente de pulsos débiles (FPS)

Un protocolo que proporciona seguridad total de transmisión de fotones individuales utilizando pulsos débiles es el llamado protocolo de estado de señuelo (12–14). Los estados de señal y señuelo son pulsos que contienen un número promedio fijo de fotones (por ejemplo, 0,1, 1 y 10 fotones). El estado señuelo debe ser idéntico en tiempo, espectro y amplitud al estado de la señal, de modo que un espía no pueda distinguir entre señuelo y estados de señal. Después de la transmisión, la estación receptora revela los eventos de detección y luego emite las emisiones de la estación cuyos estados fueron señal o señuelo. Un análisis cuidadoso de los estados recibidos detectará con alta probabilidad a un espía utilizando una estrategia basada en la división del número de fotones.

Estas fuentes utilizan pulsos de luz atenuados para lograr el número bajo de fotones medios deseado por pulso. El entorno espacial agrega restricciones como el rango de temperaturas, las vibraciones y las radiaciones. Por lo tanto, los componentes deben seleccionarse y probarse para la calificación espacial, especialmente para componentes sensibles como diodos láser y cristales no lineales.

2.3. Módulo óptico

Combina las señales de las diferentes fuentes y garantiza un acoplamiento eficiente y estable en una fibra monomodo, dadas las estrictas restricciones ambientales.

2.4. Electrónica asociada

Para controlar las partes activas del transmisor.

El diagrama de bloques básico de un transmisor de comunicaciones cuánticas es mostrado en la figura 3.

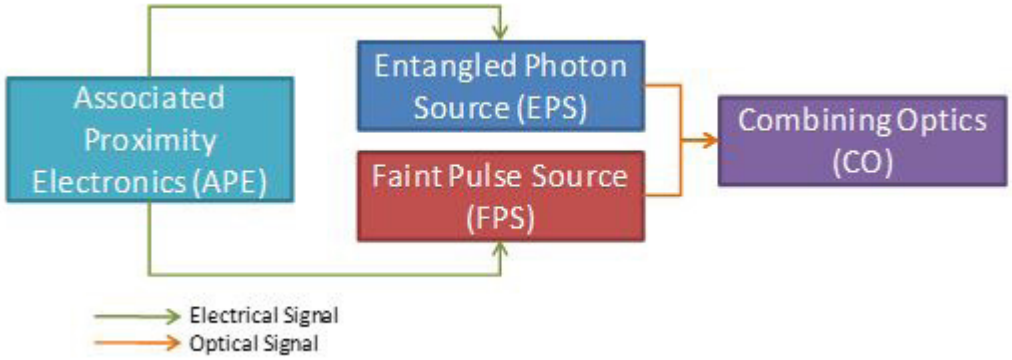


Figura 3. Diagrama de bloques de un transmisor de comunicaciones cuánticas.

3. Componentes críticos testados por ALTER Technology para anteriores proyectos

ALTER Technology participó en el proyecto SPACE-QUEST terminado en 2014. En dicho proyecto se desarrolló un transceptor cuántico en colaboración con otras organizaciones como el ICFO, ICRE, Universidad Complutense de Madrid, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad de Viena y LIDAX. En este proyecto se diseñó, fabricó, ensambló y testó el transceptor cuántico incluyendo la calificación de sus componentes para poder ser usado en el espacio. Dicha calificación constaba de un análisis constructivo, ensayos de ciclos térmicos, ensayos de vacío térmico, vibración, radiación gamma y de protones. Los componentes testados en dicha calificación son los siguientes:

1. Cristal no lineal formado por peróxido de potasio periódicamente polarizado (PPKTP).
2. Diodo laser violeta.
3. Acoplador óptico.
4. Divisor de haz polarizado (PBS).
5. Amplificador óptico semiconductor (SOA).
6. Multiplexor de división de longitud de onda en fibra (WDM).

4. Estado actual y *roadmap*

ALTER Technology se encuentra en la actualidad inmersa en el desarrollo y *testing* de fuentes generadoras de fotones polarizados entrelazados junto con su filial Optocap, encargada del ensamblado y empaquetado de dichos dispositivos. ALTER está viendo también la posibilidad de introducirse en otros campos del mundo cuántico como pueden ser los relojes de átomo frío, capaces de medir gravedad y los cuales se prevé que formarán parte del desarrollo tecnológico que viene.

Agradecimientos

Parte de este trabajo se enmarca en el programa ESA Artes-5 con la ayuda del Ministerio de Industria de España (CEDTI) y el FFG de Austria.

Referencias

1. *Carrasco Casado A. Contribuciones a las comunicaciones ópticas en espacio libre: utilización de telescopios Cherenkov como receptores y corrección de Beam Wander en comunicaciones cuánticas. 2015 May [cited 2018 Aug 23]; Available from: https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/21650*
2. *Bedington R, Arrazola JM, Ling A. Progress in satellite quantum key distribution. npj Quantum Information. 2017 Aug 9;3(1):30.*

3. *Waks E, Zeevi A, Yamamoto Y. Security of quantum key distribution with entangled photons against individual attacks. Physical Review A [Internet]. 2002 Apr 25 [cited 2018 Aug 22];65(5). Available from: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.65.052310*
4. *Takesue H, Diamanti E, Honjo T, Langrock C, Fejer MM, Inoue K, et al. Differential phase shift quantum key distribution experiment over 105 km fibre. New J Phys. 2005;7(1):232.*
5. *Joshi SK, Pienaar J, Ralph TC, Cacciapuoti L, McCutcheon W, John Rarity, et al. Space QUEST mission proposal: experimentally testing decoherence due to gravity. New J Phys. 2018;20(6):063016.*
6. *Schmitt-Manderbach T, Weier H, Fürst M, Ursin R, Tiefenbacher F, Scheidl T, et al. Experimental Demonstration of Free-Space Decoy-State Quantum Key Distribution over 144 km. Physical Review Letters [Internet]. 2007 Jan 5 [cited 2018 Aug 22];98(1). Available from: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.010504*
7. *Ursin R, Tiefenbacher F, Schmitt-Manderbach T, Weier H, Scheidl T, Lindenthal M, et al. Entanglement-based quantum communication over 144 km. Nature Physics. 2007 Jul;3(7):481–6.*
8. *Yin J, Cao Y, Li Y-H, Liao S-K, Zhang L, Ren J-G, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. Science. 2017 Jun 16;356(6343):1140–4.*
9. *Pruneri V, Gardelein A, Molina-Terriza G, Mitchell M, Perez J, Bernabeu E, et al. Quantum transceiver for secure global communications. 2018 Aug 29;55.*
10. *Jofre M, Gardelein A, Anzolin G, Amaya W, Capmany J, Ursin R, et al. Fast optical source for quantum key distribution based on semiconductor optical amplifiers. Opt Express, OE. 2011 Feb 28;19(5):3825–34.*
12. *Hwang W-Y. Quantum key distribution with high loss: toward global secure communication. Phys Rev Lett. 2003 Aug 1;91(5):057901.*
13. *Wang X-B. Beating the photon-number-splitting attack in practical quantum cryptography. Phys Rev Lett. 2005 Jun 17;94(23):230503.*
14. *Lo H-K, Ma X, Chen K. Decoy State Quantum Key Distribution. Phys Rev Lett. 2005 Jun 16;94(23):230504.*

Detección de nodos críticos en redes mediante algoritmo metaheurístico GRASP para el problema de los separadores-α

Baonza Écija, J. L.[1,2,*]

1 Parque y Centro de Mantenimiento del Material de Transmisiones (PCMMT). Acto. «Zarco del Valle». El Pardo (Madrid). jbaoeci@et.mde.es (JLBE).

2 Universidad Rey Juan Carlos. Calle Tulipán s/n. 28933 Móstoles, Madrid.

* Juan Luis Baonza Écija; correo electrónico: jbaoeci@et.mde.es

Resumen

En infraestructuras de red basadas en grafos (como, por ejemplo, las redes de comunicación fijas), la caída de ciertos nodos puede suponer que la infraestructura no permanezca conectada en su totalidad. Esto implicaría un severo daño de esta por un corte del flujo de la información. Un objetivo prioritario de los atacantes a las infraestructuras de red es la búsqueda de nodos críticos, para separar la red en sub-grafos más pequeños, no dejando la red conectada.

Este estudio se basa en el problema de los separadores-alfa, que consiste en encontrar los nodos, separadores mínimos, para los cuales se cumpla que el grafo (la red) se divida en sub-grafos que tengan un tamaño , siendo n los nodos del grafo original y α una variable dada; teniendo los nodos y aristas el mismo peso. El problema tiene solución teórica, pero en la práctica es difícil dar la solución óptima debido a la existencia de una restricción de tiempo, tanto para el proceso computacional como el de toma de decisiones, debiendo así enfocar el problema en dar una solución de alta calidad, orientada a una calidad de esfuerzo computacionalmente aceptable.

Para la resolución del problema se ha utilizado el algoritmo metaheurístico GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), que consiste en una búsqueda de soluciones de manera semialetorizada, con la finalidad de generar una solución satisfactoria en resultado y tiempo. La finalidad de este trabajo es la localización de los nodos críticos para una posible decisión de contramedida en un espacio de tiempo que suponga un esfuerzo computacionalmente aceptable, mediante metaheurísticas, para mejorar la red, aplicando una acción correctiva o preventiva, dependiendo del momento en que se tome la decisión.

Palabras clave

Separadores-alfa, detección nodos críticos, separadores mínimos, metaheurística, GRASP, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure.*

1. Introducción

Los sistemas de red están basados en grafos, por ello el estudio de problemas de grafos es esencial para conocer el comportamiento de estos, definirlos en el entorno que se desarrollan y conocer las debilidades que estos acarrean al implantarlos como infraestructuras. A su vez, en la actualidad una prioridad de los atacantes es dividir una red en redes más pequeñas fijadas, sin que la primaria quede conectada [1,2]. El problema se modela mediante un grafo donde los vértices de este son los nodos de la propia red y las aristas del grafo son las conexiones entre los nodos de la red. Traduciendo esto mismo a un lenguaje más académico, de un grafo conexo dado, subdividir el mismo, en subgrafos conexos de un tamaño máximo fijado, dejando al grafo original dado en un grafo no conexo.

Para realizar este ataque se debería saber cuántos y cuáles son los nodos que hay que eliminar, ya que sin estos datos lo único que se produciría sería un ataque aleatorio a nodos con un impacto mínimo a la estructura atacada.

El problema de los separadores-α [3], tratado en este trabajo, es el problema académico que despejaría las dudas de lo anteriormente indicado. Pero su problemática radica en que sería un problema computacionalmente muy costoso, teniendo una restricción en tiempo considerable, debido a que es un problema NP-duro, por ejemplo, para α= 2/3.

Al ser un problema de optimización combinatoria que dependiendo de α puede llegar a ser un problema NP-duro, se creyó factible abordar este problema con el algoritmo metaheurístico GRASP, para intentar llegar a una solución de alta calidad en un tiempo computacionalmente aceptable. Su principal aplicación es, la mejora de sistemas de red con estos mismos atributos y poder realizar acciones correctivas, si se ha producido el daño, o acciones preventivas, si el daño todavía no se ha producido. Siendo estas últimas a las que más enfocado está este trabajo, debido a que si se puede hacer el estudio del grafo sobre esta problemática se podrían identificar los nodos críticos de la red y se podría así tomar medidas sobre los mismos, dejando una red más segura y difícil de atacar.

1.1. Definición del problema

El estudio se ha realizado en base a un grafo G = (V, E) con |V|=n, siendo G no dirigido e inicialmente conexo, sin peso o valor en V ni en E y de n vértices; queriendo como resultado la separación del grafo en subgrafos, también conexos, con un tamaño menor o igual a αn, $S \coloneqq \{g_1, g_2 \dots, g_n\} \in G; \exists g \in G; \exists x \in P(x)$; -siendo S la solución g subgrafo, G el grafo inicial y P(x) αn-. La finalidad del problema es encontrar el mínimo número de nodos que separen el grafo inicial en subgrafo/s no mayores de αn. En la figura 1 se muestra un ejemplo gráfico simple del problema, para su mejor comprensión.

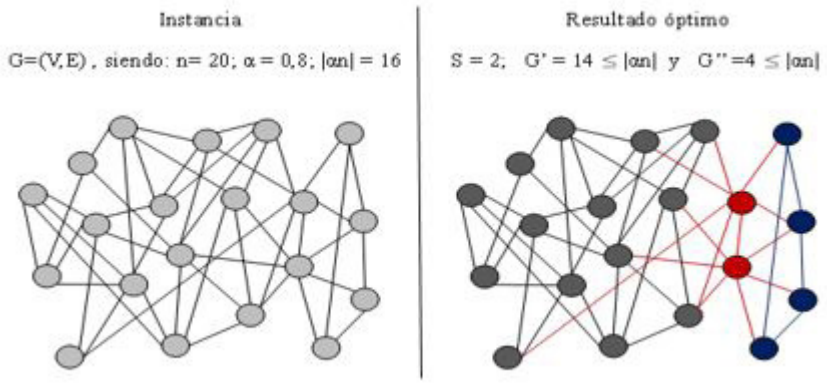


Figura 1. Ejemplo de resolución del problema separadores-α.

Nótese que, dependiendo de los valores de la instancia, podemos encontrar varias soluciones óptimas al problema.

Es un problema de optimización combinatoria, ya que necesitamos generar todas las posibles combinaciones para llegar a una solución óptima. Considerando como tal, a un conjunto finito definido por el conjunto C={1,…,n}, un conjunto de soluciones factibles F⊆ 2^c y una función objetivo f: $2^c \rightarrow R$. En el que necesitamos buscar una solución de alta calidad S* ∈ F, tal que f(S*) ≤ f(S), ∀S ∈ F.

Este problema tiene complejidad NP-duro (NP-Complejo o NP-Dificil) demostrada para una topología general α≥2/3 [4]. Ya que es una versión generalizada del problema del separador-α; si α=1/n, dando así la problemática de la mínima cobertura de vértices; si α=2/n, tiene su equivalencia al problema de mínima disociación, donde el conjunto de disociación es un subconjunto de vértices, en cuya inducción, el subgrafo tiene un grado máximo de 1 [5]. Lo cual significa que no existe un algoritmo determinístico polinomial que lo resuelve. Esto significa que computacionalmente tiene una problemática en tiempo. Debido a que por «fuerza bruta», es decir, por medio de combinaciones, se podría llegar al resultado del mismo, dependiendo del grafo de entrada esta combinatoria no sería computacionalmente factible debido al tiempo que se tardaría en resolverla.

1.2. Revisión del estado del arte

Este estudio se ha basado, siendo una motivación del mismo, en un artículo [6] realizado conjuntamente por miembros del Departamento de Ingeniería Electrónica y de Computadores de la Universidad estatal de Ohio (Ohio, EE. UU.) y miembros del Departamento de Software y del Departamento de Ingeniería Multimedia e Internet de la Universidad Konkuk (Seul, Korea) titulado *Finding Minimum Node Separators: A Markov Chain Monte Carlo Method*. Financiado el estudio por la *US Army*.

Este artículo resuelve el problema de los separadores-α, combinando método Monte Carlo con el modelo o cadena de Markov. El primero es un método que sirve para la resolución de problemas físicos y matemáticos, mediante simulación de variables aleatorias y el segundo es un proceso de paseo aleatorio –proceso en tiempo discreto– en el que una variable va cambiando con el paso del tiempo y su probabilidad solo depende del paso anterior. Su combinación da como consecuencia los métodos de cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC), los cuales son métodos de simulación que generan a posteriori muestras de las distribuciones y estiman cantidades de interés a posteriori.

Se utilizan varias instancias reales para la resolución del problema, como la red eléctrica de Italia [7], la red de Internet de Italia [7, 8] o la red de fibra óptica de los EE. UU, [9] y estancias ficticias para la comprobación de los resultados. La motivación de la realización del estudio fue que, hasta donde conocían (motivación que también se aplicó en la realización de este trabajo), no existían estudios genéricos para este tipo de problemas, todos los estudios estaban orientados a la topología específica de la instancia como por ejemplo el estudio realizado por Mohamed *et al*. [3] que desarrolló algoritmos en tiempo polinomial para topologías especiales para árboles o ciclos.

Como se ha mencionado con anterioridad, se quiere recalcar en este punto, ya que, se considera parte del estado del arte y la motivación del estudio que, en la actualidad los atacantes tienen como una de sus prioridades el subdividir la red en redes más pequeñas [1, 2].

1.3. Conceptos previos a la descripción algorítmica, experimentación y resultados

Se ha considerado relevante incluir este apartado debido su importancia para la comprensión del método de construcción de soluciones y la búsqueda local. Se comprende, que es de recibo antes de explicar un método constructivo o resolutivo, definir el método, su base y el entorno teórico en el que se emplaza. Por ello se definirá los conceptos de heurística, metaheurística y el algoritmo metaheurístico GRASP, utilizado en el estudio.

Heurística viene del griego εὑρίσκω (*heuriskein*) se puede traducir como encontrar, hallar. Su término viene del matemático George Poyla, con el cual quería expresar las reglas con las que gestionamos el conocimiento común. Por ello, podríamos definir la heurística como una metodología que, aplicada a problemas difíciles, tiene su base en procedimientos simples basados en el sentido común [10], que, se supone, podría obtener una solución, que se podría definir como «buena» pero que no tiene por qué ser necesariamente óptima, de un modo simple y rápido.

Los métodos de búsqueda *metaheurística* se pueden definir como metodologías generales de nivel superior que se pueden utilizar como estrategias orientadoras en el diseño de heurísticas subyacentes, para la resolución de problemas de optimización específicos. Estos procedimientos deben ser simples tanto conceptualmente como en su aplicación [10].

Tanto los métodos heurísticos como metaheurísticos son métodos que frecuentemente se utilizan cuando no hay un método exacto para el problema concreto o si lo hay tiene una complejidad computacional elevada.

2. Descripción algorítmica

Para encontrar una solución de calidad en este problema se ha implementado el algoritmo metaheurístico GRASP debido a su intuitiva implementación en el problema y los casos de éxito obtenidos con anterioridad [11, 12].

GRASP en inglés *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure.* La traducción literal del nombre sería, codicioso procedimiento de búsqueda adaptativa aleatoria, es una metaheurística para encontrar soluciones aproximadas –aunque en casos podrían dar la óptima–, de «buena» calidad. Se suele utilizar para problemas de optimización combinatoria, pero no es exclusivo de estos, puede adaptarse a otro tipo de problemas. Es un método basado en trayectorias (trayectorial) y de búsqueda multi-arranque –proceso iterativo–.

Su metodología se basa en dos fases, combina una fase constructiva con una búsqueda local que pretende mejorar las soluciones generadas por la fase constructiva.

La parte constructiva se caracteriza por dos pilares fundamentales, una construcción heurística dinámica y una aleatoriedad de la anterior, por ello se podría decir que es una mezcla entre un método voraz y otro aleatorio, sin ser puramente ninguno de los dos. La metodología se basa en devolver una solución que es un subconjunto de elementos de un conjunto original, en la que paso a paso el método incluye elementos para la solución final.

La solución la construye iterativamente y en cada iteración el método, que recoge a todos los posibles candidatos en un conjunto ordenado por la voracidad de estos, llamado lista de candidatos (CL), siendo el primer candidato el más prometedor, es decir el que por «lógica» pesara más, y el último, el menos prometedor, –en el caso del problema la heurística que se ha utilizado el número de enlaces que tiene cada nodo, siendo el más prometedor el que mayor número de enlaces tiene asignado–, y por medio de un coeficiente –β– los acota, con la siguiente fórmula: $th=g_{min}+\beta(g_{max}-g_{min})$, dando como resultado lo que se denomina lista de candidatos restringida, sus siglas en la literatura académica RCL –en inglés *Restricted Candidate List*–, $RCL=\{v:v\in CL, g(v)\geq th$, de esta lista aleatoriamente extrae uno y lo incluye el subconjunto solución. Las iteraciones acaban cuando se cumple su factibilidad.

El coeficiente β, está comprendido entre 0 y 1, $0 \leq \beta \leq 1$. De este coeficiente depende la aleatoriedad o voracidad del algoritmo, si $\beta = 0$ el algoritmo es totalmente aleatorio, debido a que CL = RCL; y si $\beta = 1$ el algoritmo es totalmente voraz, ya que solo podrá tomar el candidato más prometedor. Nótese que, la longitud de la lista de candidatos restringida (RCL) dependerá de este coeficiente. Con este coeficiente se tiene que experimentar para saber el valor que dará un resultado de mayor calidad.

El método constructivo implementado para el problema sigue el esquema del siguiente algoritmo:

$S \leftarrow \emptyset$

$v \leftarrow RND \in \{V\}$

$S \leftarrow \{v\} \cup S$

$CL \leftarrow V \backslash \{v\}$

while $CL \neq 0$ **do**

$g_{min} \leftarrow \min_{v \in CL} g(v)$

$g_{max} \leftarrow \max_{v \in CL} g(v)$

$th = g_{max} + \beta(g_{min} - g_{max}); \beta[0,1]$

$RCL \leftarrow \{V \in CL: g(v) \ni th\}$

$w \leftarrow RND(RCL)$

$S \leftarrow \{w\} \cup S$

end while

return S

Siendo la entrada todo el conjunto de vértices y la salida el conjunto de vértices que cumplen αn.

Cuando se tiene la solución creada por el proceso constructivo, el método realiza una búsqueda local para la mejora de la solución, ya que el anterior proceso no garantiza un óptimo local. Se denomina búsqueda local porque «busca» entre la vecindad una solución mejor a la otorgada anteriormente por medio de un subconjunto de los elementos no existentes en la solución. Por ello es necesario establecer un criterio de búsqueda. Para el problema de este estudio se ha implementado una búsqueda local *first improvement,* la cual examina su vecindad, utilizando una solución de partida y cambia dicha solución cuando encuentra la «primera» solución que mejora a la actual. El algoritmo de implementación es el siguiente:

∗ **for** $u \in R$ **do**

$R \leftarrow R \backslash \{u\}$

for $v \in R$ **do**

$R \leftarrow R\{v\}$

for $v \in S \backslash R$ **do**

$R \leftarrow R \cup \{w\}$

if $CL = \emptyset$ **then**← (Compara calidad de la solución)

go to ∗← (Encontrada solución mejor)

end if

$R \leftarrow R \cup \{w\}$

end for

$R \leftarrow R \cup \{v\}$

end for

$R \leftarrow R \cup \{v\}$

end for

return R

Siendo la entrada, el método constructivo y la salida, la solución mejorada, si la encontrase.

3. Experimentación y resultados

La experimentación se basa en instancias divididas en grupos dependiendo de su número de nodos. Estas a su vez tienen valores de α diferentes - α∈{0.2,0.5,0.8}-, así pudiendo estudiar el comportamiento dependiendo de la complejidad y topologías de las mismas.

Las instancias utilizadas para la experimentación fueron creadas con el modelo ER siguiendo las características de las instancias del artículo que motivó este proyecto.

La experimentación y la obtención de resultados se divide en dos fases, una primera fase (experimentación preliminar) en la que se obtiene el valor de β de la fórmula del método constructivo y una segunda fase (experimentación final) donde, con el valor de β que mejor calidad de resultados ha dado y con la búsqueda local se compara con los resultados obtenidos por el algoritmo MCMC implementado del artículo [6] que se quiere mejorar.

En la experimentación preliminar, se ejecuta el método constructivo primero con los tres valores –estudio 1– que se pueden ver en la tabla 1 y posteriormente «afinando» la búsqueda con los valores contiguos al valor de mejor resultado del estudio 1, como se aprecia en la tabla 2 –estudio 2– para poder encontrar el valor de β del método constructivo que mejor resultado dé.

β	**0,25**	**0,50**	**0,75**
Vdell	3.151	2.892	2.791
Ttot	1.264	777	750

Tabla 1. Estudio 1. Experimentación β

Siendo, α el valor para el problema, β el valor de la fórmula $th=g_{_min}+\beta(g_{_max}-g_{_min})$ que acota RCL; Vdell, número de nodos eliminados, pertenecientes a la solución, Ttot, el total del tiempo que transcurre en la ejecución algoritmo constructivo, expresado en milisegundos. Se puede apreciar en la tabla que el número total de vértices eliminado, igual que el tiempo total, es menor para el valor 0,75, por ello se continúa experimentando en la vecindad de este valor.

β	**0,80**	**0,84**	**0,90**
Vdell	2.787	2.774	2.784
Ttot	1.094	733	1577

Tabla 2. Estudio 2. Experimentación β

Como se aprecia en la tabla 2, el mejor valor para β es 0,84 con el que se realizará las experimentaciones finales.

Una vez obtenido el valor de β para el algoritmo constructivo de GRASP se ejecuta en su totalidad el algoritmo GRASP. Dando los resultados de la tabla 3, donde MCMC es el algoritmo previo [6]; GRASP, el algoritmo codificado para este estudio; Dev % es la deviación entre los dos algoritmos; T, es el tiempo medio de la ejecución de cada uno de las instancias y MS, son las mejores soluciones obtenidas entre la comparativa de los algoritmos. La segunda columna representa la media de nodos eliminados.

		Dev %	**T (s)**	**MS**
MCMC	71,78	**26,83%**	1.070,35652	2
GRASP	52,52	0%	27,36336	50

Tabla 3. Comparativa general GRASP vs MCMC

Los resultados muestran que el algoritmo previo tiene una desviación del 26,83 % al algoritmo implantado para este estudio. Se puede apreciar que el algoritmo implantado tiene una mejora en el tiempo de ejecución y hay que precisar que, habiendo 50 instancias GRASP ha obtenido 50 y MCMC 2, esto es debido a que cuando el resultado es el mismo se ha considerado como mejor solución a ambas, ya que

no hay otra referencia. Con esto, la media de las mejores soluciones ha sido para el algoritmo GRASP 100 %. Si no se quisiera considerar las soluciones iguales como mejor solución, la media sería 96 %.

También se realizó experimentaciones sobre 850 instancias con diferentes valores y números de nodos, comparándolas con un algorítmo RANDOM (aleatorio) y se mejoraba el 98 % de los casos.

Se han utilizado semillas para la realización de las pruebas y la obtención de estos resultados, sin ellas la mayoría de los resultados mejoran.

4. Conclusiones

Se ha comenzado describiendo la problemática de seguridad de las redes, con una contextualización para la integración del problema de este trabajo en nuestro entorno general, integración en las redes, con un estudio de su estado del arte y finalizando, se ha descrito la experimentación y los resultados obtenidos de la misma, que como conclusión se la logrado mejorar los resultados de [6], en aproximadamente un 27 %, pudiéndolos mejorar más, con el algoritmo GRASP modificando las combinaciones de la búsqueda local –sus iteraciones–, por la diferencia de tiempo que hay entre ambas, ya que se ha mejorado también el tiempo de ejecución. Con los resultados obtenidos y después de su análisis, se puede implantar la heurística GRASP para la mejora de redes para el problema de los separadores-α, en muchas de las infraestructuras de red creadas en la sociedad debido a sus topologías y características de estas.

Referencias

1. *G. Anderson, P. Donaltek, R. Farmer, N. Hatziargyriou, I. Kawa, P. Kondur, N. Martins, J. Paserba, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca e.t al., Causes of the 2003 major grid blackouts in north america and europe, and recommended means to improve system dynamic permormance, IEEE transaction on Power System 20 (4) (2005) pp. 1922-1928.*
2. *S. V. Buldyrev, R.Parshani, G Paul, H E Stanley, S. Havlin, Catastrofic cascade failures in independent networks, Nature 464 (7291) pp. 1025-1028.*
3. *M. A. M. Sidi, K-separator problem, Ph.D. thesis, Evry, Institut national des télécommunications (2014).*
4. *U. Feige, M. Mahdian, Finding small balanced separators, in: Proceedings of the thirty-eighth anual ACM symposium on Theory of computing, 2006, pp. 375–384.*
5. *M. R. Garey, D S Jonhon, Computers and intractability: a quide to the theory of NP-completeness, Vol. 29, W H Freeman New York, 2002.*
6. *J. Lee, J. Kwak, H. won Lee, N. B. Shroff, Finding minimum node separators: A markov chain monte carlo method, in: International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN) 2017, pp. 31-38.*
7. *V. Rosato, L. Issacharoff, F. Tiriticco, S. Meloni, S. Porcellinis, R. Setola, Modelling interdependent infrastructures using interacting dynamical models, International Journal of Critical Infrastructures 4 (1-2) (2008), pp. 63–79.*
8. *M. Parandehgheibi, E. Modiano, Robustness of interdependent networks: The case of communication networks and the power grid, in: IEEE GLOBECOM, 2013, pp. 2164–2169.*
9. *R. Durairajan, P. Barford, J. Sommers, W. Willinger, Intertubes: a study of the us long-haul fiber-optic infrastructure, in: ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 45, 2015, pp. 565–578.*
10. *Duarte, Panorámica de procesos metaheurísticos. Seminario sobre sistemas inteligentes. Dykinson S.L., 2007, pp. 331-341.*
11. *Duarte, M. G.C. Resende, R. Martín GRASP for the Regenerator Location Problem, MIC 2011: The IX Metaheuristics International Conference, S1-11 (2011).*

12. *M. Rubio-Sánchez, M. Gallego, F. Gortazar, A. Duarte. GRASP con Reencadenamiento de Trayectorias para Single Row Facility Layout Problem. Actas de la XVII Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial, 2017, pp. 291-300.*

Área VII - Sociedad, economía y humanidades

7A. Modelos socioeconómicos

Análisis de las segregaciones horizontales y verticales por sexo en las Fuerzas Armadas en España 2009-2016

Fleta-Asín, Jorge[1,*], Pan, Fang[2], Chopo-Murillo, Sonia[1], Gargallo-Castel, Ana[3], Medrano-Adán, Luis[1], Muñoz-Sánchez, Fernando[4] y Sáenz-Royo, Carlos[1]

[1] Centro Universitario de la Defensa. jorge.fleta@unizar.es (JFA) schopo@unizar.es (SCM), lmedrano@unizar.es (LMA), csaenz@unizar.es (CSR).

[2] Facultad de Traducción e Interpretación. Universidad Autónoma de Barcelona. fpan@unizar.es (FP).

[3] Facultad de Ciencias Sociales y Humanas de Teruel. Universidad de Zaragoza. gargallo@unizar.es (AGC).

[4] Facultad de Economía y Empresa. Universidad de Zaragoza. fmunoz@unizar.es (FMS).

* Autor principal y responsable del trabajo; jorge.fleta@unizar.es (JFA).

Resumen

En el presente trabajo se analiza la incorporación de la mujer a las Fuerzas Armadas en España durante el periodo 2009-2016. Para ello, en la introducción se señala la importancia de las cuestiones de género y la necesidad de elaborar medidas más precisas de la presencia de la mujer en las organizaciones. Posteriormente, se motiva la importancia estratégica de la incorporación de la mujer en el sector de la defensa. A continuación, se analiza la segregación horizontal mediante el índice de disimilitud, así como la vertical a través del índice de techo de cristal en cada uno de los ejércitos. Los resultados de los análisis muestran que las segregaciones siguen presentes, si bien muestran una convergencia gradual tanto en los distintos cuerpos del ejército como en escalas profesionales.

Palabras clave

Sexo, género, Fuerzas Armadas, segregaciones, índice de disimilitud, índice de techo de cristal.

1. Introducción

En las últimas décadas existe un interés creciente hacia las cuestiones de género. Esta tendencia se consolidó a nivel mundial a partir de la Conferencia de Beijing (1995) de las Naciones Unidas, donde la declaración en favor del empoderamiento de la mujer y política mundial sobre igualdad de género se adoptó de forma unánime por 189 países. En el caso de España, la deseabilidad en la igualdad entre hombres y mujeres queda reflejada principalmente en su Constitución (1978), en la Ley Orgánica 3/2007 de 22 de marzo y en los Planes Estratégicos de Igualdad de Oportunidades vigentes hasta la actualidad (el último del periodo 2017-2020).

Para analizar si los cambios impulsados se producen realmente se necesita información oportuna. Con este propósito a nivel teórico se desarrollan estudios de género y a nivel práctico los gobiernos (p.e. Británico o de España) incorporan paulatinamente estadísticas desagregadas por sexos. Además, en los últimos años los organismos internacionales realizan esfuerzos en proporcionar información estadística sobre la disparidad de género comparada entre países, publicaciones de libros y numerosos informes.

Las fuentes de información, en cuanto a estadísticas y publicaciones, se revelan como necesarias para adecuar las políticas de igualdad y disminuir las brechas de género. Sin embargo, los indicadores que recogen las diferencias por sexo presentan los porcentajes de mujeres existentes en distintos ámbitos (por ejemplo porcentaje de mujeres en las Fuerzas Armadas), sin considerar ese porcentaje respecto al total de mujeres que inicialmente se dedican a esos campos (por ejemplo proporción de mujeres dentro de una especialidad específica o cuerpo). Por ello, conviene no solo distinguir las estadísticas en cuanto a diferencias por sexo, sino también utilizar indicadores más precisos para evaluar su diagnóstico y analizar las causas que las generan con objeto de incidir sobre las mismas [9, 19].

Con este objetivo, en el siguiente apartado se motiva la igualdad de inclusión de las mujeres en las organizaciones, especialmente en el ámbito de la defensa. Posteriormente, se establecen indicadores más precisos y escasamente estudiados como propuesta metodológica, aplicándolos en el ámbito de las Fuerzas Armadas (FAS) en España (2009-2016). Finalmente, en el último apartado se establecen las conclusiones.

2. Motivación e hipótesis

El sistema social reproduce las desigualdades de género a través de numerosos ámbitos que influyen en la forma de pensar de la sociedad, construyendo así la cosmovisión colectiva desde un punto de vista androcéntrico [1]. Estos ámbitos abarcan medios tan diversos como la cultura de procedencia [9, 10, 17], el lenguaje a través del discurso hetero-normativo [18], las leyes [12], la filosofía [13], la religión [7] o la visión sobre las ciencias [16], transformando relaciones asimétricas de poder entre hombre-mujer en situaciones aparentemente lógicas y normalizadas.

Las desigualdades terminan visibilizándose en discriminaciones horizontales y verticales [1,4]. Por un lado las segregaciones horizontales muestran las diferencias existentes entre sexos en diferentes campos, disciplinas o áreas de trabajo de forma longitudinal [1, 16]. Mientras que las discriminaciones ver-

ticales se manifiestan transversalmente en las organizaciones jerárquicas, donde la mujer se encuentra escasamente representada en puestos altos de responsabilidad y salarios [5].

El ámbito de la defensa no está exento de ambas desigualdades, ya que es un sector altamente masculinizado a lo largo de su historia, existiendo tanto segregaciones horizontales como verticales muy acusadas [15]. Una representación más equitativa de sexos en su personal normalizaría la imagen de igualdad entre hombre y mujer, ya que tanto el periodo de aprendizaje como de trabajo son fases socializadoras donde se reproducen esquemas de comportamiento de género que se toman como «correctos» [14].

Este proceso es especialmente importante en los ejércitos porque son instituciones que pueden manifestar socialmente la igualdad proyectando sus labores en la sociedad en la que se integra, así como en las misiones internacionales en las que desempeña sus labores. Además, existen numerosos argumentos que justifican su inclusión porque afecta a sus competencias fundamentales, dado que las operaciones donde se integran hombres y mujeres favorece la legitimización y recepción por parte de la población local, facilita el acercamiento de las mujeres afectadas por conflictos [20], mejora el asesoramiento y difusión de información sobre violencia basada en el género, reduciendo abusos sexuales (sobre todo en campamentos de desplazados y refugiados), incentiva la participación de las mujeres locales y sus organizaciones en los procesos políticos post-conflicto [19], y limita la posible falta de disciplina del componente masculino de las misiones reduciendo la prostitución [6]. Además de esto, la incorporación de la mujer a las labores de inteligencia facilita la labor de recopilación de información en escenarios de intervención militar [2].

A estos beneficios se unen los cambios histórico-sociales y actitudinales en la consideración del género para su integración, que se ven coadyuvados por las políticas de igualdad encauzadas en los últimos años en España, permitiendo pronosticar que se originarán cambios reales en la igualdad de las mujeres en todos los ámbitos [3]. En concreto, las Fuerzas Armadas españolas iniciaron este cambio hacia la igualdad a partir del Real Decreto Ley 1/1988, de 22 de febrero (*BOE* del 23 de febrero de 1988) donde se promueve la igualdad en el ámbito de la defensa y la integración en estructuras militares internacionales. Posteriormente, a partir de la Ley 17/1999, de 18 de mayo, sobre el Régimen del Personal de las Fuerzas Armadas (*BOE* del 19 de mayo de 1999), se inició la equiparación jurídica entre ambos sexos.

La igualdad de género se siguió desarrollando a través de la Ley 39/2007, de 19 de noviembre, sobre la carrera militar (*BOE* del 20 de noviembre de 2007) y la Ley Orgánica 3/2007, de 22 de marzo, para la Igualdad Efectiva de Mujeres y Hombres (*BOE* de 23 de marzo de 2007). En ellos se desarrollan aspectos para equiparar la igualdad entre ambos que incluyen la conciliación de la vida laboral y familiar, así como el régimen de acceso, formación, ascensos y destinos. Además, a partir de la Ley Orgánica de Derechos y Deberes de los Miembros de las Fuerzas Armadas, de 27 de julio (*BOMD* de 28 de julio de 2011) se constituiría el Observatorio Militar de Igualdad donde se analizan los problemas relacionados con los obstáculos que encuentra la mujer en su carrera profesional. Por ello, en base a estos argumentos es de prever que: «las segregaciones horizontales y verticales de la mujer en el ámbito de la defensa estén disminuyendo en los últimos años en España».

3. Fuente y método

El presente estudio de las segregaciones horizontales y verticales en las Fuerzas Armadas en España se aplica a todo el personal militar de carrera en los últimos ocho años desde 2009 al 2016. Para realizar el análisis se recoge información de un intervalo de ocho años, disponible en las publicaciones de «Estadística de Personal Militar de Carrera de las Fuerzas Armadas y de la Guardia Civil» desde el año 2009 a 2016 (Secretaría General Técnica del Ministerio de Defensa del Gobierno de España). Para el estudio se considera la totalidad del personal con las categorías más desagregadas que presentaban información sobre el número de mujeres a partir de los anuarios elaborados por la Secretaría General Técnica del Ministerio de Defensa.

Para analizar la segregación horizontal en los distintos ejércitos y cuerpos se utiliza el índice de disimilitud [11, 23], mientras que para la segregación vertical dentro de las escalas en las que ascienden se utiliza el índice del techo de cristal [8, 11].

El índice de disimilitud (ID) es una medida demográfica de la uniformidad con la que dos grupos –en este caso hombres y mujeres– se distribuyen en campos que forman un área más grande –todas las categorías estudiadas–. El resultado del índice se interpreta como el porcentaje de mujeres que tendría que reubicarse en diferentes áreas con el fin de producir una distribución que coincide con la que presenta en el conjunto inicial estudiado, acorde a la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de Disimilitud (ID)} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left| \frac{m_i}{M} - \frac{h_i}{H} \right|}{2} \quad , \quad 1 \geq \text{ID} \geq 0 \qquad (1)$$

En este caso, a partir de la fórmula del índice de disimilitud, se calcula la elección del personal por cada uno de ejércitos donde desempeñar la carrera profesional. Siendo «i» cada una de las cinco «N» categorías analizadas: «Ejército de Tierra», «Armada», «Ejército del Aire», «Cuerpos Comunes de las FAS» y «Guardia Civil». «M» es la población total de mujeres para todas las áreas para las que se calcula el índice y «mi» la población total de cada una de las sub-áreas «i» analizadas. «H» es la población total de hombres en todas las áreas para las que se calcula el índice; y «hi» la población total de hombres para cada una de las categorías educativas «i» consideradas.

Por otro lado, el índice del techo de cristal (ITC) es una medida utilizada para cuantificar la proporción del conjunto de mujeres que asciende a la máxima categoría de su profesión, en proporción a los hombres que ascienden a la misma posición. En este caso se calcula el índice acorde a la siguiente fórmula:

$$\text{Índice del Techo de Cristal (ITC)} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{N} \text{Mujeres}}{\text{Mujeres}_{\text{Máx.Categoría}}}}{\frac{\sum_{i=1}^{N} \text{Hombres}}{\text{Hombres}_{\text{Máx.Categoría}}}} \quad , \quad \infty \geq \text{ITC} \geq 0 \qquad (2)$$

Siendo «i» el número de personas existentes en cada uno de los escalones de la organización y «N» el número total de escalones profesionales existentes. El subíndice «Max. Categoría» recoge el número total de personas que llegan a la cúspide organizativa según corresponda a hombres o mujeres. El índice alcanza valores entre 0 e infinito. Un valor de 1 indica que no existen dificultades en la promoción de hombres y mujeres. Valores por encima de 1 indican que las mujeres tienen un techo de cristal para ascender, mientras que valores por debajo de 1 indican que la mujer está sobre-representada. De forma análoga, se puede calcular el índice del techo de cristal progresivo (ITCP) para analizar la dificultad de ascender a una posición respecto a la inmediata inferior.

En el caso de las dificultades para ascender, los índices de techo de cristal se calculan agregando para todas las FAS el número de personas que hay en cada escalafón acorde a 20 niveles o escalas (tabla 2). En estos índices el subíndice «Max. Categoría» recoge el número total de personas que llegan a la cúspide organizativa según corresponda a hombres o mujeres: general de ejército (Ejército de Tierra), almirante general (Armada) o general del aire (Ejército del Aire). Mientras que para los índices de techo de cristal progresivo se recogen en el subíndice «Max. Categoría» el número de personas que alcanzan el subsiguiente nivel más elevado en la escala.

4. Resultados

El personal de la Fuerzas Armadas españolas parte de una sobre representación de los hombres respecto a las mujeres, alcanzando una proporción estable del 95 % de hombres respecto a mujeres en el periodo 2009 a 2016 (95,89 % de hombres en 2009 y 94,68 % en 2016. Así, en su conjunto aproximadamente el 5 % de su personal está compuesto por mujeres y su presencia habría incrementado un 1 por ciento en

un intervalo de ocho años, por lo que su incorporación se está produciendo de forma lenta en el periodo analizado.

Dentro del ámbito de la defensa existen diferencias intra-grupo entre los distintos cuerpos que la componen. De las categorías estudiadas en el último año disponible 2016, la mayoría de las mujeres se concentran en los Cuerpos Comunes (17,34 % respecto al total de hombres, donde destaca el Cuerpo Jurídico Militar con un 21,86 % de mujeres y el de Sanidad con un 20,24 %), seguida de la Guardia Civil (6,33 %), Aire (3,88 %), Armada (2,90 %) y Tierra (2,58 %). De este modo, se observa que el Ejército de Tierra es el cuerpo más masculinizado y con menor presencia femenina.

El índice de disimilitud permite calcular cuántas mujeres de las que se dedican a trabajar en defensa, deberían reubicarse entre los distintos tipos de cuerpos para que tuviesen un reparto equitativo entre dichas categorías. Como se observa en la tabla 1, el ID del ejército en su conjunto calculado entre 2009 y 2016, muestra una tendencia decreciente, con unos valores que alcanzan desde el 26,31 % (2009) hasta el 17,97 % (2016), con una caída de 10 puntos porcentuales en un periodo de ocho años. De modo que en el año 2009, existiría un 26 % de mujeres que deberían redistribuirse entre diferentes cuerpos para estar proporcionalmente agrupadas entre sus distintos cuerpos. Estos resultados corroboran la existencia de diferencias en la segregación horizontal y su disminución a lo largo del tiempo.

Año	Todos	Tierra	Armada	Aire	Cuerpos Comunes	Guardia Civil
2009	26,31	30,70	37,53	13,37	14,68	-
2010	24,03	24,57	26,81	47,93	16,46	-
2011	23,08	27,38	34,51	9,92	15,49	-
2012	21,95	27,15	33,4	9,57	15,66	-
2013	20,73	26,49	33,12	10,15	16,37	-
2014	20,09	25,14	31,38	9,68	16,71	-
2015	18,94	24,14	31,18	10,88	17,02	-
2016	17,97	21,11	31,30	11,08	17,66	-

Tabla 1. Índices de disimilitud (%) de las Fuerzas Armadas y por Ejércitos/Cuerpos

El análisis del ID permite observar que existen diferencias entre las especialidades dentro de cada uno de los cuerpos (tabla 1). Así, se observa que mientras en general en el Ejército de Tierra (ID= 30,70 en 2009 a 21,11 en 2016) y la Armada (ID=37,53 en 2009 a 31,30 en 2016) su tendencia es decreciente a lo largo del tiempo, en el Aire (ID= 9,92 en 2011 a 11,08 en 2016) y los Cuerpos Comunes (ID=14,68 en 2009 a 17,66 en 2016) el ID aumenta. De este modo, aunque los cuerpos muestran tendencias diferentes, en su conjunto disminuyen y parecen converger al aumentar su valor los que presentaban valores iniciales más bajos (Aire y Cuerpos Comunes), y disminuir su valor los que presentaban valores iniciales más altos en el periodo de análisis (Tierra y Armada).

Una vez que el personal de las Fuerzas Armadas accede a su propio ejército o cuerpo, este tiene distintas categorías para ascender dentro del mismo. En el caso de los suboficiales de tropa y marinería desde «soldado» a «suboficial mayor», los oficiales desde «alférez» hasta «coronel» (capitán de navío) y los oficiales generales desde «general de brigada» (contra almirante) hasta «general de ejército (almirante general / general del aire). En total existen 20 niveles de promoción (tabla 2).

Escalas			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Oficiales Generales	1	General de Ejército / Almirante General/ General del Aire	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	2	Teniente General / Almirante	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	3	Generales De División / Vice-almirante	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	4	Generales De Brigada / Contra-almirante	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

Escalas			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Oficiales	5	Coroneles / Capitán de Navío	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	45,58
	6	Tenientes Coroneles / Capitán de Fragata	109,44	234,69	49,43	23,42	10,22	5,81	4,05	2,71
	7	Comandantes / Capitán de Corbeta	1,07	1,75	1,65	1,51	1,44	1,38	1,33	1,36
	8	Capitanes / Teniente de Navío	0,42	0,98	0,95	0,91	0,88	0,86	0,83	0,84
	9	Tenientes / Alférez de Navío	0,75	1,65	1,66	1,63	1,64	1,62	1,70	1,60
	10	Alféreces / Alférez de fragata	0,21	0,66	0,71	1,82	3,05	1,39	6,50	3,73
Suboficiales Tropa y Marinería	11	Suboficiales Mayor	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	12	Subtenientes	∞	∞	457,53	471,80	499,38	540,19	562,54	558,29
	13	Brigadas	70,12	109,39	95,12	65,41	30,36	21,27	19,10	14,01
	14	Sargentos Primeros	6,39	5,82	4,89	3,92	3,14	2,57	2,09	1,62
	15	Sargentos	1	0,96	0,84	0,81	0,75	0,73	0,72	0,76
	16	Cabos Mayores	-	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	17	Cabos Primeros	-	2,37	2,40	2,46	2,54	2,54	2,45	2,50
	18	Cabos	-	1,80	1,81	1,62	1,21	1,26	1,34	1,25
	19	Soldado 1º / Guardias	-	1,04	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,03
	20	Soldado / Guardias Alumnos	-	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 2. Índices de techos de cristal por escalas 2009-2016

En el periodo analizado ninguna mujer alcanzó el nivel de promoción de oficiales generales y, dentro de la de oficiales, no es hasta el 2016 cuando se promociona la primera mujer a coronel (Ejército de Tierra). Esto quiere decir que el techo de cristal de la mujer se establece muy pronto ya que no consigue alcanzar ninguna de las cuatro primeras posiciones de entre veinte posibles en toda la historia de las Fuerzas Armadas españolas. Además, tampoco existen mujeres en el escalafón más elevado de la categoría de «suboficiales de tropa y marinería» (suboficiales mayor) ni en la posición intermedia de esta categoría (cabo mayor). Como se observa en la tabla 2, estas categorías en las que no existen mujeres el ITC alcanzan su valor máximo de infinito (∞).

La dificultad para ascender gradualmente puede observarse a través del índice del techo de cristal progresivo (ITCP). En su conjunto se observa que el indicador aumenta conforme se asciende más en cada uno de los años, además de disminuir a lo largo del tiempo en el conjunto de las categorías (tabla 2). Por ejemplo, para llegar a teniente coronel en 2009 el ITCP era de 109,44, mientras que en 2016 descendió hasta 2,71. O el caso de brigada que disminuye de 70,12 (2009) a 14,01 (2016). Sin embargo, el cálculo de los ITCP por categorías permite observar comportamientos diferenciados para algunas escalas en concreto, que aumentan su dificultad conforme la mujer asciende. Por ejemplo esto ocurre para los alféreces (posición 10) cuyo ITCP asciende desde 0,21 (2009) hasta 3,73 (2016); o subtenientes que alcanzan valores desde 457,53 (2011) hasta 558,29 (2016).

5. Conclusiones

Los resultados de las segregaciones revelan la existencia tanto de diferencias horizontales como verticales en la incorporación de la mujer en el sector de la defensa en España. Los hallazgos son acordes a la literatura académica que argumenta su presencia en las organizaciones. Como se establecía en la hipótesis formulada, ambos tipos de discriminación han disminuido a lo largo del periodo 2009-2016, confirmándose una convergencia gradual por sexo en cuerpos/armas y escalas profesionales. Aunque algunos autores cuestionan que el cambio hacia la igualdad quizás no se estaría realmente materializando [22], los resultados confirman que en el ámbito de la defensa español sí se está produciendo de forma lenta. No obstante, estos resultados deben tomarse con prudencia

dado que la progresión de la mujer en las FAS en los niveles más altos se debe en gran parte a la tardía incorporación de la mujer a las mismas (el 22 de febrero de 1988 se reguló la incorporación de la mujer a las FAS). Además, la mujer alcanza en el ámbito de la defensa (no solo personal militar de carrera) valor cercano al 12 % de mujeres, similar al resto de países europeos. Del mismo modo, conviene destacar que algunas subdivisiones analizadas son históricas o a extinguir, por lo que no reflejan la actual inclusión de mujeres a los mismos, si no que contemplan situaciones fijas de años anteriores.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Universitario de Zaragoza la financiación del proyecto CUD2017-07 en el que se enmarca la presente investigación en formato de comunicación.

Referencias

1. *Agut S, Martín P. Factores que dificultan el acceso de las mujeres a puestos de responsabilidad: una revisión teórica. Apuntes de Psicología. 2007; 25(2): 201-214.*
2. *Baños P. Análisis de los atentados suicidas femeninos. Real Instituto Elcano. Documento de Trabajo 17/2009. 2009.*
3. *Centro Superior de Investigaciones Científicas. Plan de igualdad de género en la carrera científica de la agencia estatal CSIC (2007-2009). Madrid: Comisión de Mujeres y Ciencia del CSIC; 2007.*
4. *Charles M. Sex Segregation. The Wiley-Blackwell Encyclopedia of Globalization; 2015.*
5. *Chi W, Li B. Glass ceiling or sticky floor? Examining the gender earnings differential across the earnings distribution in urban China 1987-2004. Journal of Comparative Economics. 2007; 36:243-263.*
6. *Donadio M, Mazzotta C. La mujer en las instituciones armadas y policiales: resolución 1325 y operaciones de paz en América Latina. Buenos Aires: RESDAL; 2009.*
7. *Elósegui M. Mujer y Fundamentalismo. Aequalitas. 2002;10-11:9-13.*
8. *European Commission. Innovation Union Competitiveness Report 2011. Methodological Annex; 2011.*
9. *Fleta-Asín J, Pan F. La violencia de género en el colectivo extranjero: factores culturales e indicadores de prevención. Aequalitas. 2010; 27:48-60.*
10. *Fleta-Asín J, Pan F. Análisis comparativo de la organización educativa entre España y China: Aplicación al caso preuniversitario. Frankfurt: Editorial Académica Española; 2017.*
11. *Fleta-Asín J, Pan F. Segregación horizontal y vertical de género en el profesorado. Acciones e Investigaciones Sociales. 2017;37:187-214.*
12. *Henderson L. Reviewed Works: The Female Body and the Law by Eisenstein, Z. R Law & Society Review. 1991;25(2):411-444.*
13. *Li C. The sage and the second sex: Confucianism, ethics, and gender. Open Court Publishing; 2000.*
14. *Lumadi MW, Shongwe SS. The need for training gender sensitive teachers: addressing education challenges for gender sensitive national development. Contemporary Issues in Education Research. 2010;3(3):41-49.*
15. *Miller LL. Feminism and the exclusion of army women from combat. Gender Issues. 1998;16(3): 33-64.*
16. *Miqueo C, Barral MJ, Delgado I, Fernández T, Magallón C. Del análisis crítico a la autoridad femenina en la ciencia. Feminismos. 2003;1:195-216.*
17. *Pan B, Fleta-Asín J, Pan F. The internationalization of Business Studies: a comparative framework between the European Higher Education System and the Chinese one. Investigaciones de Economía de la Educación. 2010;5:479-498.*

18. *Pan F, Fleta-Asín J. La consideración de la mujer en la sociedad china a través de su lengua. Acciones de innovación y mejora de los procesos de aprendizaje. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza. 2013.*
19. *Robles M. (coord.). Género, conflictos armados y seguridad. Granada: Universidad de Granada y Mando de Adiestramiento y Doctrina. 2010.*
20. *Robles M, García F. (coords.). Enfoque integral de las perspectivas de género en las operaciones. Granada: Editorial Universidad de Granada. 2013.*
21. *Secretaría General Técnica del Ministerio de Defensa del Gobierno de España. Estadística de Personal Militar de Carrera de las FAS de las Categorías de Oficial General, Oficial y Suboficial y de Personal Militar de Carrera del Cuerpo de la Guardia Civil. Madrid: Centro de Publicaciones. 2009-2016.*
22. *Valcárcel A, Miyares A, Herrera A. Paridad II. Instituto de la Mujer. Madrid: Ministerio de Igualdad. 2002.*
23. *Yalonetzky G. A dissimilarity index of multidimensional inequality of opportunity. The Journal of Economic Inequality. 2012;10(3):343-373.*

Conectividad entre terrorismo y el rendimiento del mercado de acciones: el caso de España

Laborda, Ricardo[1,*] y Olmo, José[2]

1 Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. Email: rlaborda@unizar.es

2 University of Southampton, UK. Email: J.B.Olmo@soton.ac.uk

* Autor principal y responsable del trabajo; Email: rlaborda@unizar.es

Resumen

Este artículo evalúa la conectividad entre la actividad terrorista y los rendimientos del mercado de valores español en el periodo 1993-2017 utilizando un marco econométrico propuesto recientemente (1). Construimos un índice de terror diario que refleja la actividad terrorista según su procedencia: el terrorismo doméstico (ETA) y el terrorismo internacional vinculado a extremistas islámicos que han desarrollado su actividad en Europa Occidental y EE. UU. Nuestra evidencia empírica muestra que la conectividad es importante ya que explica aproximadamente la mitad de la varianza del error de predicción, especialmente debido a un claro efecto indirecto o *spillover* del terrorismo sobre los errores de predicción de los rendimientos del mercado de acciones español dado un horizonte temporal de 12 días. La irrupción de terroristas internacionales ha provocado un desplazamiento ascendente de la conectividad total entre el mercado bursátil y el terror en comparación con el periodo de actividad terrorista exclusivamente ligada a ETA.

Palabras clave

Terrorismo, rendimientos del mercado de acciones español, conectividad, efecto contagio, descomposición varianza.

1. Introducción

El Instituto de Economía y Paz define el terrorismo como «el uso amenazador o real de la fuerza y la violencia ilegales para alcanzar un objetivo político, económico, religioso o social a través del miedo, la coacción o la intimidación». Dado que es crucial comprender las consecuencias del terrorismo para implementar políticas antiterroristas más adecuadas, la literatura reciente se ha centrado en evaluar los costes a corto y largo plazo que el terrorismo infringe en varios aspectos de la economía y los mercados financieros, así como en estimar las pérdidas de bienestar de las personas afectadas.

La muerte, las lesiones y la destrucción de capital son los efectos más directos y visibles de un ataque terrorista, pero el terror también tiene efectos económicos indirectos de larga duración. El terrorismo afecta negativamente la estabilidad política que impacta negativamente no solo en el crecimiento per cápita del producto interno bruto de una economía, sino también en su crecimiento potencial a largo plazo (ver [2], [3] y [4]). Un efecto más sutil del terrorismo es que también puede afectar las preferencias de los diferentes agentes económicos y sus decisiones económicas, ya que el terror pone en peligro la vida de tal manera que el valor del futuro se reduce en relación con el presente [3]. Después de un repunte de la actividad terrorista hay una reorientación de la actividad económica desde la inversión productiva a un mayor gasto del gobierno con la intención de incrementar la seguridad de los individuos [5], que constituye un elemento esencial en el proceso de toma de decisiones de consumo e inversión de los individuos [3].

Las consecuencias económicas enumeradas anteriormente también tienen su contraparte en los mercados financieros. En el lado de largo plazo, [6] encuentran que el terrorismo aumenta el coste de la deuda, afectando negativamente a la calificación de solvencia de los Estados y, por extensión, incrementando el coste para las empresas que operan en países afectados, especialmente en los países en desarrollo. La literatura también se ha centrado en el efecto de la actividad terrorista sobre el mercado bursátil, ya que puede afectar las ganancias esperadas futuras y la prima de riesgo de las acciones. En el trabajo de [2] confirman que el alto el fuego declarado por ETA entre 1998 y 1999 tuvo un efecto significativo y positivo en las acciones de empresas vascas, con una parte importante de su actividad empresarial en el País Vasco, y por lo tanto más expuesta a la actividad de ETA, superando a las acciones de empresas no vascas a medida que la tregua se hizo creíble. En el lado de corto plazo, [7] encuentran que diversas técnicas no paramétricas son adecuadas para estudiar eventos terroristas. Encuentran que la mayoría de los ataques terroristas tienen un impacto negativo y transitorio significativo en los mercados bursátiles (ver resultados similares en [8], [9] y [10]). Desde un punto de vista sectorial, la actividad terrorista tiene un efecto fuerte y negativo a corto plazo en la valoración de las compañías aéreas, de viaje y de seguros, [7] y [11]. En [11] se encuentra que la respuesta negativa de la industria de las aerolíneas a la actividad terrorista depende de atributos específicos como el tamaño y el grado de diversificación geográfica de la actividad de las aerolíneas. Por el contrario, la actividad terrorista puede tener un efecto positivo en los retornos de la industria de defensa, ya que existe una expectativa de una mayor demanda de equipos militares y las actividades del sector de defensa están orientadas a proporcionar una mayor sensación de estabilidad y seguridad [12].

El objetivo principal de este trabajo es investigar la conectividad entre los mercados bursátiles españoles y la actividad del terrorismo mediante el examen de los efectos indirectos o *spillover* entre las rentabilidades del IBEX 35 y la Bolsa de Bilbao y una medida de la actividad terrorista, el índice de terrorismo. Para ello, seguimos la literatura reciente, [1], [13] y [14], que proporciona una medida de la interdependencia de los rendimientos de activos y/o volatilidades utilizando un marco autorregresivo vectorial generalizado. Proporcionan diferentes medidas de *spillover* que están relacionadas con la fracción de la varianza del error de predicción de *H* periodos adelante en el pronóstico de una variable debido a *shocks* en cualquier otra(s) variable(s) diferente(s) de la variable estudiada. En este artículo, consideramos la conectividad entre las rentabilidades diarias bursátiles del IBEX 35, de la Bolsa de Bilbao y un índice de terror. Por lo tanto, nuestra medida de conectividad en los mercados financieros españoles considera no solo el rendimiento de las acciones sino también uno de sus posibles determinantes: la actividad terrorista.

Construimos un índice de terror que refleja la actividad terrorista basada en una sola dimensión del terrorismo, las muertes, y nos permite investigar el impacto de un atributo específico de la actividad terrorista en los mercados bursátiles: el origen del grupo terrorista. Asimismo nuestro índice de terror también intenta capturar el efecto psicológico del terrorismo (ver índice global de terrorismo, 2017) al considerar en cada fecha la actividad terrorista durante los cinco años anteriores utilizando un peso decreciente cada año. Durante el periodo bajo estudio, de 1993 a 2017, España ha sido escenario de actividades terroristas, tanto por grupos terroristas nacionales como por grupos extremistas islámicos vinculados a la actividad terrorista internacional. Nuestro índice de terror considera la actividad terrorista de ETA, como principal representante de la actividad terrorista interna, y también refleja los diferentes ataques terroristas extremistas islámicos que ocurren no solo en España, sino también en Europa Occidental y U.S. Asignamos el origen internacional del grupo terrorista basado en la identidad nacional del grupo perpetrador y, en consecuencia, se puede atribuir a un terror globalizado [15]. La consideración de los ataques terroristas que afectan no solo a España, sino también a Europa Occidental y los EE. UU. se fundamenta en su efecto psicológico creciente sobre el sentimiento de los inversores españoles, que puede fortalecer el canal de interdependencia entre los mercados bursátiles y el terrorismo [16].

Nuestros resultados empíricos muestran que durante el periodo de muestra de mayo de 1993-diciembre de 2017, la conectividad no condicionada del mercado bursátil español y el índice de terror es importante, y especialmente para los rendimientos del mercado de valores español, ya que aproximadamente la mitad de la varianza del error de predicción proviene de la conectividad o los efectos *spillover*. Las perturbaciones incondicionales que surgen del índice de terror tienen un claro efecto indirecto sobre la varianza del error de predicción de los rendimientos del mercado de acciones español dado un horizonte temporal de 12 días, pero lo contrario no es cierto. Por lo tanto, nuestros resultados revelan que se espera que el terrorismo se comporte de acuerdo con sus propias motivaciones, sin relación con los fundamentos del mercado de acciones. Asimismo la dinámica de la conectividad entre el índice de terror y el mercado de acciones español muestra que el aumento de los ataques de terroristas internacionales ha provocado un desplazamiento hacia arriba de la conectividad total entre el mercado bursátil y el terror, que especialmente salta cuando hay ataques terroristas internacionales.

2. Metodología y datos

2.1 Datos

Usamos dos tipos de conjuntos de datos. El primer conjunto de datos incluye los precios de cierre del mercado de valores IBEX 35 y Bilbao de Bloomberg. La muestra cubre el periodo comprendido entre mayo de 1993 y diciembre de 2017. Calculamos los rendimientos a partir de las series del logaritmo de los precios.

El segundo conjunto de datos incluye información sobre eventos terroristas. Construimos una base de datos de eventos terroristas recopiladas en la *Global Terrorism Database* (GTD en adelante). Conside-

ramos dos tipos de grupos terroristas: ETA y extremista islámico. La base de datos recopila los ataques terroristas de ETA que provocaron muertes y considera los ataques extremistas islámicos que provocaron muertes en España, Europa occidental y los EE. UU.

El índice de terror se calcula de la siguiente manera. En cada día *t*, consideramos el número de muertes en los cinco años anteriores con un peso decreciente cada año para construir el valor del índice de terror actual. Siguiendo la metodología del *Global Terrorism Index* 2017 construida por el Institute for Economics & Peace asignamos un peso del 52 % al total de muertes del año actual, 36 % del total de muertes del año anterior, 13 % a los dos años atrás cantidad total de muertes, 6 % a la cantidad total de muertes de hace tres años y 3 % a la cantidad total de muertes hace cuatro años. El índice de terror es el logaritmo del índice actual de terror. Al hacerlo, intentamos reflejar no solo el impacto inmediato de un ataque, sino también el impacto psicológico o los efectos posteriores traumáticos que los ataques terroristas tienen en una sociedad. La figura 1 muestra el índice de terror.

Figura 1. Índice de terror.

2.2 Metodología

Seguimos [13] para examinar los efectos indirectos o *spillover* entre el índice de terror y los rendimientos del mercado de valores español. Su metodología de índice de conectividad se basa en una descomposición de la varianza del error de predicción calculado a partir de un vector autorregresivo (VAR) invariante ante el ordenamiento de las variables. Dado el conjunto de variables, Y_i, cuya conectividad debe ser examinada, ajustamos un modelo VAR estándar a las series. Utilizando datos en serie hasta el tiempo *t*, establecemos una predicción *H* periodos adelante y descomponemos la varianza del error de predicción para cada componente con respecto a los *shocks* del mismo u otros componentes en el tiempo *t*. En [13] se propone varias medidas de conectividad basadas en la evaluación de los porcentajes de la varianza del error de predicción en varias variables debido a los *shocks* que surgen en otras variables.

En [13] se muestra diferentes medidas de conectividad en función del foco de análisis a partir del uso de una tabla de conectividad. En nuestra aplicación analizamos las siguientes medidas: 1) medida total no condicionada y condicionada de la conectividad entre el índice de terror y los rendimientos del IBEX 35 y la Bolsa de Bilbao, 2) medidas no condicionadas y condicionadas direccionales de la conectividad del índice de terror y los rendimientos del IBEX 35 y la Bolsa de Bilbao por pares. A partir de estas medidas direccionales es posible estudiar para cada serie la conectividad debido a *shocks* en el resto de variables

(«conectividad de otros») así como el efecto de *shocks* de dicha variable sobre el resto de variables («conectividad hacia otros»).

3. Resultados y discusión

En el periodo analizado la tabla 1 muestra la conectividad no condicionada entre el índice de terror y el IBEX 35 y la Bolsa de Bilbao.

	IBEX 35	Bolsa Bilbao	Índice de terror	Conectividad de otros
IBEX 35	23,9	19,5	56,6	76,1
Bolsa Bilbao	20,1	21,2	58,7	78,8
Índice terror	0,01	0,01	98,8	0,02
Conectividad hacia otros	20,1	19,5	115,3	
Neto	-56	-59,3	115,1	51,6

Tabla 1. Conectividad no condicionada entre índice de terror y rendimientos del IBEX 35 y Bolsa de Bilbao

Un resultado importante que emerge de la tabla 1 es que aproximadamente la mitad de la varianza del error de predicción proviene de la conectividad (51,6 %). Por lo tanto, la conectividad o los efectos indirectos o *spillover* son importantes en promedio o incondicionalmente en nuestra muestra, y especialmente para los rendimientos del mercado de valores español. Para confirmar este punto, la tabla 1 informa en la fila de «conexión de otros» que el IBEX 35 y la Bolsa de Bilbao tienen una conectividad con el resto de variables en torno al 75 %, especialmente debido al efecto del índice de terror (supone en torno al 50 %). Por el contrario el índice de terror tiene una conectividad con el mercado de acciones casi nula, lo que pone de manifiesto que su motivación obedece a intereses propios desligados de los fundamentales del mercado de acciones.

El análisis condicionado, utilizando una ventana rolling de 200 días, de la conectividad entre el índice de terror y el IBEX 35 y la Bolsa de Bilbao proporciona una visión dinámica que nos permite analizar el efecto del terrorismo nacional e internacional sobre el mercado de acciones. En nuestra muestra diferenciamos tres periodos: 1) el periodo de víctimas atribuidas únicamente a la actividad de ETA del 31 de enero de 1994 al 10 de septiembre de 2001, 2) el periodo que incluye víctimas propiciadas por la actividad de ETA y extremistas islámicos desde el 11 de septiembre de 2001 al 5 de septiembre de 2010, y 3) periodo de víctimas atribuidas únicamente a la actividad de extremistas islámicos desde el 6 de septiembre 2010 en adelante.

La figura 2 muestra la conectividad total entre el índice de terror y el IBEX 35 y la Bolsa de Bilbao. Podemos identificar dos grandes ciclos: uno corresponde al periodo de víctimas exclusivamente atribuidas a la actividad de ETA del 31 de enero de 1994 al 10 de septiembre de 2001, mientras que el segundo periodo empieza con el ataque terrorista del 11 de septiembre de 2001 en adelante, que refleja actividad tanto de ETA como de extremistas islámicos. Durante el último ciclo, la conectividad promedio ha aumentado y también su volatilidad. Estos mismos resultados se han obtenido para el análisis de la «conectividad de otros» del IBEX 35 y la Bolsa de Bilbao debido a los *shocks* en el índice de terror.

La conectividad total entre el índice de terror y el mercado de valores español durante la mayor parte del periodo del 31 de enero de 1994 al 10 de septiembre de 2001, que corresponde al periodo de víctimas de ETA, fluctúa entre el 17 % y el 41 %. En el periodo del 11 de septiembre de 2001 al 5 de septiembre de 2010 (última víctima de ETA), que corresponde al periodo de víctimas de ETA y extremistas islámicos, la conexión total entre el mercado bursátil y el índice de terror fluctúa entre el 31 % y el 67 %, y la conectividad promedio total salta del 35 % al 52 %. Por lo tanto, la aparición de terroristas internacionales ha provocado un desplazamiento hacia arriba de la conexión total entre

el mercado bursátil y el índice de terror. En el periodo del 6 de septiembre de 2010 en adelante, que corresponde al periodo sin víctimas de ETA, el índice total de terror y la conectividad de devoluciones del mercado de valores español fluctúa entre 32 % y 64 % y la conectividad promedio total cae al 44 % de forma que el cese definitivo de las actividades armadas de ETA ha conducido a una disminución de la conectividad total.

Es interesante remarcar que la conectividad total del terror/mercado de acciones español salta especialmente cuando hay ataques terroristas internacionales. La conectividad total aumenta del 41 % al 67 % en el ataque terrorista de Nueva York del 11 de septiembre de 2001; de 38,90 % a 59,75 % en los ataques terroristas de París de noviembre de 2015; del 45,58 % al 61,76 % en los ataques terroristas de París de enero de 2015 y del 35,65 % al 47,05 % en los ataques terroristas de Barcelona y Cambrills de agosto de 2017. En nuestra muestra solo hay un evento relacionado con la actividad de ETA que conduce a un aumento significativo del 35 % en términos porcentuales del total de conectividad entre el índice de terror y el mercado de acciones español, desde un bajo nivel de 17,54 % a 23 %: el ataque de ETA del 21 de enero de 2000 que asesinó a una persona, la primera después de que ETA declarara en noviembre de 1999 el fin del alto el fuego que había comenzado en septiembre de 1998.

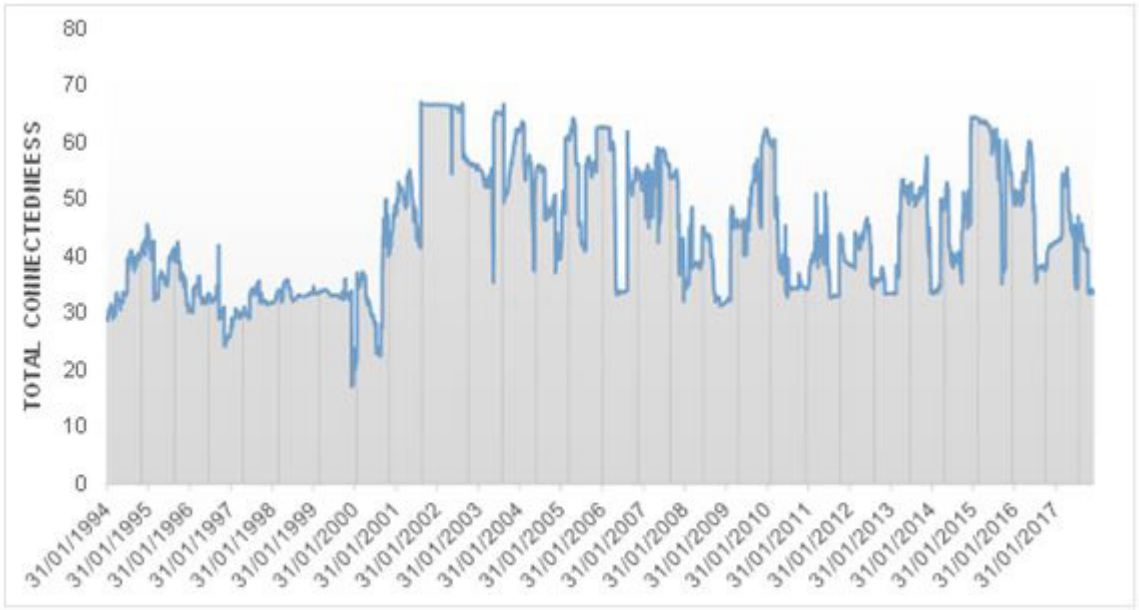


Figura 2. Conectividad entre índice de terror y el IBEX 35 y la Bolsa de Bilbao.

4. Conclusiones

Este artículo estudia la conectividad entre la actividad terrorista y los rendimientos del mercado de valores español considerando la literatura reciente sobre medidas de conectividad [1], [13] y [14]. En este documento, construimos un índice de terror que considera dos tipos diferentes de terroristas: terroristas domésticos (ETA) y grupos terroristas internacionales (extremistas islámicos) que han golpeado a España, Europa Occidental y EE. UU. Al hacerlo, intentamos reflejar el efecto psicológico de la actividad de los extremistas islámicos, que comparten motivos religiosos y políticos, sobre la actividad diaria de los países occidentales. Nuestros resultados confirman que los *shocks* que surgen del índice de terror tienen un efecto indirecto claro en los errores de predicción de rendimiento del mercado de valores españoles, pero lo contrario no es cierto. Nuestro análisis dinámico señala que la irrupción de los extremistas islámicos ha provocado un aumento de la conectividad entre la actividad terrorista y los rendimientos del mercado de valores español, enfatizando el papel del terrorismo internacional como un posible factor global de riesgo del mercado de acciones.

Referencias

1. *Diebold, F., Yilmaz, K. Measuring financial asset return and volatility spillovers, with application to global equity markets, Econ J, 2009, 119, 158-171.*
2. *Abadie, A., Gardeazabal, J.. The economics costs of conflict: a case of study of the Basque country, Am Econ Rev, 2003, 93 (1), 113-132.*
3. *Eckstein, Z., Tsiddon, D. Macroeconomic consequences of terror: theory and the case of Israel, J Monet Econ, 2004, 51, 970-1002.*
4. *Mehmood, S. Terrorism and the macroeconomy: Evidence from Pakistan, Defence and Peace Economics, 2014, 25 (5), 509-534.*
5. *Bloomberg S., Hess, G., Orphanides, A., 2004. The macroeconomic consequences of terrorism, J Monet Econ, 51, 1007-1032.*
6. *Procasky, W., Ujah, N.. Terrorism and its impact on the cost of debt, J Int Money Finance, 2016, 60, 253-266.*
7. *Chesney, M., Reshetar, G., Karaman, M.. The impact of terrorism on financial markets: an empirical study, J Bank Financ, 2011, 35, 253-267.*
8. *Barros, C., Alana, L.Stock market returns and terrorist violence: evidence from the Basque country, Appl Econ Lett, 2009, 16:15, 1575-1579.*
9. *Arin, K., Ciferri, D., Spagnolo, N. The price of terror: the effects of terrorism on stock market returns and volatility, Econ Lett, 2008, 101, 164-167.*
10. *Kollias, C., Papadamou, S., Stagiannis, A. Terrorism and capital markets: the effects of the Madrid and London bomb attacks, Int Rev Econ Fin, 2011, 20, 532-541.*
11. *Kolaric, S., Schiereck, D. Are stock markets efficient in the face of fear? Evidence from the terrorist attacks in Paris and Brussels, Finance Research Letters, 2016, 18, 306-310.*
12. *Apergis, E., Apergis, N. The 11/13 Paris terrorist attacks and stock prices: the case of international defense industry, Finance Research Letters, 2016, 17, 186-192.*
13. *Diebold, F., Yilmaz, K. Better to give than to receive: predictive directional measurement of volatility spillovers, Int J Forecast, 2012, 28, 57-66.*
14. *Diebold, F., Yilmaz, K. On the network topology of variance decompositions: measuring the connectedness of financial firms, J Econom, 2014, 182, 119-134.*
15. *Katos, K., Liebert, H., Schulze, G. On the origin of domestic and international terrorism, Eur J Polit Econ, 2011, 27 (S1), 17-36.*
16. *Drakos, K. Terrorism activity, investor sentiment and stock returns, R Financ Econ, 2010, 19, 128-135.*

Riesgos y amenazas del sector industrial de la defensa

*** De Carlos Izquierdo, Javier[1(*)] y Del Río Solá, Luis Ángel[2]**

[1] Socio-director CuidadoHumano. Avda. Europa, 2. 28224 Pozuelo de Alarcón. Correo electrónico: javierdecarlos@cuidadohumano.com (JDCI).

[2] Jefe Unidad de Integración del Conocimiento Industrial (DGAM- SDG INREID – AGI). Donoso Cortés, 92, 28015 Madrid. Correo electrónico: lariosola@et.mde.es (LARS).

* Autor principal y responsable del trabajo; correo electrónico: javierdecarlos@cuidadohumano.com (JDCI).

Resumen

La base industrial y tecnológica de la defensa (BITD) de un país constituye un elemento fundamental para dotar a sus fuerzas armadas de los elementos con los que se aseguran la paz, la prosperidad y el bienestar de la sociedad.

España es una nación responsable y comprometida con la seguridad y la paz internacional. Nuestra política de defensa respeta estos principios y articula un sistema, junto con nuestros aliados, capaz de facilitar las capacidades necesarias para hacer frente a los riesgos y amenazas de nuestro entorno.

El caso español es similar al de los países de nuestro entorno donde el esfuerzo de la industria por adaptarse a la evolución del mercado nacional e internacional exige ser competitivo ante una demanda globalizada. Del mismo modo que la industria se vuelca en cada oportunidad comercial, los estados apoyan decididamente su internacionalización, mediante un esfuerzo cooperativo.

Esta actividad innovadora, tecnológica e industrial no está exenta de riesgos y amenazas que inciden directamente en el tejido industrial y tecnológico, e indirectamente, en las fuerzas armadas. Por ello, la identificación, análisis y evaluación de los riesgos es clave, para poder tomar las decisiones que los mitiguen o anulen.

Por este motivo, se propone realizar una revisión epistemológica de los riesgos y amenazas del entorno al sector industrial de la defensa de un estado, estableciendo un equilibrio entre los aspectos empíricos y racionales. Posteriormente, se evalúa ontológicamente los riesgos y amenazas que afectan a un nicho del sector aeronáutico militar, el cual se caracteriza por su extraordinario efecto tractor. La comunicación concluye con un modelo basado en agentes en que dos actores compiten por el mercado de los aviones de caza.

Palabras clave

Industria de la defensa, riesgos, sector aeronáutico.

1. Introducción

La *Estrategia Industrial de Defensa* o EID fue elaborada por primera vez en España en el año 2015. Su finalidad que está plenamente en vigor es dotar a sus Fuerzas Armadas de los elementos con los que asegurar la paz, la prosperidad y el bienestar de la sociedad. Para ello se procura potenciar las capacidades industriales estratégicas para la defensa y consolidar la base industrial y tecnológica de la defensa (BITD) española.

Con anterioridad España ya había elaborado y actualizado una *Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa,* orientada al desarrollo tecnológico de la BITD para atender las necesidades de las FAS. La novedad sobre la que se centra este trabajo es que la primera *Estrategia Industrial de Defensa* publicada en 2015 propone la creación de un Sistema de Gestión del Conocimiento Industrial (SGCI). Y en particular la estrategia detalla que el SGCI debe estar orientado hacia las funciones de inteligencia para asesorar y orientar la toma de decisiones en materia de política industrial. Este tipo de arquitectura es la que permite a la administración y a la industria aprovechar las oportunidades del mercado internacional, gracias al apoyo decidido de sus estados. Así la EID española diseñó una arquitectura que es la habitual en los países de nuestro entorno y muy necesaria en el mercado global del siglo XXI.

Evitar el riesgo, estar preparado para afrontar la amenaza, gestionar el peligro y recuperarse del daño, son elementos que deben estar asociados al Sistema de Gestión del Conocimiento Industrial español. De esta manera la Estrategia Industrial de la Defensa tiene vocación de tomar la iniciativa y adoptar medidas que se anticipen a los hechos, es decir, de carácter preventivo.

La inteligencia artificial y en particular los modelos informáticos basados en agentes pueden ofrecer una herramienta interesante para poder modelar y en cierta manera predecir el comportamiento de los estados como agentes activos de un mercado determinado. Por este motivo en este trabajo tratamos de establecer un modelo de análisis para el nicho comercial de los aviones de caza. En él hemos identificado varios agentes individuales, que corresponden a los cuatro principales agentes, tratando de identificar sus intereses y recrear los patrones de toma de decisiones. Este tipo de modelos deben de facilitar la toma de decisiones a partir de parámetros predecibles. La utilización de la inteligencia artificial convenientemente valorada por el analista de inteligencia debe orientar la toma de decisiones en aspectos tales como determinar a qué mercado puede dirigirse o proponer en qué segmento especializarse. Tan solo así se puede reducir la incertidumbre, afrontar la amenaza y ser competitivo en el exigente mercado global.

2. Las Estrategias para Industria y la Tecnología de la Defensa de 2015

En el año 2015 el Ministerio de Defensa publicó dos nuevas estrategias: La Estrategia Industrial de Defensa y la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa. La *Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa* o ETID (MINISDEF 2015a) actualiza otra anterior de 2010 y su finalidad es el desarrollo de la tecnología vinculada a las necesidades actuales y futuras de las FAS. En ella se establecen cuatro objetivos principales que son los siguientes: (1) establecer metas tecnológicas que sirvan de referencia para guiar el planeamiento de la I+D+i del MINISDEF; (2) desarrollar mecanismos que mejoren la gestión y coordinación de la I+D+i del MINISDEF y el aprovechamiento de los resultados

obtenidos, así como realizar el seguimiento de la estrategia; (3) orientar a la base tecnológica e industrial nacional sobre los intereses tecnológicos del MINISDEF y establecer nuevos mecanismos de intercambio de información; y (4) apoyar la coordinación y cooperación con el sistema de I+D+i nacional y con los organismos internacionales vinculados a la I+D+i de defensa y seguridad.

Pero merece especial mención la *Estrategia Industrial de Defensa* o EID (MINISDEF 2015b), ya que ha sido la primera de su clase elaborada en España. En ella se subrayaron tres grandes objetivos, plenamente en vigor y que son los siguientes: (1) dotar a las Fuerzas Armadas de los mejores sistemas posibles que le son necesarios; (2) potenciar las capacidades industriales estratégicas para la defensa; y (3), consolidar la base industrial y tecnológica de la defensa (BITD) española. En ella también se establecen siete ejes estratégicos transversales que deben favorecer los tres objetivos de primer nivel.

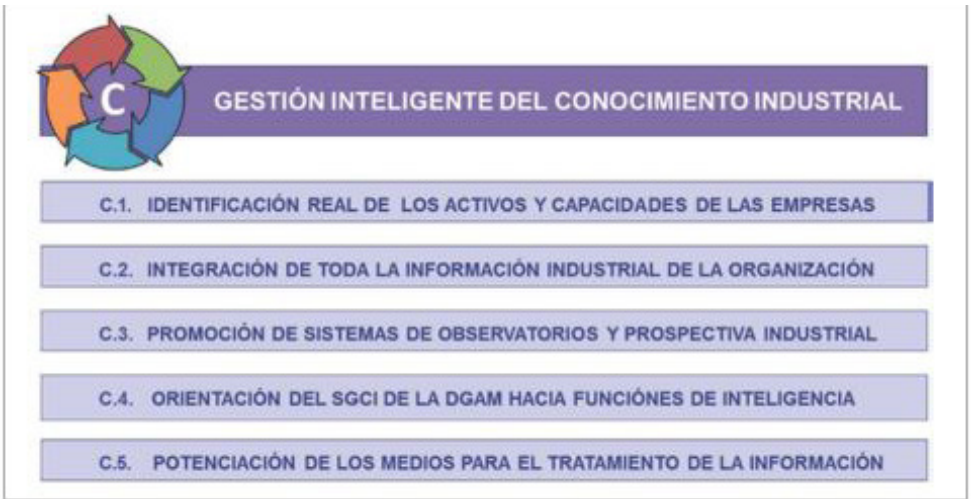


Figura 1. Eje Estratégico C (MINISDEF 2015).

Nos interesa señalar el eje estratégico C o gestión inteligente del conocimiento industrial, por su importancia en cuanto a la identificación de los riesgos y amenazas del sector industrial de la defensa. Este eje estratégico supone el conocimiento real de la industria de la defensa mediante un Sistema de Gestión del Conocimiento Industrial (SGCI). El SGCI permite el mantenimiento y desarrollo de la base industrial y tecnológica de la defensa (BITD) para asesorar y orientar la toma de decisiones en materia de política industrial. El eje estratégico C contempla cinco líneas de trabajo distintas: (C.1) identificación real de los activos y capacidades de las empresas; (C.2) integración de toda la información industrial de la organización; (C.3) promoción de sistemas de observatorios y prospectiva industria; (C.4) orientación del SGCI de la DGAM hacia funciones de inteligencia; (C.5) potenciación de los medios para el tratamiento de la información.

En relación con la identificación de riesgos y amenazas para la industria de la defensa, nos interesa señalar la *línea de trabajo C.4*, referida a orientar el SGCI de la DGAM hacia funciones de inteligencia. Dicha línea debe contemplar la evaluación del riesgo, que es el objeto de este trabajo que propone un modelo de gestión de riesgo.

3. Los riesgos y amenazas para el sector industrial de la defensa

Los riesgos y amenazas son aspectos esenciales para la inteligencia. La inteligencia hoy en día ha evolucionado rápidamente operando en un entorno de gran incertidumbre, viéndose obligada a proporcionar resultados a partir de información parcial y fragmentada. El proceso de cambio continuo y acelerado motivado por la globalización ha provocado que sean poco previsibles algunos riesgos, amenazas, peligros y daños[1]. Todo ello hace que la industria de defensa sea más vulnerable y *que la situación sea cambiante y en cierto modo de difícil predicción.*

1 En anexo A se incluyen definiciones asociadas al proceso de gestión del riesgo.

Los riesgos deben de abordarse en el momento adecuado, para evitar que se conviertan en peligros. Por ello es necesaria una gestión del riesgo sistemática, estructurada y temprana. La inclusión de la «inteligencia industrial» en la ESN 2017 es un acierto para asegurar la acción coordinada de la administración al objeto de proteger la *industria de la defensa* nacional, y será la piedra de toque para monitorizar los riesgos y consolidar una respuesta coordinada para reducir los efectos más perjudiciales. *Se trata de una estrategia esencialmente preventiva, porque su función debe ser reducir el riesgo* o al menos evitar que este se incremente asegurando las capacidades críticas necesarias.

Figura 2. Del riesgo al daño (elaboración por los autores).

Se debe apreciar en la Estrategia de Seguridad Nacional su interés por impulsar el desarrollo de las fortalezas industriales, y la conversión de las debilidades en oportunidades y como su desarrollo sostenido en el tiempo. Del mismo modo, ante peligros inminentes sobre la industria que dispone de capacidades estratégicas para la defensa, se deben aplicar los instrumentos contemplados en la *Estrategia Industrial de Defensa* frente a las amenazas de un mercado tan competitivo. Las políticas industriales deben ser capaces de apoyar, impulsar o proteger las capacidades de la base industrial y tecnológica frente a una evolución del mercado que amenace su posición competitiva, para tratar de reducir la probabilidad de que acontezca e impedir los daños sobre el tejido industrial y el empleo.

Desde el punto de visto epistemológico, para realizar un análisis pormenorizado de los riesgos y amenazas existen diversas técnicas estructuradas que aportan una visión multidisciplinar de escenario inicial lo que aporta coherencia interna a su identificación. Por otro lado, existen modelos que permiten la simulación de entornos sociales basado en las acciones de distintos agentes, cuyo análisis estadístico facilita la toma de decisiones y, en el caso que nos ocupa, aporta elementos de juicio que faciliten la minimización de los riesgos percibidos. A continuación se expondrán las oportunidades que ofrece NetLogo como entorno de simulación.

4. La Universidad de Northwestern y NetLogo

NetLogo es un lenguaje de programación que fue diseñado en 1999 por el profesor Uri Wilensky de la Universidad de Northwestern. Este lenguaje con frecuencia es utilizado en el ámbito científico para elaborar modelos en las ciencias sociales, la biología o la física. El profesor Wilensky es el director del Centro de Aprendizaje Online y elaboración de modelos mediante ordenadores[2] de esta universidad privada de Evanston, en el estado de Illinois. También es cofundador del Instituto Northwestern de

2 El centro es conocido por sus siglas en ingles (CCL), que corresponden a *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*. El CCL está dedicado al desarrollo de tecnología para el aprendizaje profundo. Su página web está disponible en: https://ccl.northwestern.edu/

Sistemas Complejos[3] (NICO) de la misma universidad. En su origen el lenguaje NetLogo fue diseñado para enseñar a los niños en los colegios, enseñando los conceptos de programación mediante imágenes de tortugas, parches y otras herramientas de fácil uso. Por ello, gracias a su facilidad de manejo y a su gran potencial fue usado por expertos para establecer modelos a partir de fenómenos inter relacionados.

Las ventajas de usar el lenguaje NetLogo son variadas (Wilensky y Rand 2015). Es un lenguaje de código abierto, disponible de forma gratuita que permite la creación de nuevos modelos, así como la modificación de modelos existentes. Además, con frecuencia se utiliza para publicar artículos académicos y realizar ensayos científicos. Por último, este lenguaje es especialmente interesante para diseñar modelos de fenómenos sociales y técnicos que estén relacionados (Vidal 2006:121-134). Este es el caso del estudio de los riesgos y amenazas para la industria de la defensa, en donde existen factores estratégicos, económicos y geopolíticos con un impacto industrial y tecnológico muy importante. Por este motivo hemos elegido NetLogo para elaborar un modelo basado en agentes en el que, a modo de ejemplo, dos actores compiten por el mercado de los aviones de caza.

5. Modelo basado en agentes: mercado aeronáutico, los aviones de caza (fighters)

El lenguaje de programación creado en 1999 por el profesor Uri Wilensky es lo que se denomina un modelo basado en agentes o MBA. Este tipo de modelos permite interactuar entre actores y simular acciones dentro de un entorno, pudiendo valorar qué efectos producen en el conjunto del sistema. En realidad, todos los MBA mezclan aspectos de la Teoría de Juegos en sistemas complejos con el estudio de redes propio de la inteligencia y de la sociología informática. En términos generales, aportan una visión ontológica de las variables y en la forma en que se relacionan entre sí. La aportación más reciente y de indudable potencial económico-industrial es el análisis realizado por Martí y Fonfría (2018) en relación con el mercado de defensa de un estado, considerado este como un todo.

En lo que a este documento se refiere, hemos seleccionado un nicho del mercado de defensa, el nicho de los aviones de caza, y hemos identificado a los dos fabricantes principales: Lockheed Martin (F-35) y el consorcio Eurofighter (EF-2000). Estos fabricantes se han considerado agentes individuales que defienden sus propios intereses comerciales y estratégicos. Simplificamos voluntariamente el mercado, generando un tercer proveedor que fusiona a Rusia y China conjuntamente, como grandes proveedores.

5.1 El nicho de mercado de los aviones de caza y situación actual.

El concepto de los sistemas de combate aéreo futuro está aún en discusión, y con independencia de su evolución, se basarán en modelos y fabricantes actualmente conocidos por lo que es preciso conocer el estado actual de las aeronaves activas e identificar los futuros programas nacionales.

Según datos del Sistema de Gestión del Conocimiento Industrial de la DGAM, existen 15.942 aeronaves activas en el año 2018, que están distribuidas regionalmente de una forma más importante en la zona de Asia-Pacífico (más de 5.000) y posteriormente Europa, América y África-Oriente Medio, cada uno con unas 3.000 aeronaves. Son 102 los países que disponen de estas aeronaves, perteneciendo a diversas generaciones; los países con mayor número de aeronaves son: Estados Unidos, Rusia, China e India. Por otro lado, existe 32 programas de renovación, actualización o adquisición de nuevos aviones de combate tipo caza. No todos tienen el mismo nivel de ambición (en cuento a unidades y alcance económico) pero supone una base sobre la que se puede modelar el futuro inmediato.

Ante esta situación del mercado, es posible simular la posible evolución del mismo ante la presencia de dos modelos, como es el caso de la irrupción del F-35 norteamericano y el modelo EF2000 europeo. Para ello, hemos empleado un modelo basado en agentes el cual simplifica intencionadamente el panorama del sector de

3 El instituto es conocido por sus siglas en inglés (NICO), que corresponden a Northwestern Institute on Complex Systems. El NICO fue fundado en 2004 y su objetivo es descubrir los principios que organizan la ciencia, la tecnología y el comportamiento humano, para resolver problemas de tipo social a través del análisis, diseño y control de sistemas complejos. *Today, NICO serves as a hub and facilitator for pathbreaking research in complexity and data science transcending the boundaries of established disciplines*. Su página web está disponible en: https://www.nico.northwestern.edu/

la defensa. La simplificación afecta a los agentes del mercado (países) así como a su comportamiento, concretado en el número de países que se decantarían por uno y otro modelo. Nos hemos basado en datos empíricos y también en aspectos formales como son las relaciones geopolíticas establecidas (factor alianzas), la existencia de una industria militar local (factor industrial) o la de disponer de aeronaves de un origen determinado (factor continuidad). Su modelado informático se realiza inicialmente en un escenario extremadamente sencillo, el cual facilita verificar el potencial realismo de las políticas establecidas. Posteriormente, se añaden variables más complejas que buscan aproximar el modelo a la realidad y es posible evaluar escenarios más exigentes, derivados de la evolución económica de cada país o región, conflictos latentes, grado de distensión o políticas de bloques.

6. Resultados y discusión

Los resultados que se muestran son fruto de 1.000 iteraciones o simulaciones de la potencial evolución del nicho de mercado de los cazas partiendo del hecho que existen 8 países que disponen de EF2000 y 10 países tienen o van en recibir en breve aeronaves norteamericanas. Teniendo en cuenta que son aviones de distintas generaciones, el modelo EF2000 representa una apuesta sólida a largo plazo para proporcionar aviones de caza hasta 16 países en los próximos 30 años, lo que aseguraría la cadena de suministro a largo plazo. Por otro lado, el F35 estará en las flotas de al menos 19 países (escenario más prudente) y empezará a ser reemplazado alcanzados los 30 años (coincidiendo con la fase de modernización de su media vida), por un modelo más avanzado.

A la vista de este modelo, cabría proponer la constancia y apoyo a una política industrial de prolongación de la producción del modelo EF2000 frente a la fabricación de nuevos sistemas, incluso tecnológicamente más avanzados. Evidentemente, disponer de aviones de combate de nueva generación responde a necesidades estrictamente de defensa, ligadas a las capacidades militares y a las amenazas de nuestro espacio geopolítico. Por ello, los resultados de esta simulación no deben interpretarse como una renuncia a disponer de más de una flota de aeronaves, de diferente generación e incluso de diferente procedencia. Ahora bien, no podemos descartar que el EF2000 sea un modelo con un éxito comercial moderado a corto y medio plazo.

Una representación gráfica de la evolución estadística del modelo se muestra en la figura 3. Se observa una presencia prolongada y constante en el tiempo del modelo EF2000 frente al F35 que muestra un rápido crecimiento para posteriormente evolucionar de una forma más irregular debido a la irrupción de aeronaves del tercer productor (rusas y chinas) y que están sujetas a las relaciones de proximidad ideológica o intereses geoestratégicos. La presencia del Eurofighter en el mercado, aunque más modesta, es más estable.

Esta simulación debería poderse recrear con información derivada del impacto de precio por unidad y de las políticas de compensación industrial que ciertos compradores exigen con el objeto de reforzar su tejido industrial nacional. Creemos que estas consideraciones enriquecerían el modelo.

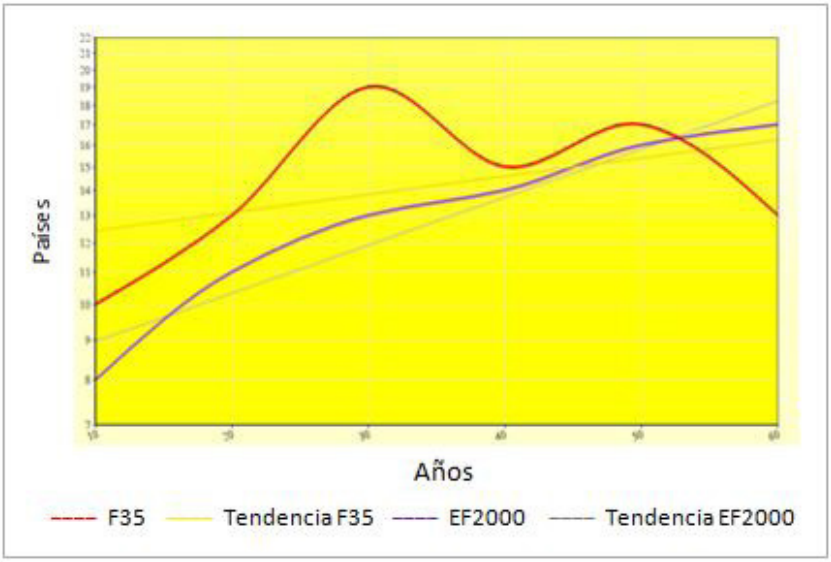


Figura 3. F35 Vs. EF2000 (fuente: SGCI DGAM).

Por último, es necesario declarar que esta simulación se ha fundamentado en unos parámetros clásicos, no disruptivos del entorno de seguridad de defensa a nivel global y que se han concretado en:

- Ausencia de un conflicto global.
- Continuidad de los conflictos regionales, que no se extienden geográficamente.
- Crecimiento económico global sostenido.
- Ausencia de tecnologías disruptivas.
- Existencia de un tercer productor que reúne la producción de origen china y rusa.
- Los países pueden disponer de aeronaves con más de una procedencia.

7. Conclusiones

España en el año 2015 hizo pública su primera *Estrategia Industrial de Defensa,* cuya finalidad es dotar a sus Fuerzas Armadas de los elementos necesarios con los que asegurar la paz, la prosperidad y el bienestar de la sociedad. Sin poseer una base industrial y tecnológica de la defensa bien consolidada es difícil que un país pueda asegurar que las fuerzas armadas posean los medios necesarios para el cumplimiento de su misión. Por estos motivos la *Estrategia Industrial de Defensa* publicada en 2015 está orientada a poseer un Sistema de Gestión del Conocimiento Industrial, el cual incorpora las funciones de inteligencia algo frecuente en los países de nuestro entorno. Las funciones de inteligencia deben permitir asesorar y orientar la toma de decisiones en materia de política industrial.

El Sistema de Gestión del Conocimiento Industrial debe estar orientado a que la base industrial y tecnológica de la defensa de España sea competitiva en el mercado global y satisfaga las necesidades de las Fuerzas Armadas. Para ello es esencial asesorar la toma de decisiones que reduzca el riesgo, que nos prepare para afrontar la amenaza, que nos permita gestionar el peligro y recuperarnos del daño que pueda sufrir la BITD.

El modelo basado en agentes presentado en este trabajo es una herramienta útil para asesorar la toma de decisiones del nivel estratégico. La principal conclusión del modelo aplicado al segmento de los aviones de caza, es que existe la posibilidad de modelar el comportamiento de los estados como agentes activos de un mercado determinado. Esta modelización permite recrear los patrones de decisión que conducen a la decisión de adquirir o producir una aeronave determinada. Los patrones de decisión utilizados se apoyan en factores militares, económicos, sociales en incluso políticos, que a su vez permiten valorar las probabilidades de que esto o aquello suceda en un espacio temporal determinado. En nuestra opinión el modelo presentado permite facilitar la toma de decisiones a nivel estratégico y proporciona elementos de juicio para la definición de políticas industriales relativas al material de defensa. El modelo basado en agentes aquí presentado se basa en parámetros predecibles que permiten reducir la incertidumbre y asesorar la toma de decisiones para determinar si es más conveniente adquirir o producir un producto, o determinar la conveniencia o no de tratar de incorporarse a un determinado mercado internacional.

Referencias

1. *Martí, C, Fonfría, A. An Analysis of the Defence Industrial Market Based on Agents. Defence and Peace Economics. 2018. Disponible en: https://doi.org/10.1080/10242694.2018.1500675*
2. *MINISDEF (a). Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa, ETID 2015. Madrid: DGAM, SGPLATIN. 2015. Disponible en: https://goo.gl/QFhdyr*
3. *MINISDEF (b). Estrategia Industrial de la Defensa. Secretaria de Estadio de Defensa, DGAM, SGINREID. Madrid: Dirección General de Armamento y Material. 2015. Disponible en: https://goo.gl/TkMWQQ*
4. *Wilensky U. y Rand W. An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo. MIT Press, 2015.*
5. *Vidal, J. M. Fundamentals of Multiagent Systems: Using NetLogo Models. System, 2006. Disponible en: http://jmvidal.cse.sc.edu/papers/mas.pdf*

Productividad en mercados regulados: el caso de la industria española de defensa

F.J. Callado-Muñoz[1*], J. Hromcova[2], M. Sanso-Navarro[3], N. Utrero-González[1], M. Vera-Cabello[1]

[1] Centro Universitario de la Defensa Zaragoza.

[2] Universitat Autónoma de Barcelona.

[3] Universidad de Zaragoza.

* Autor principal y responsable del trabajo; fcallado@unizar.es

Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar si el nuevo proceso de adquisición promulgado en las instrucciones 2/2011, 67/2011 y 72/2012 del secretario de Estado de Defensa ha afectado a los resultados de las empresas que contratan con el Ministerio de Defensa y, en consecuencia, están mejor posicionadas para seguir siendo competitivas a escala global o para ser un socio atractivo de cooperación, especialmente en el contexto europeo. Para ello, realizamos un análisis basado en el enfoque de diferencia en diferencias (DiD) con datos de panel no balanceado de 250 empresas de defensa españolas en el periodo 2000-2015, que incluye contratistas de Defensa. Los resultados muestran que los efectos de las reformas regulatorias analizadas son, en el mejor de los casos, limitados y que se deben tomar acciones adicionales o alternativas para alentar las mejoras en el desempeño de los contratistas.

Palabras clave

Adquisiciones defensa, mercados regulados, resultados.

1. Introducción

La regulación de un mercado se establece de manera general para evitar fallos de mercado, externalidades o información asimétrica [6]. El mercado de defensa no es una excepción. [11] señala que los mercados de defensa comprenden el Ministerio de Defensa y las Fuerzas Armadas, que son agencias de adquisición que compran equipos de industrias de defensa nacionales y/o extranjeras, y contratan personal militar y civil típicamente de los mercados laborales nacionales. En este contexto, la regulación mundial podría explicarse tanto por motivos económicos (demanda limitada, productos complejos y larga duración entre otros) como estratégicos (seguridad nacional). En realidad, los sistemas de adquisición están regulados para proporcionar incentivos para la producción del sector privado y, en muchos países, la contratación pública de sistemas militares también se ha utilizado como una herramienta para lograr objetivos industriales y desarrollar capacidades industriales y tecnológicas nacionales [16].

El cambiante escenario geopolítico ha cuestionado los mercados de defensa en los países occidentales [3]. La naturaleza novedosa de los conflictos, las nuevas tecnologías y la creciente opinión pública contra las intervenciones multinacionales como una alternativa para resolver conflictos ha planteado un desafío a los ejércitos occidentales para adaptarse a las nuevas circunstancias. Estos cambios junto con la reciente crisis económica han llevado a recortes en el presupuesto militar [20]. En consecuencia, los sectores industriales de defensa occidentales se han visto obligados a adaptarse a medida que sus mercados tradicionales evolucionan y disminuyen. Por ejemplo, las compañías de defensa en los principales estados productores de armas se han convertido en corporaciones multinacionales a través de fusiones y adquisiciones [14].

En este contexto, la Unión Europea (UE) ha intentado desarrollar una política industrial de defensa [12]. En 1998, se firmó el Acuerdo Marco de Seis Naciones para facilitar la reestructuración de la industria de defensa en Europa y reflejó el deseo de mantener la competitividad relativa de la industria europea. En 2004, la Agencia Europea de Defensa (AED) se creó para promover y mejorar la cooperación armamentística europea, fortalecer la base industrial y tecnológica de defensa europea y crear un mercado europeo competitivo de equipos de defensa. En este sentido, el Plan de Acción de Defensa Europeo aprobado en 2016 ha enfatizado la necesidad de impulsar la cooperación en seguridad y defensa y reforzar el mercado interno aumentando la competencia y competitividad y fomento de la inversión en innovación. En particular, incita a reducir el uso del artículo 296 del tratado de la UE, que exime a la gran mayoría de los contratos de adquisiciones de defensa de las reglas del mercado único.

El mercado de defensa español ha intentado adaptarse a estos cambios. Desde la década de 2000 ha habido varias iniciativas para adaptar las Fuerzas Armadas al nuevo escenario. Se ha producido una reestructuración del Ministerio de Defensa y la Fuerza, así como la aprobación de diferentes leyes y directivas para responder a las necesidades estratégicas del país [17]. En este sentido, la aprobación de la Orden Ministerial 37/2005 para la planificación de Defensa reemplazó el sistema tradicional basado en amenazas con una nueva planificación basada en capacidades [5]. Esta planificación se estableció para facilitar la armonización de los ciclos de planificación de España y la OTAN, sistematizar la transformación y proporcionar al ejército del país un catálogo polivalente y flexible de capacidades.

Esta fase de racionalización concluyó con la aprobación de las instrucciones 2/2011, 67/2011 y 72/2012 sobre los recursos financieros, los requisitos materiales y el marco de contratación. Integran el proceso de determinación de requisitos de capacidad con el proceso de adquisición y el proceso de desarrollo de programa y presupuesto, respectivamente. Este marco es similar, en espíritu, al desarrollado por el Departamento de Defensa de EE. UU. [22] y la Direction Générale de l'Armement francesa. Uno de los principales objetivos es desarrollar una intensa relación con los proveedores para adquirir sistemas avanzados de armas de manera más eficiente. Esto es especialmente relevante ya que las adquisiciones de defensa españolas se han caracterizado por prácticas gerenciales burocráticas anticuadas, sin escrutinio externo e independiente y sin una gestión adecuada de las desviaciones de costos [5]. Al mismo tiempo, el sector de defensa español ha tenido un impacto económico positivo en los contratos de adquisición basados en el poder de negociación de los contratistas y los contratos no competitivos [9]. Este margen discrecional ha permitido proteger a las industrias nacionales frente a los países extranjeros, incluso dentro de la UE. Sin embargo, los recientes esfuerzos europeos para alentar la competencia y liberar el suministro obligarán a las industrias a adaptarse y ser flexibles para sobrevivir en el mercado de defensa global [3]. Este nuevo procedimiento de adquisición está diseñado para estimular los cambios necesarios.

Este trabajo se suma a la evidencia sobre el mercado de defensa español mediante el estudio de las recientes reformas regulatorias. En particular, el objetivo es analizar si el nuevo proceso de adquisición, promulgado en 2011, ha afectado el desempeño de las firmas que contratan con el Ministerio de Defensa y, en consecuencia, están mejor posicionadas para seguir siendo competitivas a escala global o para ser un socio atractivo de cooperación, especialmente en el contexto europeo. Nuestra estrategia de identificación se basa en el enfoque de diferencia en diferencias (DiD). Para eso, utilizamos datos de panel no balanceados de 250 firmas de defensa españolas en el periodo 2000-2015, que incluye contratistas de defensa. Los resultados muestran que los efectos de las reformas regulatorias analizadas son en el mejor de los casos limitados y que se deben tomar acciones adicionales o alternativas para alentar la mejora del desempeño de los contratistas.

2. Política de adquisiciones e industria de defensa en España

La reciente transformación del mercado de defensa global también ha impactado al sector español. El sector ha experimentado cambios significativos en crecimiento, ampliando su gama de productos e incorporando tecnologías nuevas y más avanzadas [10]. Sin embargo, para comprender esta evolución reciente, se debe analizar la reestructuración empresarial y la intervención pública, ya que el Ministerio de Defensa ha fomentado algunos cambios mediante la participación en organizaciones internacionales y decisiones de adquisición.

La industria de defensa española está compuesta por un conjunto de empresas heterogéneas que van desde armas hasta textiles, y desde productos electrónicos hasta servicios [7]. Tradicionalmente, se ha caracterizado por un alto grado de concentración con pocos grandes contratistas y un número importante de pequeñas y medianas empresas (generalmente contratistas de segundo nivel) [1]. En 2015, el 17 % de este sector estaba compuesto por grandes empresas con más de 250 empleados y el 83 % son pequeñas y medianas empresas (el 70 % de ellas con menos de 50 empleados). Además, once empresas concentran el 90 % de las ventas al Ministerio de Defensa en 2015.

La estrategia industrial explícita del Ministerio de Defensa para estimular la modernización y construir una base tecnológica sólida ha implicado esfuerzos relevantes en I + D militar [10]. El desarrollo posterior de la tecnología de defensa ayuda a avanzar hacia desafíos estratégicos e impulsar la economía nacional (EID, 2015). Al mismo tiempo, el apoyo institucional a la internacionalización a través de acuerdos entre gobiernos y el desarrollo de la diplomacia de defensa [3], así como la participación nacional en organizaciones internacionales como EDA u OCCAR (Organización para la Cooperación Conjunta de Armamentos) han permitido que la industria se involucre en programas transfronterizos. Todos estos esfuerzos han terminado en un importante aumento de la capacidad de exportación. En 2014, más del 85 % de la facturación fue ventas internacionales.

Por otro lado, los procedimientos de contratación en España se han basado tradicionalmente en el financiamiento de la I + D militar, así como en asegurar cierto nivel de beneficios a las empresas [7]. Los programas de compras no se basaron en un escenario financiero realista y estable, ni se administraron adecuadamente. Esta política ha provocado retrasos y sobrecostos e hipotecado las finanzas del Ministerio de Defensa para adquirir sistemas más adecuados para el entorno actual [5]. Además, [8] muestran que los contratistas de defensa presentan algunos problemas de eficiencia y sugieren que hay espacio para introducir medidas correctivas dentro de las empresas, así como a través de la regulación gubernamental. Un primer paso para revertir esta situación fue la Orden Ministerial 37/2005, que se enfoca en la organización del Ministerio. En ella se define a la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) como el único y exclusivo orador en las relaciones de la industria. También hace hincapié en la necesidad de definir claramente los objetivos, establecer prioridades y asignar recursos de manera eficiente. Para eso, estableció dos procesos paralelos: planificación militar centrada en las capacidades para satisfacer los objetivos de defensa españoles y una planificación de recursos para alcanzar las capacidades requeridas en sus aspectos materiales, humanos y financieros. Este enfoque integral de las adquisiciones ha resultado en la mejora de la asignación de recursos y la integración de las compras nacionales en la planificación de adquisiciones internacionales [5]. La aprobación de las instrucciones 2/2011, 67/2011 y 72/2012 puso en práctica la racionalización definida en 2005. Los objetivos principales son controlar los costes (especialmente importantes en el escenario real del presupuesto restringido), desarrollar una relación intensa con los proveedores (para monitorear las firmas una vez que los programas están en marcha) y enfatizar el uso de técnicas de ingeniería de proyectos que empoderan a los gerentes. Esta política se asemeja a las reformas aprobadas en Francia que han demostrado permitir el desarrollo de sistemas avanzados de armas y favorecer la contención de costos [12]. Esto es especialmente relevante ya que la falta de estructura competitiva de mercado en la adquisición de defensa tiene incentivos limitados para influir sobre el coste [19, 21]. Esto, junto con los sistemas de reembolso de costos, ha afectado positivamente a los beneficios de la empresa [19]. Hubo tres ciclos de inversión (2005-08, 2009-12 y 2013-16) desde que se aplicó la nueva estructura de ministerio. El último completamente desarrollado bajo el nuevo marco de adquisición, por lo tanto, se pueden esperar algunos cambios en el desempeño de la empresa. Las perspectivas del mercado único de defensa europeo es el próximo desafío de la industria de defensa española. Para obtener contratos de compras internacionales y desempeñar un papel importante en el mercado mundial por venir, la eficiencia debería mejorar. En este trabajo investigamos si la nueva regulación ha ayudado al sector de defensa en la mejora de sus resultados.

3. Datos y metodología

La muestra utilizada en este documento incluye 250 firmas de defensa españolas. El periodo de análisis es 2000-2015. Los datos sobre empresas provienen de dos fuentes complementarias. Primero, se obtienen las empresas que conforman el directorio de empresas de defensa españolas en 2016 publicado por IDS (2017). Este catálogo está elaborado para presentar las capacidades del sector español. En segundo lugar, a partir del informe de 2015 sobre la industria de Defensa, recopilamos información sobre si la empresa firmó contratos con el Ministerio de Defensa durante los años 2014-2015. Setenta empresas son identificadas como contratistas de defensa en este periodo. En realidad, estas empresas son las principales contratistas y su facturación representa el 90 % de las compras del ministerio. Con esta información, diferenciamos entre los principales contratistas de defensa (en lo sucesivo, contratistas) y el resto de las empresas de defensa (en lo sucesivo, empresas de defensa). De esta forma, podemos estimar el impacto de los nuevos procedimientos de adquisición, contrastando los cambios en el desempeño de los contratistas (grupo de tratamiento) con los de los equipos de defensa (grupo de control). La suposición subyacente es que los contratos de las empresas con el Ministerio de Defensa en los años 2014 y 2015 son contratistas a lo largo de los quince años analizados. Aunque podría haber habido algunos cambios a lo largo del periodo, consideramos que estos pueden ser poco relevantes para el propósito del documento por dos razones. En primer lugar, los informes publicados por el Ministerio de Defensa recuerdan las relaciones a largo plazo y estables con los contratistas prin-

cipales. Segundo, la larga duración de los programas de defensa: los principales programas firmados por los gobiernos en la década de 1990 y comienzos de la del 2000 han estado activos a lo largo de los años analizados y solo en 2013 se introdujeron algunos cambios para avanzar los nuevos requisitos operacionales de las fuerzas desplegadas [5]. Además, esta distinción entre contratistas y empresas de defensa es similar a la clasificación dependiente y no dependiente utilizada por [15] en su análisis de la industria de defensa británica.

Por lo tanto, nuestra modelización empírica analiza el efecto de las estrategias industriales y de tecnología de defensa sobre el rendimiento, comparando las empresas con diferentes exposiciones a esta regulación. Dado que se espera que el efecto del nuevo proceso de adquisición sea mas acusado en la productividad de los contratistas según el modelo, implementamos un enfoque de diferencias en las diferencias.

$$y_{it} = \alpha + \beta X_{it-1} + \delta_0 Rank_i + \delta_1 Post + \delta_2 (Rank_i \times Post) + u_{it} \quad (1)$$

donde y_{it} es la productividad de la empresa i durante el año t y α es la constante. La variable $Rank_i$ toma el valor 1 si la empresa i se identifica como contratista de defensa. Variable *Post* es un indicador que toma el valor de 1 a partir de 2011 y cero de lo contrario. Por lo tanto, el término de interacción captura los efectos de los cambios regulatorios en la variable de interés. Todas las especificaciones incluyen los efectos de la industria y el tiempo para reducir la variabilidad del muestreo de las estimaciones. Como en [4], que analizan la productividad de una muestra de empresas italianas, incluimos variables de control, X_{it-1}, en algunas ejecuciones. Se refieren al periodo anterior. Se supone que el término de error u_{it} se distribuye normalmente con media cero y varianza $\sigma 2, uit \sim N (0, \sigma 2)$. La estimación tiene en cuenta la posible existencia de heterogeneidad no observable. Desde un punto de vista econométrico, la estimación de los coeficientes $\alpha, \beta, \delta_0, \delta_1$ y δ_2 debe tener en cuenta la estructura de los componentes del término de error u_{it}. Si los efectos son independientes de las variables explicativas forman parte del término de error por lo que se utiliza el estimador de efectos aleatorios ya que es la alternativa más eficiente [2]. Debido a la heterogeneidad de la muestra utilizada y que algunas de las variables de control no varían a lo largo del periodo, utilizamos el estimador de efectos aleatorios.

Con respecto a la variable dependiente, la productividad se representa mediante la productividad laboral medida como valor agregado bruto (VAB) por empleado. Utilizamos además dos medidas adicionales relacionadas con los beneficios ampliamente utilizadas en la literatura: «rendimiento sobre ventas», es decir, la relación entre los beneficios contables y las ventas y el retorno sobre activos (ROA). Estos datos se obtienen del Registro Mercantil español a través del Sistema de Análisis de Balances Ibéricos (base de datos SABI) compilado por Bureau van Dijk. Se incluyen controles habituales en la literatura, edad, tamaño, internacionalización, capital extranjero, crisis.

4. Resultados y discusión

La tabla 1 muestra los resultados de la estimación de la ecuación (1). También incluimos los resultados con las medidas alternativas de resultados: rendimiento de las ventas y rendimiento de los activos (ROA). Para cada medida presentamos resultados con y sin variables de control, antes y después de la reforma, y el término de interacción. Todas las ejecuciones incluyen el indicador de crisis.

Si se consideran los resultados sin variables de control, los contratistas disfrutan de una mayor rentabilidad y ROA, pero presentan una diferencia negativa en la productividad del trabajo antes de la reforma, aunque solo la diferencia de rendimiento sobre ventas es significativa. Después de la reforma, las tres variables, ROA, resultados y productividad, son más altas para los contratistas, aunque las diferencias no son significativas. En la misma línea, los resultados del término de interacción muestran un impacto negativo en el caso de ROA y resultados. Sin embargo, no son significativos por lo que sugieren que la reforma no ha reducido el poder de mercado ejercido por los contratistas [18]. Esto es interesante, ya que uno puede pensar que el nuevo procedimiento de adquisición podría reforzar el control de coste del ministerio sobre las empresas, especialmente para aquellas que dependen más de la demanda del mismo.

Por el contrario, los resultados para la productividad muestran un coeficiente positivo, lo que sugiere que el nuevo procedimiento ha fomentado los aumentos de productividad de los contratistas según lo esperado por el regulador, pero el cambio no es significativo.

El análisis con variables de control ofrece resultados similares. Los contratistas disfrutan de una mayor rentabilidad y ROA y la productividad es menor, aunque solo es significativo el resultado de ROA. Después de la reforma, ROA y resultados muestran resultados positivos y significativos a favor de los contratistas. Sin embargo, la productividad, aunque positiva, no es significativa. El término de interacción no es significativo para el ROA y la productividad, lo que sugiere que la reforma no tiene efecto sobre ellos. En el caso de resultados, el término de interacción es positivo y significativo. Esto sugiere que el nuevo procedimiento ha aumentado los resultados de los contratistas.

	Sin variables control			Con variables control		
	Productividad	Resultados	ROA	Productividad	Resultados	ROA
Antes						
Control	57.427	0.056	6.655	158.100	0.009	8.177
Tratamiento	9.965	0.887	7.304	154.972	0.024	9.447
Diferencia	-47.462	0.832*	0.648	-3.128	0.015	1.271*
	(36.840)	(0.482)	(0.833)	(42.643)	(0.010)	(0.673)
Después						
Control	51.808	0.017	2.824	130.107	-0.045	3.546
Tratamiento	94.977	0.056	3.018	227.961	0.004	6.321
Diferencia	43.169	0.040	0.195	97.853*	0.049***	2.776***
	(62.413)	(0.680)	(1.185)	(54.618)	(0.013)	(0.872)
Dif-en-Dif	90.631	-0.792	-0.454	100.982	0.034**	1.505
	(62.413)	(0.833)	(1.448)	(65.830)	(0.016)	(0.151)

Tabla 1. Diferencias en diferencias. Muestra completa

La industria de defensa española está concentrada con algunas empresas grandes. Por lo tanto, hemos dividido la muestra entre grandes (más de 250 empleados) y pequeñas y medianas (menos de 250 empleados) para evaluar si existe un impacto diferente asociado al tamaño. La primeras columnas de la tabla 2 recopila los resultados con variables de control para las empresas grandes que resultan ser distintos con respecto a la muestra completa. Los resultados son contrarios a los de la muestra completa y el resultado del coeficiente de reforma no es significativo. Por lo tanto, la reforma parece no tener efecto en los grupos más grandes en comparación con el efecto leve en los resultados de toda la muestra.

Las tres últimas columnas de la tabla 2 presentan resultados con variables de control para empresas pequeñas. Las diferencias entre los contratistas y el resto de empresas de defensa tienen signos similares a los de toda la muestra. Sin embargo, la significatividad es mayor en el caso de empresas pequeñas. Antes de la reforma, los contratistas tienen menor productividad y rentabilidad y un ROA más alto, aunque solo el último es significativo. La diferencia entre contratistas y empresas de defensa después de la reforma es a favor de los primeros y significativa para los tres indicadores: productividad, rentabilidad y ROA. Por tanto, los contratistas han aumentado su productividad y rentabilidad con respecto a las empresas de defensa. Esto contrasta con el efecto no encontrado tanto para la muestra completa como para las empresas más grandes. La conclusión de estos resultados sería que la reforma ha tenido un impacto, pero no en todas las empresas. El efecto es diferente dependiendo del tamaño de la compañía. Las más grandes no parecen tener ningún efecto derivado de la reforma, mientras que las más pequeñas aumentan la productividad y la rentabilidad.

	Empresas grandes			Empresas pequeñas		
	Productividad	Resultados	ROA	Productividad	Resultados	ROA
Antes						
Control	-159.170	-0.064	4.831	320.266	0.046	8.934
Tratamiento	-148.701	-0.064	4.812	295.045	0.066	10.840
Diferencia	10.469*	-0.000	-0.019	-25.221	0.020	1.907**
	(6.292)	(0.014)	(1.047)	(56.295)	(0.013)	(0.844)
Después						
Control	-168.954	-0.090	1.064	290.801	-0.015	4.116
Tratamiento	-173.119	-0.104	1.314	419.448	0.056	7.852
Diferencia	-4.164	-0.014	0.250	128.646*	0.072***	3.736***
	(7.978)	(0.018)	(1.384)	(89.299)	(0.017)	(1.094)
Dif-en-Dif	-14.633	-0.014	0.268	153.86*	0.051**	1.830
	(9.420)	(0.021)	(1.614)	(89.299)	(0.020)	(1.339)

Tabla 2. Diferencias en diferencias. Empresas grandes y pequeñas con variables control

5. Conclusiones

En este trabajo analizamos los efectos de las recientes reformas regulatorias relacionadas con el nuevo proceso de compras en el mercado de defensa español. Para ello se utilizan datos de panel desequilibrados de 250 empresas de defensa españolas en el periodo 2000-2015. Los resultados indican en primer lugar, que la reforma legal genera un aumento significativo del beneficio para los contratistas de defensa. En segundo lugar, este resultado positivo se extiende a la productividad cuando se analizan las pequeñas empresas. Las grandes empresas no parecen haber experimentado ningún cambio debido al nuevo procedimiento de adquisición.

El presente estudio proporciona evidencia adicional sobre los efectos de las reformas legales sobre el desempeño de las empresas. Los hallazgos sugieren que los cambios en el escenario regulatorio pueden mejorar el funcionamiento del mercado y beneficiar tanto al gobierno como a la industria establecida. Los resultados actuales confirman la relevancia del nuevo entorno institucional y la transformación estructural exigida por el cumplimiento de la nueva ley.

Agradecimientos

Agradecemos a Patrick Alexander y a los participantes en el 12th Defence and Security Economics Workshop de la Carleton University por sus sugerencias y comentarios. Este trabajo ha sido financiado por Ministerio de Educación y Ciencia a través de los proyectos ECO2013-45395-R, ECO2013-48496-C4-4-R, ECO2015-67999-R (MINECO / FEDER), el Gobierno Regional de Aragón y el Fondo Social Europeo (proyecto S125:Compete) y el Centro Universitario de la Defensa Zaragoza a través del proyecto 2016-06 y 2017-21.

Referencias

1. *Álvarez I, Fonfría A. Estructura e innovación en la industria de defensa española. Economistas 2000; 18 (85):102-122.*
2. *Arellano M, Bover O. La econometría de datos de panel. Investigaciones Económicas 1990;14:3-45.*
3. *Arteaga F. The coming defences: criteria for the restructuring of defence in Spain 2013.*
4. *Cingano F. Employment protection legislation, capital investment and access to credit: evidence from Italy. The Economic Journal. 2016;126(595):1798-1822.*

5. *Colom Piella G. Transforming the Spanish military. Defence Studies 2016;16(1):1-19.*
6. *Den Hertog JA. General theories of regulation. Economic Institute/ CLAV, Utrecht University 1999.*
7. *Duch-Brown N, Fonfría A. The Spanish defence industry: an introduction to the special issue. Defence and Peace Economics 2014;25(1):1-6.*
8. *Duch-Brown N, Fonfría A, Trujillo-Baute E. Market structure and technical efficiency of Spanish defense contractors. Defence and Peace Economics 2014;25(1):23-38.*
9. *Fonfría A, Correa-Burrows P. Effects of military spending on the Resultados of Spanish defence contractors. Defence and Peace Economics 2010;21(2):177-192.*
10. *García-Estévez J, Trujillo-Baute E. Drivers of R&D investment in the defence industry: evidence from Spain. Defence and Peace Economics 2014;25(1):39-49.*
11. *Hartley K. The future of European defence policy: An economic perspective. Defence and Peace Economics 2003;14(2):107-115.*
12. *Hartley K. Collaboration and European defence industrial policy. Defence and Peace Economics 2008;19(4):303-315.*
13. *Kapstein EB, Oudot JM. Reforming defense procurement: lessons from France. Business and Politics 2009;11 (2):1-25.*
14. *Kurç Ç, Neuman S. Defence industries in the 21st century: a comparative analysis. Defence Studies 2017;17(3):219-227.*
15. *Martin S, White R, Hartley K. Defence and firm performance in the UK. Defence and peace economics 1996;7(4):325-337.*
16. *Molas-Gallart J. Defence procurement as an industrial policy tool: The Spanish experience. Defence and peace economics 1998;9(1-2):63-81.*
17. *Pérez Muinelo F. El gasto de defensa en España 1946-2015. Ministerio de Defensa, Secretaría General Técnica 2016.*
18. *Rogerson W P. Profit regulation of defense contractors and prizes for innovation. Journal of Political Economy 1989;97(6):1284-1305.*
19. *Rogerson W P. Overhead allocation and incentives for cost minimization in defense procurement. The Accounting Review 1992;67(4):671-690.*
20. *SIPRI, Yearbook. Armaments, Disarmament and International Security 2012.*
21. *Smith R P. Defence procurement and industrial structure in the UK. International Journal of Industrial Organization 1990;8(2):185-205.*
22. *Walker S K. Capabilities-based planning-how it is intended to work and challenges to its successful implementation. Tech. rep. Army war Coll Carlisle Barracks PA 2005.*

La visión de la RSC desde la óptica medioambiental en el Ejército del Aire

González Gómez, María Luisa[1,*], de Nieves Nieto, Carmen[2] y Bernal Conesa, Juan Andrés[2]

[1] Ejército del Aire. Correo electrónico: MLGG:mgong65@ea.mde.es

[2] Departamento de Ciencias Económicas y Jurídicas. Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier. Academia General del Aire (AGA). C/Coronel López Peña s/n, 307020 Santiago de la Ribera, San Javier, Murcia. Correo electrónico: CdNN: carmen.denieves@upct.es JABC: jandres.bernal@cud.upct.es

* Autor principal y responsable del trabajo

Resumen

Actualmente puede entenderse la responsabilidad social corporativa como un modelo de gestión cuya principal función supone alcanzar la sostenibilidad y la competitividad a través de una gerencia eficaz y eficiente mantenida a lo largo del tiempo. Así pues, partiendo de los conceptos de responsabilidad social y responsabilidad social empresarial este trabajo define la responsabilidad social corporativa (RSC) y las tres dimensiones en que se basa: social, medioambiental y económica. Además, se presenta una relación entre ética, RSC y, gestión medioambiental y desarrollo sostenible, todo ello implementado en la Administración Pública y su aplicación concreta al Ejército del Aire.

Con objeto de conocer la situación real actual, en primer lugar se realiza un análisis basado en conocer el marco normativo existente que afectan a las organizaciones en general y al Ministerio de Defensa en particular la norma ISO 26000 y la norma ISO 14001, y al Ejército del Aire en particular a través de la IG 90-31. Tras exponer la situación normativa actual, se realiza un estudio empírico con objeto de identificar el grado de conocimiento que se posee al respecto entre los integrantes del Ejército del Aire. Para ello, se elaboran dos encuestas anónimas distintas con objetivos diferentes cada una de ellas: la primera encuesta pone el foco de estudio en el grado de conocimiento de la RSC entre los miembros el Ejército del Aire, mientras que la segunda tiene como objetivo conocer el valor de la implementación de políticas y conciencia medioambiental relacionadas con la RSC.

Tras el análisis de los datos obtenidos en las citadas encuestas, este trabajo presenta varias propuestas de mejora para la divulgación del conocimiento de este sistema de gestión entre sus miembros.

Palabras clave

Responsabilidad social corporativa, Ejército del Aire, gestión medioambiental, ISO 26000 e ISO14001.

1. Introducción

La responsabilidad social corporativa puede ser entendida en muchos casos como sinónimo de aquellos principios y compromisos que se adquieren en el marco económico, social y medio ambiental, ya sea por las empresas, como por organizaciones e instituciones privadas y públicas. La evolución del significado de responsabilidad social corporativa, ha pasado de ser una búsqueda por parte de las empresas por encontrar beneficios para la sociedad y para ellas mismas, a encontrar una ética interna y unos valores, los cuales les permitan adquirir una situación ventajosa ante sus homólogos, haciendo que las Administraciones Públicas, y por ende las Fuerzas Armadas, tengan la obligación de implantar este sistema de sostenibilidad.

El presente trabajo pretende verificar a través de un estudio, si el Ejército del Aire tiene inculcado entre sus componentes un espíritu socialmente responsable a través de la integración de actuaciones que aporten beneficios sociales, económicos y medio ambientales que representan tanto a la sociedad española como a sus grupos de interés, y que a la vez que se trasmitan los valores que posee el Ejército del Aire (EA).

2. Antecedentes de la RSC

El concepto de responsabilidad social corporativa (RSC) no es un expresión reciente, ya que empezó a utilizarse en el siglo pasado, teniendo su origen en los Estados Unidos [1]. Howard R. Bowen publica su libro *Social Responsibilities of the Businessman* en 1953, en el que se «establece y da forma al pensamiento de manera significativa sobre la responsabilidad social en el futuro» [2].

En los años setenta del siglo XX surge con fuerza la ética de los negocios (*Business Ethics*) que en Europa se tradujo como la «ética de la empresa» [3] generándose entonces un intenso debate sobre las relaciones entre empresa y sociedad. La visión de la empresa, aparece no solo como un negocio, sino como un grupo humano, exigiendo mayor responsabilidad y compromiso ético para limitar su impacto negativo sobre el medioambiente y la sociedad en general. Desde entonces, las empresas se enfrentan a crecientes exigencias de mayor compromiso social.

Debido a este creciente interés social en el comportamiento responsable de las empresas, surge en primer lugar, el concepto de responsabilidad social empresarial (RSE) para posteriormente hacerlo el de responsabilidad social corporativa, el cual ya no atañe únicamente a la empresa sino a cualquier tipo de organización; de modo que en la actualidad han pasado a utilizarse indistintamente [4].

En la figura 1, se muestra una evolución resumida del concepto de responsabilidad social corporativa, desde R. H. Bowen hasta la actualidad, que se encuentra recogido en la Norma ISO 26000.

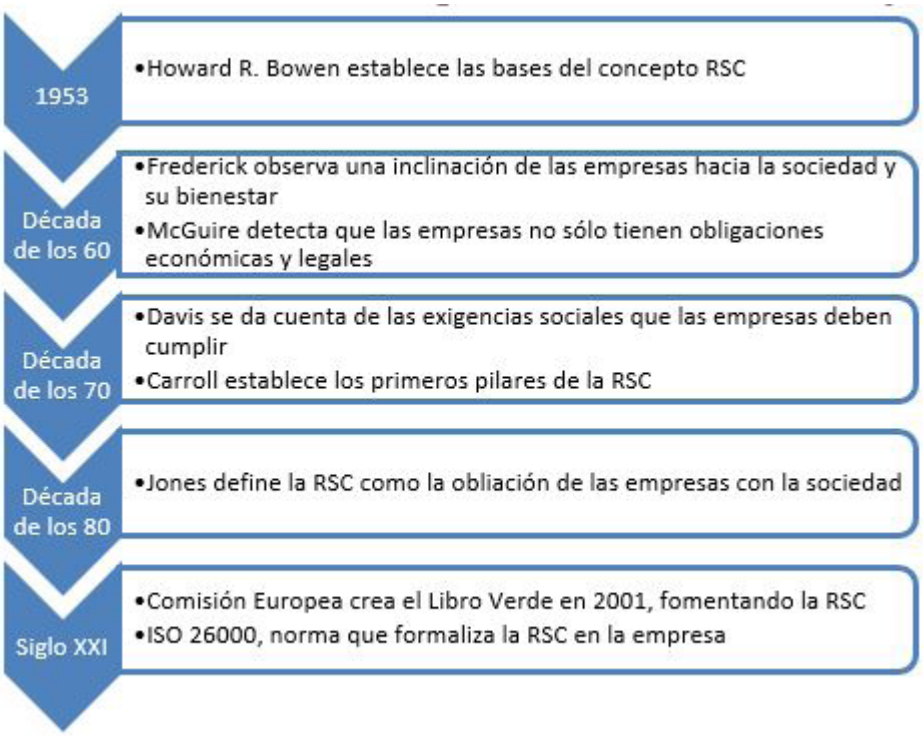


Figura 1. Evolución del concepto de RSC. Elaboración propia.

A día de hoy no existe una definición universalmente aceptada sobre la RSC [5], pero esta puede ser interpretada como el compromiso que adquiere una empresa u organismo de llevar a cabo una conducta ética y social en sus actuaciones hacia sus grupos de interés (*stakeholders)*. Por otro lado, la RSC puede considerarse un sistema de gestión integrado [6], en el cual destacan diferentes aspectos como los derechos humanos, las prácticas laborales, el medio ambiente, las prácticas de justa de operación, los asuntos que conciernen a los *stakeholders* y el desarrollo de la sociedad [7]. De este modo la RSC se fundamenta en tres pilares o dimensiones [8]:

- Responsabilidad económica. Un comportamiento responsable de la organización desde el punto de vista económico implica que esta debe crear valor para: (1) el accionista o propietario; (2) el cliente, atendiendo a sus demandas; (3) los proveedores, pagando precios justos por sus productos o servicios; (4) los empleados, ya sean directivos o no, preservando y creando empleo, pagando salarios justos, proporcionando beneficios sociales, formación, estabilidad y motivación y (5) crear riqueza contribuyendo al desarrollo económico de su entorno.
- Responsabilidad social. Supone el respeto a la letra y espíritu de las leyes, el respeto de las costumbres y la herencia cultural, así como implicarse en la vida política y cultural. Los dos primeros aspectos requieren que la organización acepte los estándares legales y socioculturales de la sociedad en la que opera, mientras que el último supone un papel más activo de la organización, adoptando iniciativas que mejoran el bienestar general de la sociedad.
- Responsabilidad medioambiental. Puesto que la actividad de la organización tiene un impacto sobre el medio ambiente, debe procurar satisfacer las necesidades actuales de sus grupos de interés sin comprometer las de las generaciones futuras, contribuyendo así al desarrollo sostenible.

2.1. RSC en la Administración Pública

El rol de la Administración Pública en materia de RSC no debe consistir únicamente en la promoción de la misma, sino que además debe tratar que las acciones llevadas a cabo por las entidades públicas sean socialmente responsables [9].

Así, las Administraciones Públicas, han ido integrando de forma creciente, los principios de responsabilidad en sus propios sistemas de gestión, convirtiéndose de este modo en una herramienta para la planificación estratégica [4].

Así pues, la gestión de la RSC en la Administración Pública, persigue el cumplimiento de tres grandes objetivos [10]:

1. Obtener una ventaja competitiva basada en el comportamiento responsable de la sociedad, generándose con ello resultados positivos en el ámbito económico, social y medioambiental.
2. Fortalecer la influencia de la Administración Pública sobre la sociedad y recuperar la confianza de la política responsable.
3. Incrementar la confianza depositada en el sector público, incluyendo la reputación de la Administración en la sociedad.

2.2. RSC en las Fuerzas Armadas

Una parte esencial del Ministerio de Defensa la constituyen las Fuerzas Armadas (FF.AA.), las cuales tienen como eje fundamental «la prestación del buen servicio a los ciudadanos, aumentando con ello la RSC, para lo que se requiere un mayor grado de sostenibilidad, rendición de cuentas y transparencia en el uso de los recursos públicos» [11]. Debido a este carácter exclusivo, la RSC en las FF.AA. adquiere un papel relevante y ejemplarizante para la sociedad a la que sirve.

Con carácter pionero, las FF.AA. han adoptado una estrategia socialmente responsable dentro de la Administración Pública. Muestra de ello cabría destacar la implantación de la ISO 14001, lo que supone la implantación de políticas sociales de igualdad de género y la optimización de recursos tanto en misiones nacionales como internacionales así como en otras operaciones miliares que llevan a cabo.

Dentro de las tres dimensiones que conforman la RSC, este trabajo ahonda únicamente en la dimensión medioambiental de la misma y su estado actual en el Ejército del Aire (EA).

3. Análisis de la situación medioambiental del EA

Focalizándose por tanto hacia la dimensión medioambiental de la RSC, hay que tener en cuenta que esta se encuentra basada tanto en el medioambiente como en el desarrollo sostenible. Para llevar a cabo el análisis de esta dimensión se comienza por tener en cuenta el marco normativo de la ISO 26000 como conjunto de guías que establecen líneas en materia de responsabilidad social, y la ISO 14001, como aquellas normas que cubren los aspectos medioambientales tanto en productos como en organizaciones con objeto de reducir los impactos medioambientales y cumplir la legislación. Basado en estas normas se encuentran los pilares que permiten conocer la situación real en la que se encuentra el EA referente a la responsabilidad social corporativa en su dimensión medioambiental.

Además de la citada normativa, existe un sistema de gestión ambiental (SGA) que en el Ejército del Aire se encuentra regulado por la IG 90-31, conforme a lo establecido por el Jefe de Estado Mayor del Aire en la Política Ambiental. Dicho SGA en el EA tiene como finalidad minimizar el impacto ambiental negativo en las actividades que ejecuta el EA, y compatibilizar la operatividad del EA con el desarrollo sostenible. La IG 90-31 define cual es la política medioambiental del EA, recogiéndose en los siguientes puntos:

1. «Procurar la mejora continua y a la prevención de la contaminación.
2. Cumplir la legislación ambiental y la normativa ambiental interna del MDE.
3. Planear sus actividades procurando minimizar los impactos ambientales negativos.
4. Potenciar medidas de eficiencia energética, utilizando, en lo posible, energías renovables.
5. Impulsar aquellas medidas que permitan un ahorro en el consumo de recursos naturales.
6. Asegurar la correcta gestión de los residuos, vertidos y emisiones generados.
7. Proteger y mejorar, en la medida de lo posible, los espacios naturales en sus instalaciones.
8. Potenciar la formación, sensibilidad y cultura ambientales.

9. Difundir esta política ambiental en el ámbito de su responsabilidad.
10. Potenciar las relaciones institucionales que faciliten un mejor desempeño ambiental».

Para determinar el grado de conocimiento y valoración que tienen los propios miembros del Ejército del Aire respecto de la responsabilidad social corporativa y medioambiente, se han elaborado dos encuestas anónimas que fueron cumplimentadas por miembros del citado Ejército. Elegir a miembros del EA fue debido a que se pretende realizar un análisis interno de los conocimientos que se poseen sobre cómo se actúa en la implementación de la RSC y una vez se conozca su funcionamiento, hacerlo extensible a la dimensión medioambiental.

Ambas encuestas se distribuyeron a través de SURVIO (https://www.survio.com/es/): una plataforma de Internet que permite distribuir las encuestas a través de la propia página web, de correo electrónico, de mensajería instantánea tipo WhatsApp o telegram e incluso a través de redes sociales tales como Facebook o Instagram. Finalmente, los métodos escogidos de distribución fueron el correo oficial interno del Ministerio de Defensa y la mensajería instantánea. De esta manera, se hicieron llegar las encuestas a personal de diferentes Unidades del Ejército del Aire, como la Academia General del Aire, Academia Básica del Aire, Cuartel General del Ejército del Aire, Maestranza Aérea de Madrid, Acuartelamiento Aéreo de Getafe, entre otras.

La primera encuesta, consta de 13 preguntas sobre la responsabilidad social corporativa en el Ejército del Aire obteniendo los resultados en porcentajes. En primer lugar, la encuesta realiza un análisis descriptivo del perfil de los encuestados (edad, sexo, civil o militar y empleo militar), para posteriormente mediante preguntas genéricas sobre la RSC y con respuestas cerradas, determinar el grado de conocimiento de la RSC de los encuestados.

La segunda encuesta de RSC se centra en conocer de forma más concreta, el área de medio ambiente a través de 11 preguntas. Esta encuesta es más específica y estudia de manera aislada la materia medioambiental de la RSC. En este caso se utiliza una escala Likert de 5 puntos, que permite evaluar el grado de acuerdo desde el 1 al 5, siendo 1 el menor y 5 el mayor, de cada una de las cuestiones realizadas. El objetivo perseguido de esta segunda encuesta es la valoración que hacen los encuestados sobre la Política Medioambiental y las acciones implementadas relacionadas con la RSC en el EA.

En las tablas 1 y 2, se recogen los datos técnicos de las encuestas realizadas.

RSC-EJÉRCITO DEL AIRE	
Técnica/procedimiento	Distrubución mediante plataforma de Internet
Ámbito	Unidades del Ejército del Aire
Univeso	Población de 18 años en adelante
Fecha de realización	Del 7 de febrero al 3 de marzo de 2018
Tamaño de la muestra	186 personas • Tasa de respuesta: 125 personas (67,2 %) • Descartadas: 61 personas (32,8 %)
Instrumento de recoleccion	Cuestionario de preguntas cerradas con opción de respuesta única

Tabla 1. Ficha técnica de la primera encuesta

RSC-MEDIO AMBIENTE- EJÉRCITO DEL AIRE	
Técnica/procedimiento	Distrubución mediante plataforma de Internet
Ámbito	Unidades del Ejército del Aire
Univeso	Población de 18 años en adelante
Fecha de realización	Del 7 de febrero al 3 de marzo de 2018
Tamaño de la muestra	156 personas • Tasa de respuesta: 125 personas (80,13 %) • Descartadas: 31 personas (19,87 %)
Instrumento de recoleccion	Cuestionario de preguntas cerradas con opción de respuesta única

Tabla 2. Ficha técnica de la segunda encuesta

4. Resultados y discusión

Ambas encuestas se han realizado a una muestra de 125 personas pertenecientes al Ejército del Aire, tanto de personal civil como militar pertenecientes a distintos destinos dentro del mismo.

Los resultados más destacables de dicho estudio son:

- Llama la atención el gran desconocimiento existente sobre el término de RSC, ya que más de la mitad de la muestra (54,4 %) reconoce no haber escuchado con anterioridad dicho término. De aquellos que sí conocen el término, un 53,6 % afirma no conocer el significado de RSC y solo un 5,6 % identifica los contenidos principales y la labor que conlleva la implantación de acciones socialmente responsables.
- Tal como se ha indicado previamente, las Fuerzas Armadas y más concretamente el Ejército del Aire, poseen un sistema de gestión medioambiental propio. De modo que, preguntados sobre el conocimiento de su existencia, un 80,8 % conocía dicho sistema, pero se ha de destacar que no son capaces de relacionar el sistema de gestión medioambiental con la RSC.
- El Ministerio de Defensa publicó en 2009 y 2010 sendas *Memorias de Sostenibilidad*, en las cuales se exponen todas aquellas actividades llevadas a cabo en un ámbito socialmente responsable en las FF.AA. Estas memorias son públicas y están al alcance de la sociedad, de modo que cuestionados acerca del conocimiento de dichas publicaciones, el personal encuestado del Ejército del Aire respondió en un 67,2 % que no sabía que se habían realizado dichas *Memorias de Sostenibilidad*.
- El 84 % de los encuestados opina que la imagen de las Fuerzas Armadas se vería mejorada y aumentaría positivamente si la sociedad española conociera aquellas actividades socialmente responsables que realiza el EA, que son diversas y muy variadas.
- En referencia a las actuaciones de RSC llevadas a cabo por las FF.AA., el personal encuestado valora muy positivamente, por encima de 3 sobre 5 en la escala, todas aquellas realizadas en materia de medio ambiente, como: la adecuada gestión de residuos, la reducción del consumo energético, el incremento de las actividades de protección del medio ambiente, la reducción del impacto medio ambiental, etc.

5. Conclusiones

Actualmente la adopción de un compromiso socialmente responsable es sinónimo de transparencia, igualdad, información pública, y protección del medio ambiente, es por ello, que el Ejército del Aire reúne todos esos requisitos para cumplir las expectativas que la sociedad tiene puestas en él y de esta manera aumentar la confianza que la ciudadanía tiene en sus FF.AA. Para ello, se hace necesaria la puesta en marcha de medidas adecuadas de responsabilidad social corporativa en el EA tanto en su estructura, como en su funcionamiento y operaciones. Para continuar con la senda que se está implementando y desarrollar la implantación de la RSC en el EA se proponen las siguientes acciones:

- Puesta en marcha de jornadas de RSC en unidades del EA.
- Retomar la elaboración por parte del Ministerio de Defensa de las Memorias de Responsabilidad Social, tal como se hizo en 2009 y 2010.
- Elaborar una memoria de responsabilidad social específica del Ejército del Aire.
- Utilizar los canales de redes sociales para la divulgación de las actividades de RSC llevadas a cabo en el EA.
- Interactuar con los medios de comunicación por parte del Gabinete de Prensa del EA, para poner en valor las actuaciones en materia medioambiental llevadas a cabo.

Agradecimientos

Esta comunicación es el resultado de un trabajo fin de grado (TFG) más amplio llevado a cabo por la teniente González Gómez perteneciente a la LXIX promoción del EA en el CUD de San Javier. Desde

estas líneas se quiere agradecer a todo el personal perteneciente al EA que ha colaborado en la realización de dicho TFG.

Referencias

1. *Gjølberg M. Measuring the immeasurable?: Constructing an index of CSR practices and CSR performance in 20 countries. Scandinavian Journal of Management. 2009 Mar;25(1):10–22.*
2. *Carroll AB, Shabana KM. The Business Case for Corporate Social Responsibility: A Review of Concepts, Research and Practice. International Journal of Management Reviews. 2010;12(1):85–105.*
3. *Cortina A. Construir confianza. Ética de la empresa en la sociedad de la información y las comunicaciones. Madrid: Trotta; 2004.*
4. *Bernal-Conesa JA, de Nieves-Nieto C, Briones-Peñalver AJ. Implantación de la Responsabilidad Social en la Administración Pública: el caso de las Fuerzas Armadas Españolas. Revista de Responsabilidad Social de la Empresa. 2014;18(III):101–24.*
5. *Dahlsrud A. How corporate social responsibility is defined: an analysis of 37 definitions. Corporate Social Responsibility and Environmental Management. 2008 Jan;15(1):1–13.*
6. *Bernal-Conesa JA, Briones-Peñalver AJ, Nieves-Nieto CD. The integration of CSR management systems and their influence on the performance of technology companies. European Journal of Management and Business Economics. 2016 Nov;25(3):121–32.*
7. *AENOR. UNE- ISO 26000. Guía de responsabilidad social. 2012.*
8. *Bernal Conesa JA. Responsabilidad social corporativa: análisis de los modelos normalizados y creación de un nuevo modelo integrado de organización empresarial en empresas de ámbito tecnológico. 2016 May [cited 2018 Sep 12]; Available from: http://repositorio.upct.es/handle/10317/5799*
9. *Navarro A, Alcaraz FJ, Ortiz D. La Divulgación de Información Sobre Responsabilidad Corporativa en Administraciones Públicas: Un Estudio Empírico en Gobiernos Locales. Revista de Contabilidad. 2010 Jul;13(2):285–314.*
10. *Melle-Hernández M. La responsabilidad social en el sector público. Revista de responsabilidad social de la empresa. 2014;18(III):17–43.*
11. *García-Sánchez I-M, Frías-Aceituno J-V, Rodríguez-Domínguez L. Determinants of corporate social disclosure in Spanish local governments. Journal of Cleaner Production. 2013 Jan;39:60–72.*

El impacto socioeconómico de las unidades militares

Callado Muñoz, Francisco J.[1] y Utrero González, Natalia[2,*]

1 Centro Universitario de la Defensa Zaragoza, Crta de Huesca S/N (Zaragoza). Email: fcallado@unizar.es

2 Centro Universitario de la Defensa Zaragoza, Crta de Huesca S/N (Zaragoza). Email: n.utrero@unizar.es

* Autor principal y responsable del trabajo

Resumen

Como consecuencia del fin de la guerra fría y el aumento de la amenaza del terrorismo transnacional se ha producido un cambio del entorno estratégico internacional que ha supuesto la redefinición de la estrategia de defensa nacional de muchas democracias occidentales. Así, las fuerzas armadas de países como Estados Unidos, Francia o Reino Unido han realizado ajustes para adaptarse a estos cambios. Parte de estos ajustes se han centrado en la restructuración de las unidades nacionales. España no ha sido ajena a esta tendencia. La directiva de 2004 de seguridad nacional marca el inicio de la transformación de las fuerzas armadas españolas (FAS). En este contexto, este trabajo pretende realizar una aportación sobre los efectos socioeconómicos de la existencia de unidades militares en la región en la que se encuentran. El conocimiento de estos efectos puede ser de utilidad para su correcta valoración en el territorio y puede ayudar en la toma de decisiones sobre posibles restructuraciones futuras.

Palabras clave

Unidades militares, desarrollo socioeconómico.

1. Introducción

Los cambios estratégicos de las dos últimas décadas han puesto a prueba la capacidad de las Fuerzas Armadas para adaptarse a un nuevo marco de relaciones internacionales y un contexto de seguridad y defensa cambiante [1]. Así, han aparecido nuevas demandas de seguridad que van más allá de la defensa territorial o la guerra regular, características de la guerra fría [3]. Estos desafíos han llevado consigo un aumento de las misiones que tradicionalmente tenían asignadas las Fuerzas Armadas como misiones de mantenimiento de la paz o humanitarias. En muchas ocasiones estas misiones no se realizan de forma aislada sino en cooperación con otros países, desarrolladas al amparo de alianzas como la OTAN u organizaciones supranacionales como las Naciones Unidas. Como consecuencia de este nuevo escenario, tanto las estructuras de mando, la fuerza y el apoyo a la fuerza deben adaptarse para afrontar estos retos [12]. Así en la *Directiva de Defensa Nacional 2012* que establece la transformación de las FAS, el JEMAD ha definido que las Fuerzas Armadas deben ser ágiles, adaptables, interoperables y tecnológicamente avanzadas [6].

En esta coyuntura geoestratégica, se produce en 2008 una grave crisis económica internacional que afecta de forma importante a los presupuestos de los ministerios de defensa de los principales países occidentales. En el caso de España, los presupuestos del Ministerio de Defensa se ven reducidos de un 1,359 % del PIB en el año anterior a la crisis a 1,133 en 2016 año en el que alcanza su mínimo histórico [11]. Este contexto económico pone de manifiesto no solo la exigencia de restructuración para hacer frente a los nuevos desafíos y amenazas, sino la necesidad de racionalización de las Fuerzas Armadas españolas (FAS). El objetivo de esta racionalización es mejorar el servicio público a través del estudio de la reasignación de recursos, establecimiento de mejores estructuras de mando y gestión o el desarrollo de las personas en la organización [5].

Esta restructuración no puede obviar el factor geográfico. En primer lugar porque la misión principal de las FAS es la defensa del territorio nacional, teniendo en cuenta tanto las amenazas como la localización de nuestra nación. En segundo lugar, en trabajos anteriores [9, 2, 8] se ha puesto en valor el efecto socioeconómico de las unidades y acuartelamientos militares para el caso alemán, inglés y estadounidense y las consecuencias que podrían provocar su contracción en las regiones adyacentes. Así por ejemplo en la restructuración del Ejército de Tierra, el objetivo al establecer el número de las nuevas brigadas polivalentes es mantener una presencia equilibrada en el territorio y evitar las posibles consecuencias negativas que una reducción en el número de acuartelamientos pudiera causar [6]. Para el caso español no existe ningún trabajo que analice la relación entre los acuartelamientos y unidades militares y el área de influencia. El objetivo de este trabajo es realizar una aportación en este sentido. Primero se estudia la ubicación y tipología de las unidades y acuartelamientos de los tres ejércitos. Segundo se ponen en relación las características de las dichas unidades con las principales características socioeconómicas analizadas en el caso de los países anteriormente citados

La estructura del trabajo es como sigue. En el siguiente apartado se describen los datos y fuentes utilizadas. En el tercer apartado se presenta el análisis conjunto de unidades militares y variables socioeco-

nómicas. El cuarto apartado recoge la discusión de los resultados. Por último se concluye y presenta el trabajo futuro.

2. Datos

Los datos correspondientes a las unidades militares se han obtenido de las órdenes del Ministerio de Defensa 1265, 1642 y 1629 de 2015 por las que se desarrollan las organizaciones básicas del Ejército de Tierra (ET), de la Armada (A) y el Ejército del Aire (EA) respectivamente. Los datos referidos al personal de las FAS provienen de Eurostat y los referentes a las características socioeconómicas han sido obtenidos del Instituto Nacional de Estadística (INE). Todos los datos de estudio han sido recogidos a nivel provincial y de comunidad autónoma.

Respecto de las unidades de las FAS, el 49,5 % de las unidades[1] analizadas pertenecen al Ejército de Tierra siendo además el ejército que tiene una presencia más proporcional en el territorio nacional. La Armada sería el segundo ejército en número de unidades. A pesar de estar presente en 22 provincias, su peso territorial está concentrado en las provincias de Cádiz y Coruña y la región de Murcia con el 58,4 % de las unidades. Por último, el Ejército del Aire es el que tiene menos unidades, 16,8 % pero está presente en más de la mitad de las provincias españolas. En relación a las unidades del ET, se ha podido clasificar en términos de la función principal de la unidad: fuerza, apoyo a la fuerza, asistencia y ocio y enseñanza y cultura. Como cabía esperar, la Fuerza y el Apoyo a la Fuerza son los principales tipos del ET con el 48,6 % y 16,2 % respectivamente. Para todos los ejércitos se han podido identificar además las unidades dedicadas a la enseñanza y cultura. Destaca el hecho de que alcanzan el 10 % del total de las FAS (3 % y 7 % respectivamente). Si bien las unidades de enseñanza se encuentran repartidas entre los tres ejércitos, la mayoría de unidades con vocación cultural pertenecen al ET.

No solo es interesante conocer el número de unidades por provincia sino el peso relativo que tienen los componentes de las FAS en relación al resto de la población. Los datos desagregados provincialmente no se encuentran disponibles, por lo que se ha decidido realizar un estudio a nivel de comunidad autónoma. En este estudio, se analizará el nivel de formación de los miembros de las FAS.

Como se ha comentado anteriormente los trabajos [9, 2] han analizado el efecto económico de las unidades militares en el área geográfica adyacente. En concreto analizan el desarrollo económico y el empleo. Además [8] investiga si hay relación entre la presencia de unidades militares y el número de crímenes cometidos en la región. Siguiendo estos estudios, este trabajo analiza la relación entre el producto interior bruto (PIB) per cápita, la tasa de desempleo y la criminalidad provincial (ratio de crímenes por mil habitantes) con la presencia (o no) de unidades militares. Teniendo en cuenta la importancia relativa de las unidades de enseñanza y cultura, se va a analizar también la relación entre las unidades militares y el nivel cultural provincial. Como medida del nivel cultural se utiliza el número de libros publicados por cada mil habitantes.

A continuación se presenta el análisis descriptivo de los datos y las correlaciones entre las medidas analizadas. En el caso de las correlaciones se tiene en cuenta su grado de significatividad.

3. Tablas

Tabla 1: Porcentaje de población militar de las FAS por CC.AA.

CC.AA.	U. Mil	Pob. Mil	Sec I	Sec II	Terc I	Terc II
Andalucía	83	0,35%	26,91%	38,70%	28,52%	0,36%
Aragón	25	0,52%	18,95%	36,24%	42,00%	0,58%
Asturias	2	0,17%	34,17%	33,05%	27,17%	0,00%
Baleares	15	0,18%	34,59%	31,83%	26,32%	0,75%
Canarias	44	0,45%	28,24%	39,34%	27,76%	0,00%

1 En el análisis empírico la denominación unidad incluye los acuartelamientos.

CC.AA.	U. Mil	Pob. Mil	Sec I	Sec II	Terc I	Terc II
Cantabria	3	0,10%	29,91%	34,19%	30,77%	0,00%
Castilla Y León	32	0,41%	28,08%	39,04%	29,19%	0,15%
Castilla-La Mancha	13	0,27%	25,67%	35,16%	30,98%	0,17%
Cataluña	10	0,06%	34,22%	34,77%	20,31%	0,55%
Comunidad Valenciana	21	0,18%	26,52%	35,97%	32,27%	0,44%
Extremadura	6	0,41%	29,15%	38,39%	22,88%	0,11%
Galicia	38	0,29%	25,99%	40,31%	29,20%	0,49%
Comunidad de Madrid	85	0,37%	16,09%	30,92%	49,28%	1,52%
Región de Murcia	43	0,37%	18,62%	42,19%	35,17%	0,37%
Comunidad Foral Navarra	2	0,11%	32,62%	29,08%	24,11%	0,00%
País Vasco	8	0,06%	32,39%	23,94%	30,63%	0,70%
La Rioja	2	0,16%	26,67%	30,48%	37,14%	0,00%
Ceuta	13	3,84%	35,26%	32,14%	21,68%	1,40%
Melilla	12	3,68%	33,28%	33,61%	25,42%	0,33%
Media Nacional	24,05	0,63%	28,28%	34,70%	30,04%	0,42%
Desviación típica	25,13	1,11%	5,63%	4,47%	7,07%	0,44%
Mediana	13	0,29%	28,24%	34,77%	29,19%	0,36%
Coef. Asimetría	1,40	2,50	-0,73	-0,45	1,14	1,26
Curtosis	1,75	6,25	-0,02	0.,39	1,99	1,64

Leyenda tabla 1: U. Mil indica el número de unidades militares, Pob. Mil es el porcentaje de población militar sobre la población ocupada. El resto de variables hacen referencia al nivel de estudios alcanzado por el personal de las FAS: Sec I y Sec II son estudios de secundaria y bachillerato respectivamente. Terc I y Terc II se refieren a educación universitaria, grado y máster.

Tabla 2: Análisis provincial

Provincia	U. Mil.	PIB pc	Desempleo	Libros*	Criminalidad*
Álava	1	35,46	11,97	0,55	36,61
Albacete	4	18,46	23,31	0,82	29,01
Alicante	3	18,17	18,21	0,31	49,58
Almería	3	18,30	24,84	2,04	43,74
Ávila	2	18,54	17,16	0,40	29,32
Badajoz	5	15,94	31,75	0,40	27,06
Baleares	15	23,75	13,8	0,55	59,22
Barcelona	4	27,61	14,73	2,78	56,95
Burgos	8	26,10	10,47	0,52	30,88
Cáceres	1	16,67	22,12	0,52	19,87
Cádiz	43	15,95	33,86	0,20	40,03
Castellón	2	23,15	17,11	0,68	41,96
Ciudad	3	19,25	25,09	0,26	25,38
Córdoba	5	16,84	29,42	0,61	30,24
Coruña	27	21,79	14,49	0,99	29,03
Cuenca	1	20,12	14,15	0,51	28,55
Girona	3	26,76	15,51	1,06	50,33

Provincia	U. Mil.	PIB pc	Desempleo	Libros*	Criminalidad*
Granada	4	16,98	28,89	1,05	35,23
Guadalajara	2	17,96	17,85	0,41	33,89
Gipuzkoa	5	30,73	9,95	0,82	31,14
Huelva	2	17,32	28,89	0,25	38,12
Huesca	2	25,56	12,44	0,89	22,69
Jaén	1	16,91	30,57	0,61	25,85
León	4	19,96	18,69	0,52	31,86
Lleida	1	28,41	10,59	0,85	40,66
Rioja,	2	25,13	10,9	0,75	25,58
Lugo	1	21,19	13,75	0,14	21,27
Madrid	85	31,44	14,6	3,28	57,65
Málaga	7	16,84	25	0,47	47,51
Murcia	43	19,15	18,58	0,57	34,83
Navarra	2	28,99	10,01	1,45	40,14
Ourense	1	19,82	19,24	0,36	23,83
Asturias	2	20,52	14,59	0,87	25,23
Palencia	1	24,37	13,86	0,50	23,69
Las Palmas	29	19,04	25,25	0,32	41,52
Pontevedra	9	19,77	18,47	0,76	28,97
Salamanca	3	19,68	16,22	0,93	29,51
Santa	15	18,93	24,54	0,30	40,86
Cantabria	3	20,97	12,89	0,71	29,24
Segovia	3	21,28	12,63	0,43	28,34
Sevilla	18	18,44	27,03	0,59	41,34
Soria	1	24,36	12,25	0,36	25,65
Tarragona	2	28,09	17,41	0,66	46,93
Teruel	1	24,64	12,27	0,63	18,79
Toledo	3	17,23	23,44	0,42	36,35
Valencia	16	21,45	20,24	0,90	45,57
Valladolid	9	23,80	13,96	0,93	31,22
Bizkaia	2	29,27	13,75	0,71	43,08
Zamora	1	19,02	16,67	0,41	24,87
Zaragoza	22	25,49	13,95	1,22	31,85
Ceuta	13	18,75	13,95		54,48
Melilla	12	17,14	13,95	0,16	56,89
Media Nacional	**8,79**	**21,76**	**18,18**	**0,73**	**35,43**
Desv. Típica	**14,44**	**4,58**	**6,29**	**0,58**	**10,53**
Mediana	**3**	**20,04**	**16,45**	**0,59**	**31,86**
Coef. Asímetría	**3,39**	**0,90**	**0,79**	**2,72**	**0,63**
Curtosis	**14,81**	**0,21**	**-0,37**	**9,30**	**-0,43**

Leyenda Tabla 2: U. Mil indica el número de unidades militares, PIB pc es el pib per cápita, desempleo es el porcentaje de población activa desocupada, libros y criminalidad son el número anual de libros editados y crímenes cometidos por cada 1.000 habitantes.

Tabla 3: Correlaciones

	U.Mil	PIBpc	Desempleo	Libros	Criminalidad
U.Mil	1				
PIBpc	0,0804*	1			
Desempleo	0,1304*	-0,7538*	1		
Libros	0,4191*	0,4456*	-0,2374*	1	
Criminalidad	0,3816*	0,1697*	0,1370*	0,3966*	1

Leyenda Tabla 3: U. Mil indica el número de unidades militares, PIB pc es el pib per cápita en miles de euros, desempleo es el porcentaje de población activa desocupada, libros y criminalidad son el número anual de libros editados y crímenes cometidos por cada 1000 habitantes.* correlación significativa al 99%.

4. Resultados y discusión

La tabla 1 recoge la distribución de las unidades y el personal de las FAS por comunidades autónomas. Como cabía esperar, la comunidad con mayor número de unidades es Madrid con 85, donde se concentran los Órganos Centrales del Ministerio y los Ejércitos. Las siguientes comunidades por número de unidades militares son Andalucía, Región de Murcia y Canarias. Las dos primeras concentran la presencia de la Armada como habíamos comentado previamente. La tercera es una región de alto interés geoestratégico [3]. Asturias, Navarra y La Rioja presentan el menor número de unidades. Más interesante es el personal destinado por CC.AA. Si bien en todos los casos el personal de las FAS representa un porcentaje pequeño sobre la población ocupada, comunidades autónomas con un número pequeños de unidades tienen porcentajes similares a otras con un número muy superior de unidades, como es el caso de Madrid y Región de Murcia. La primera casi duplica en número de unidades la segunda o Asturias y Baleares. Ceuta y Melilla presentan los porcentajes más elevados. Respecto del nivel educativo del personal de las FAS, destaca Madrid con más del 50 % de personal con estudios universitarios (49,28 % tienen un grado universitario). Este resultado parece esperable pues como hemos comentado anteriormente, la capital es la sede de los Órganos Centrales. Es interesante el hecho de que este porcentaje es superior al porcentaje del resto de la población con estudios universitarios (42,3). En cambio, en Cataluña, Extremadura, Navarra y Ceuta menos del 25 % del personal de las FAS tiene estudios universitarios. En este caso, quizá el resultado de Cataluña y Navarra sea llamativo pues el porcentaje para el resto de la población es respectivamente 31,7 y 39,7[2], superior a la media nacional.

La tabla 2 presenta los datos de las variables socioeconómicas analizadas así como los estadísticos descriptivos. Los resultados para el número de unidades por provincia demuestran que estamos ante una distribución con asimetría positiva lo que indica que los valores altos (cola derecha) están más dispersos. Respecto de la curtosis, la distribución tiene apuntalamiento positivo, es decir, que en las colas hay menos casos que en una distribución normal. El PIB per cápita, está más cerca de la distribución normal tanto de la simetría como de la curtosis. El desempleo y la criminalidad tienen una distribución poco asimétrica pero en cambio presentan apuntalamiento negativo indicando que tienen más casos en los extremos que una variable normal. Por último, los libros editados presenta asimetría y curtosis positiva, más acusadas en ambos casos que el PIB pero menos que la distribución de las unidades.

Si nos centramos en la relación entre variables, no parece haber una relación clara entre las unidades militares y el nivel de desarrollo económico. Hay provincias con una elevada presencia de unidades con niveles de PIB muy inferior a la media: Cádiz o Murcia, pero también provincias con muy pocas

2 Datos Eurostat. Elaboración Marta Portela https://capitalsocialenespanol.wordpress.com/2012/08/02/nivel-de-estudios-de-la-poblacion-espanola-por-comunidades-autonomas/

unidades que se encuentran en la parte baja de la distribución del PIB: Badajoz o Toledo. Si analizamos la relación entre el número de unidades y la tasa de desempleo, la situación es similar, provincias con muchas unidades y altas tasas de desempleo y otras en cambio con pocas unidades y también altas tasas de paro como Las Palmas y Córdoba respectivamente. Esta evidencia viene confirmada en la tabla 3 donde se presentan las correlaciones. La correlación entre el número de unidades militares y el desarrollo económico es la más baja de todas las calculadas. Se encuentra cerca de cero aunque significativa lo que indicaría que hay cierta relación positiva entre ambas variables. De forma similar, la correlación entre unidades y tasa de desempleo es positiva (la segunda más baja de las calculadas) y significativa.

Respecto de la correlación entre las variables económicas y sociales, el desempleo y el desarrollo económico tienen una relación negativa y significativa. El número de libros editados tiene una correlación positiva con el desarrollo económico y negativa con el desempleo. La criminalidad presenta una correlación positiva con el desempleo. El número de crímenes por cada 1.000 habitantes presenta además una relación positiva con el desarrollo económico, pero negativa con la publicación de libros. Todas las correlaciones son significativas. Estos resultados son coherentes con lo encontrado en la literatura previa.

Más interesante son los resultados que relacionan las variables sociales con el número de unidades. En este caso la correlación es positiva tanto para los libros editados como para la tasa de criminalidad. Recogiendo la correlación una relación intensa (alrededor del 40 %) y significativa. La correlación positiva entre crimen y presencia de unidades militares está en la línea del trabajo de [10], que encuentra una relación positiva entre la criminalidad y las unidades militares para Alemania. La relación positiva con la publicación de libros es un resultado novedoso, no hemos encontrado ningún trabajo anterior, y puede abrir una línea de estudio para relacionar las unidades militares no solo con el desarrollo económico sino social y cultural.

5. Conclusiones

Este trabajo analiza la relación entre la presencia de unidades militares y personal de las FAS y un conjunto de medidas de desarrollo socioeconómico. El análisis se ha realizado a nivel de CC.AA. o provincial atendiendo a la disponibilidad de los datos. Los principales resultados muestran que el personal de las FAS en las comunidades con mayor presencia tienen mayor nivel educativo que la población en general y que las unidades militares tienen una relación positiva con el desarrollo económico y la publicación de libros a nivel provincial. Por otra parte, la presencia de unidades también tiene correlación positiva y significativa con el nivel de desempleo y la tasa de criminalidad.

Las políticas públicas buscan aumentar el bienestar de los ciudadanos. Reducir el desempleo y la criminalidad forma parte de dichas políticas. Las FAS se han caracterizado por adaptarse a las nuevas circunstancias, como demuestra los recientes esfuerzos de restructuración y racionalización. Sin obviar las necesidades de eficiencia operativa, conocer el efecto que las unidades militares tienen en el área que les rodea es importante en la toma de decisiones sobre futuras restructuraciones. Este trabajo es el primer paso para profundizar en el conocimiento de esta relación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por Ministerio de Educación y Ciencia a través de los proyectos ECO2013-45395-R, ECO2013-48496-C4-4-R, ECO2015-67999-R (MINECO / FEDER), el Gobierno Regional de Aragón y el Fondo Social Europeo (proyecto S125:Compete) y el Centro Universitario de la Defensa Zaragoza a través del proyecto 2017-21.

Referencias

1. *Arteaga F. The Coming Defence: Criteria for the Restructuring of Defence in Spain. Elcano Policy Paper. Real Instituto Elcano. Madrid; 2013.*

2. *Asteris M, Clark D, Jaffry S. The Economic Effect of Military Facility Contraction: A Naval Case Study. Defence and Peace Economics, 2018;29(3):268-293, DOI: 10.1080/10242694.2015.1122281.*
3. *Ballesteros Martín, M. A. El Valor Geoestratégico de las Islas Canarias. Documento de análisis IEES 09/2013. Madrid, Ministerio de Defensa; 2013.*
4. *Colom Piella G. Transforming the Spanish military. Defense Studies, 2016;16(1), 1-19.*
5. *De Pablo I, y Borrajo Millán F. La racionalización de las Fuerzas Armadas: visión y contraste desde la Teoría de la Organización en VVAA. Monografía CESEDEN 138: Racionalización de las restructuras de las Fuerzas Armadas. Hacia una organización conjunta. Madrid, Ministerio de Defensa; 2013.*
6. *Enseñat y Berea, F. Transformación del Ejército de Tierra en VVAA. Monografía CESEDEN 138: Racionalización de las restructuras de las Fuerzas Armadas. Hacia una organización conjunta. Madrid, Ministerio de Defensa; 2013.*
7. *García JR, Murillo J, Suriñach J, y Vayá E. Economic impact of the ministry of defence's budget: methodological design and results for the Spanish economy. Defence and Peace Economics. 2018;29(4):459-473, DOI: 10.1080/10242694.2016.1158439.*
8. *Lee J. The Regional Economic Effects of Military Base Realignments and Closures, Defence and Peace Economics. 2018;29(3):294-311, DOI: 10.1080/10242694.2016.1170335.*
9. *Paloyo AR, Vance C, y Vorell M. The regional economic effects of military base realignments and closures in Germany, Defence and Peace Economics, 2010;21(5-6):567-579, DOI: 10.1080/10242694.2010.524778.*
10. *Paloyo AR, Vance C, y Vorell M. Local determinants of crime: Do military bases matter? Demographic Research, 2014; 31(21):625–658.*
11. *SIPRI Yearbook 2017.*
12. *Williams J. A. The military and society beyond the postmodern era. Orbis, 2008;52(2):199-216.*
13. *Zhang Y, Wang R, y Yao D. Does defence expenditure have a spillover effect on income inequality? A cross-regional analysis in China, Defence and Peace Economics, 2017;28(6):731-749, DOI: 10.1080/10242694.2016.1245812.*

7B. Geografía, política y derecho

La presencia de la Armada española en Guinea Ecuatorial (1778-1883)

Vallina Vallina, Alicia

Directora Técnica del Museo Naval de San Fernando

Palacio de Capitanía. C/ Escaño s/n. 11100 San Fernando, Cádiz, avalva1@mde.es

Resumen

Con motivo de la celebración, el día 12 de octubre de 2018, del cincuentenario de la independencia de Guinea Ecuatorial, se propone la revisión, desde el punto de vista histórico, cultural y geopolítico, de las principales expediciones de la Armada española a los territorios de Fernando Poo. La propia Fernando Poo, conocida como *La Hermosa*, El Príncipe, Santo Tomás y Anobón, habían sido descubiertas, según la mayor parte de la historiografía, entre 1472 y 1473 por famosos capitanes portugueses de la época; Fernando Po, Pedro de Escobar, Bartolomé Díaz y Juan de Santarem. Portugal no mostró interés alguno por colonizarlas hasta que, tras la breve ocupación holandesa de las colonias durante la guerra entre Portugal y Holanda en 1641, vuelven a formar parte de la corona portuguesa. Esta situación se mantendrá hasta que, por el *Tratado de San Ildefonso* primero y por el *Tratado del Pardo* después, firmados en 1777 y 1778 respectivamente, María I de Portugal acepta ceder al rey Carlos III de España estas islas así como la costa guineana entre el río Níger y el río Oogué.

Tras una primera expedición comandada por el *conde de Argelejos* en 1778, le seguirán otras muchas, entre las que destacan la dirigida por el capitán de navío *D. Juan José de Lerena y Barry* entre 1842 y 1843 acompañado del entonces guardiamarina *D. Casto Méndez Núñez*, la de los capitanes de fragata *D. Nicolás de Manterola y Manterola* en 1845 y *D. Carlos Chacón Michelena*, primer gobernador residente de las islas en 1858. Entre los meses de marzo y abril de 1883 se inicia la expedición al interior de la isla de Fernando Poo del teniente de navío *D. Francisco Romera y Barreda*, acompañado del fotógrafo nigeriano W.J. Sawyer, uno de los más destacados del continente negro. El testimonio fotográfico de esta expedición fue publicado en la revista *La ilustración española y americana.*

Palabras clave

Armada española, Guinea Ecuatorial, Fernando Poo, bubis, expediciones navales.

1. Introducción a la historia de los asentamientos españoles en las islas de Fernando Poo

El grupo de islas de Fernando Poo, situado en el fondo del golfo de Guinea, estaba compuesto por la propia Fernando Poo, conocida como *La Hermosa*, El Príncipe, Santo Tomás y Anobón, descubiertas, según la mayor parte de la historiografía, entre 1472 y 1473 por famosos capitanes portugueses de la época; Fernando Po, Pedro de Escobar, Bartolomé Díaz y Juan de Santarem. Portugal no mostró interés alguno por colonizarlas hasta el año de 1592, momento en que envía a cada una de ellas a un sacerdote, generalmente negro, un gobernador, un maestro de escuela, un capitán y entre 4 y 6 portugueses «de la hez[1] de las colonias inmediatas». Tras la breve ocupación holandesa de las colonias durante la guerra entre Portugal y Holanda en 1641, vuelven a formar parte de la corona portuguesa hasta que, por el artículo 13 del *Tratado del Pardo*, firmado el 24 de marzo de 1778, María I de Portugal acepta ceder al rey Carlos III de España las islas de Fernando Poo así como la costa guineana entre el río Níger y el río Oogué.

Tal y como señala el general auditor D. José Cervera Pery en su artículo titulado *La expedición del conde de Argelejos a Fernando Poo. Primera presencia española en el Golfo de Guinea*, la primera expedición española que llega a las islas de Fernando Poo parte, en 1778, de Montevideo, sede del apostadero naval de la Real Armada. Fue dirigida por el brigadier de Infantería de los Reales Ejércitos D. Felipe de los Santos, conde de Argelejos, quien también ejercería como gobernador y jefe militar de las islas de Fernando Poo y Anobón. Como segundo jefe de la expedición se nombró al teniente coronel de Artillería, D. Joaquín Primo de Rivera, empleando como embarcaciones las fragatas *Santa Catalina*[2], *Nuestra Señora de la Soledad* y *Nuestro Señor Santiago* –la primera zarpa desde Cádiz y segunda desde Ferrol y el paquebote se incorpora en Montevideo–. La fragata Santa Catalina estaba capitaneada por D. José Varela Ulloa[3], jefe naval de la expedición, además de gran cartógrafo e hidrógrafo de las costas africanas.

El interés español por estos territorios era claro: mano de obra esclava para proveer a sus colonias americanas evitando depender de las grandes compañías extranjeras y poseer una base donde los barcos españoles pudieran recalar en su camino hacia las Filipinas. Desde entonces, los españoles llevaron a cabo numerosos intentos por establecerse en las islas del golfo de Guinea, pero los escasos recursos económicos habilitados al efecto, así como la insalubridad del clima, entre otros motivos, malograron las posibilidades de asentamiento. Los españoles únicamente tomaron dos islas que habían pertenecido a la corona portuguesa, Bioco y Anobon, aunque sin lograr el aprovechamiento comercial deseado en el comercio de esclavos negros debido a la fuerte oposición del gobierno británico y de las grandes compañías negreras.

Pero el interés de España por sus colonias africanas era tan relativo que no fue hasta 1827 cuando un grupo expedicionario inglés, mandado por el capitán Owen, ocupa de modo permanente las islas de Bioco y Anobón. En la primera fundan la colonia *Clarenes City*, origen de lo que luego sería Santa Isabel[4],

1 Referido a la gente más despreciable y marginal.
2 El conde de Argelejos viajará en esta fragata, donde fallecerá el 14 de diciembre de 1778 por causa de una enfermedad común.
3 José Varela Ulloa (1739-1794) fue un destacado geógrafo y naturalista, miembro de la Academia de las Ciencias de París.
4 Actual Malabo.

capital de la isla. Además, Richard Owen daría a conocer los primeros animales de Guinea Ecuatorial: un camaleón (*Chamaleo oweni*) y un pequeño caracol de río (*Potadoma freethi*), que son descritos por J.E. Gray[5] en 1831. Los británicos abandonarán también su proyecto colonizador en las islas en 1834.

Es ahora cuando España retomará de nuevo su proyecto en Guinea Ecuatorial y, ante la evidente imposibilidad de empelar las islas para el comercio de esclavos, la corona española busca nuevas posibilidades de explotación colonial. De este modo, el profesor D. José de Morós, viaja a la isla de Anobón y costas adyacentes durante los años 1836, 1838 y 1839 para establecer los «principios que puedan servir de base para la completa solución de una de las cuestiones que en su programa acaba de proponer la ilustre y patriótica Sociedad Económica de Madrid, para lustración suya y la del Gobierno, que se halla en la necesidad de apreciar en su justo valor aquellas posesiones españolas»[6].

Esta primera crónica que se conservan en la biblioteca del Museo de América de Madrid sobre el grupo de islas de Fernando Poo data de 1844 y fue escrita por *D. José de Morós y Morellón*, catedrático de Náutica de la ciudad de Valencia y socio de la Real Sociedad Económica de Amigos del país valenciano y por D. Juan Miguel de los Ríos, auditor honorario de Marina y catedrático de Jurisprudencia en la Universidad literaria de Madrid.

Dentro de un contexto de abandono general y debido al interés de España en vender a los ingleses las islas de Fernando Poo[7], los círculos ilustrados comenzaron a llamar la atención sobre esta parte del imperio colonial español que ya estaba herido de muerte. Las islas aparecen ahora como territorios nada despreciables, llenos de riquezas y posibilidades comerciales que aconsejaban una eficaz administración y conservación por parte de las autoridades públicas. Así como Portugal, Inglaterra o Francia había sacado un más que sustentoso provecho de sus posesiones coloniales, España debía ahora despertar el interés por el estudio de estas colonias en aras a comprender su utilidad e importancia.

Tras la primera expedición del conde de Argelejos, continuaron las del capitán de navío *Juan José de Lerena y Barry* (1842-1843) con el objetivo de recopilar información geográfica de las islas Bioco y Anobon[8], *Nicolás de Manterola* (1845), *Rafael de Cargas* (1854) y la primera expedición misionera, encargada a los jesuitas por un decreto aprobado el 23 de mayo de 1857, siempre con el objetivo de consolidar la presencia de España en la zona. Algunas de estas expediciones se toparon en las costas de los territorios pertenecientes a España con extraños veleros, sobre todo bergantines y polacras, que, especialmente durante la primera mitad del siglo XIX, transportaban esclavos desde esa zona a Cuba y a otros lugares de América.

Otra de las expediciones más significativas de cuantas fueron llevadas a cabo por los marinos de la Armada española a las costas de Guinea fue la comandada por el capitán de fragata D**.** *Carlos Chacón Michelena* (1816-1863).

A partir de entonces, el interés por la costosa, insana e improductiva posesión de aquellas tierras decreció considerablemente en España. Los gobiernos de la «Gloriosa» fueron especialmente críticos y

---

5 John Edward Grey (1800-1875) fue un importante naturalista, zoólogo y botánico ingles además de curador jefe de la colección de zoología del Museo Británico de Londres entre 1840 y 1874. Publicó numerosos catálogos de las colecciones de animales del museo, mejoró las colecciones y realizó pormenorizadas descripciones de nuevas especies.

6 De Morós y Morellón, J y De los Ríos. J.M: *Memorias sobre las islas africanas de España, Fernando Poo y Annobon. Premiadas por la Sociedad Económica Matritense*. Madrid, 1844. Imprenta de D. José de Rebolledo y Compañía.

7 Recordemos que en julio 1841 se presentó a Cortes un proyecto de ley que no prosperó pero que tenía tal intención. Este proyecto fue apoyado por algunos sectores de la prensa como los diarios *La Gaceta*, *La Constitución* y *El Espectador* que hablaban abiertamente de un engaño por parte de Portugal en la cesión de estas colonias. Por otro lado, diarios como *El Eco del Comercio*, *El Corresponsal* y *El Correo Nacional*, hablaban de su utilidad y del partido que podría obtenerse con su estudio y explotación.

8 Con motivo de esta expedición, se elabora una carta esférica de la costa occidental de África en el golfo de Guinea con el litoral de Benin, Calabar y Cabun que forman la gran ensenada de Biafra, incluidas las islas de Fernando Poo, Príncipe, Santo Tomé y Anobon. Fue realizada en la Dirección Hidrográfica de Madrid según datos procedentes de fuentes hidrográficas portuguesas, inglesas y españolas –especialmente tomados durante la expedición del conde de Argelejo en 1778- y presentada a SM el Rey y al Regente del Reino por el Mariscal de Campo, D. Andrés García Camba. Delineada por Miguel Moreno a escala (ca. 1.000.000) 1 grado de meridiano. 62 x 92 cm. Madrid, 1841. MNM sig. 104-19. *Tesoros de la Cartografía Española*. XIX Congreso Internacional de Historia de la Cartografía. Biblioteca Nacional, Madrid, 2001, pp. 228-229.

por Real Decreto de 1868, se redujo la presencia del Estado en Guinea a la Estación Naval, cuyo jefe sería además el gobernador. Pero, además, toda la estructura administrativa se reducía al personal de la estación con la única excepción de la delegación del Ministerio de Fomento existente en la colonia, de la que dependían la mayoría de los servicios del Estado en la isla: escuela, hospital y personal de obras públicas y agronomía. A tal punto llegaron las cosas que en 1870 se llegó a proponer seriamente el abandono de las islas. La situación empeoró con el cambio de régimen. Por Real Decreto de 6 de septiembre de 1878 se rebajó de nuevo el presupuesto colonial, suprimiendo el puesto de secretario del gobernador y ordenando que el médico naval lo fuera también de la colonia. También la estación naval había visto reducidos sus efectivos y ahora el mando estaba en manos de un capitán de fragata o de un teniente de navío, que mandaban goletas de hélice, especialmente anticuadas y de escaso valor militar. Sin embargo, el desinterés oficial se vio contrarrestado por la iniciativa del Primer Congreso de Geografía Colonial y Mercantil, celebrado en Madrid en noviembre de 1883, con participaciones tan destacadas como la de Joaquín Costa. Al mismo tiempo, la Armada, o, mejor dicho, algunos de sus oficiales, empezaron a tomar un papel más activo en la reivindicación de una mayor atención hacia la olvidada posesión.

2. La expedición de Francisco Romera y Barreda (1883) a través de la colección de fotografías del Museo de América de Madrid

En el archivo documental del Museo de América se conservan un total de 25 fotografías realizadas por el fotógrafo procedente de Lagos (Nigeria), W.J. Sawyer, que acompaña al teniente de navío español *D. Francisco Romera y Barrera* en la expedición que este realiza al interior de la isla de Fernando Poo en 1883. Estas fotografías fueron expuestas en la *Exposición Colonial de Ámsterdam* celebrada ese mismo año y publicadas a modo de ilustración en la revista *La Ilustración española y americana*[9] (fig. 1).

Fig. 1. Revista La Ilustración Española y Americana. Madrid, 22 de mayo de 1883, n.º XIX. Expedición al interior de Fernando Poo. Indígenas bubis de los pueblos de Bocabochó y Musola. Fotografía facilitada por el teniente de navío D. Francisco Romera.

El catálogo de esta exposición, correspondiente a las provincias ultramarinas de España publicado por la Comisión Central Española en abril de 1883, recoge un ingente número de bienes culturales procedentes de las posesiones españolas en América, Oceanía y Fernando Poo. Se establecieron cuatro secciones; la primera la relativa a la zona de Cuba; la segunda a Puerto Rico y Fernando Poo; la tercera a Filipinas y la

9 Ver el volumen 27 de la revista *La Ilustración española y americana* n.º 17 (8 mayo 1883) pp. 275-276, n.º 19 (22 mayo 1883) pp. 307 y 317 y n.º 32 (30 agosto 1883), pp. 115 y 124.

cuarta y última sobre asuntos generales. La sección segunda estaba presidida por el conde de Torrepando al que acompañaban como secretarios D. Antonio Vázquez-Queipo Coste (1840-1900), D. Juan Posada Aldazy el jefe de negociado de telégrafos del Ministerio de Ultramar. El hecho de que esta exposición se celebrase en la capital holandesa se debió a la importancia del país como una de las más antiguas potencias coloniales y se invitó al mundo entero a admirar los maravillosos productos procedentes de los territorios conquistados. La muestra comprendía cinco grandes áreas temáticas: exposición colonial; exposición de exportación general; exposición retrospectiva de bellas artes y de artes aplicadas a la industria; exposiciones especiales y conferencias y reuniones científicas.

La parte colonial era la base de la exposición donde se explicaba la flora y fauna de las colonias, el comercio, la industria y la agricultura. La segunda división contenía todo lo relacionado con la industria aplicada a la transformación de las materias primas mientras la tercera división, que es la que nos ocupa, hacía referencia a las bellas artes. En lo relativo a la naturaleza de las comarcas colonizadas existían diversos grupos diferenciados a lo largo de la exposición que hacían referencia a la geografía, la meteorología, la configuración del terreno, la geología y mineralogía, la flora, la fauna y la antropología, así como a los medios de subsistencia de la población indígena, sus formas de gobierno, religiones, ritos y artes. En el catálogo no se recogen específicamente los bienes culturales de cada una de las secciones, pero podemos deducir que las fotografías realizadas por W.J. Sawyer pudieron incluirse en algunas de las áreas anteriormente mencionadas.

Estas fotografías posiblemente procedieran de las colecciones del antiguo Museo-Biblioteca de Ultramar, creado como recuerdo de la Exposición General de las Islas Filipinas, inaugurada en los palacios del Retiro de Madrid el 30 de junio de 1887. Tras la pérdida de las últimas colonias en 1898, las colecciones de esta institución fueron distribuidas entre el Museo de Ciencias Naturales, el Museo Nacional de Antropología, la Biblioteca Nacional y el Museo Arqueológico Nacional. Así, en el número de orden 135, folio 34 del año 1919 del archivo documental de este ultimo museo se recoge un extenso y pormenorizado inventario sobre las colecciones de la antigua Sección Etnográfica de la institución, hoy desaparecida. En el listado relativo al conjunto de objetos adquiridos por esta sección entre los años 1882 y 1893 se encuentran las 25 fotografías a las que hemos hecho referencia además de otras cinco más que representan las casas de los comerciantes Mr. John Holt, situada en la Plaza de España y la de José Joaquín de Gonscia, situada en uno de los ángulos de la misma plaza, una vista de la bahía de Santa Isabel, otra vista de la iglesia de San José y un grupo de humanes al servicio de la colonia (fig. 2).

Fig. 2. Autorretrato de un fotógrafo africano. W. J. Sawyer. Calabar, sur de Nigeria.

Por los datos que tenemos, el conjunto de fotografías a las que nos referimos debieron ser tomadas entre el 10 de enero y el 4 de marzo de 1883 pues la exposición holandesa se inaugura el primero de mayo y las reproducciones que se recogen en *La Ilustración española y americana* datan de esa fecha en adelante, pudiendo ser las primeras fotografías que se realizan del interior de la isla[10].

Del *fotógrafo africano W.J. Sawyer* tenemos pocas noticias. Se conservan fotografías suyas en el British Museum londinense, en el Museum Der Kulturen de Basel y un autorretrato propiedad de Michael Graham-Stewart publicado en la revista *African Arts*[11]. Del mismo modo, el Archivo General de Palacio Real posee 14 fotografías tomadas durante esta expedición, siendo buena parte de ellas las mismas que se conservan en el Museo de América.

Sobre el asentamiento del Sr. Romera y Barreda en Fernando Poo da buena cuenta el general *D. José Valero y Berenguer*[12] en su artículo publicado en la *Revista de Geografía Comercial* en los meses de octubre a diciembre de 1891 durante el segundo de sus viajes a la isla guineana. Así, cuando describe el pueblo de *Bococo*, el último al suroeste de la capital, Santa Isabel, se refiere a los terrenos del Sr. Romera como de más de 90 hectáreas «dedicadas a la producción de cacao». Continúa describiendo la plantación como «dividida en zonas que comunican entre sí por calzadas bien construidas con hileras de plátanos y abacás. A una de estas, que por su extensión y belleza admiré, tuvo el Sr. Romera la deferencia de darle el nombre del ilustre geógrafo D. Francisco Coello». El Sr. Romera, tal y como también describe el padre Ferrer Piera en su obra *Fernando Póo y sus dependencias*[13] era «jefe de la Armada y propietario de una hermosa finca en *Bococo*, provista de maquinaria y de cuantos elementos se halla dotada la agricultura moderna». A la citada finca había que añadir, siguiendo al padre Ferrer «la de Baiba, mujer negra, dueña de la mayor extensión de terreno productor, y cuya renta bastaría para vivir en Europa como una potentada; la gran zona de Batete, cuya parte cultivada asciende desde el mar hasta una altura de 300 metros y la finca de Aleñá, con ochenta hectáreas plantadas de cacao».

Por las investigaciones realizadas, el teniente Romera escribe, con los datos de su expedición al interior de Fernando Poo, la obra titulada *Memorias*, donde, según se recoge en *La Ilustración española y americana*, describe y analiza minuciosamente el tipo de tribus que se encontraban en la isla, especialmente la de los *bubis*, además de la situación de la colonia, en un proceso notable de mejora gracias a la incorporación de mano de obra procedente de la isla de Cuba (fig. 3).

Fig. 3. Fotografía conservada en el Museo de América de Madrid de la expedición realizada por el teniente de navío D. Francisco Romera al interior de la isla de Fernando Poo, 1883.

10 Si tenemos en cuenta los comentarios recogidos en la revista *La Ilustración española y americana* n.º 19, de 22 de mayo de 1883, p. 307.

11 *African Arts*, autum 2015. Vol. 48, n.º 3. African Photography. Editor Charles Gore.

12 Existen dos retratos suyos en el Museo del Ejército. Un óleo sobre lienzo de 104,5 x 85 cm con número de inventario MUE-44004 y una estampa en papel litográfico, realizada por Bernardo Blanco Pérez, con número de inventario MUE-44115. En esta última viste uniforme de mariscal de campo y luce tres cruces laureadas de San Fernando además de otras condecoraciones.

13 Ferrer Piera, M: *Fernando Póo y sus dependencias.* Barcelona, 1900, p. 52.

D. Francisco Romera y Barreda había nacido en Carmona, en la provincial de Sevilla, el 23 de septiembre de 1847. Ingresa como aspirante en el Colegio Naval Militar el 7 de julio de 1864, a la edad de 16 años, para ser promovido posteriormente a guardiamarina de 2.ª clase por Real Orden de 20 de junio del año siguiente. El día 30 embarca en el navío rey *D. Francisco de Asís* con el que viaja por toda la costa española. A bordo de la fragata *Villa de Madrid* llegará a Lisboa y el 15 de julio de 1870 es ascendido a alférez de fragata. Tras embarcar en la fragata *Lealtad*, sale desde Cádiz en el vapor correo *Isla de Cuba* con destino a La Habana, Santiago de Chile, Puerto Cabello, Curacao y Matanzas. También viajaría a Cuba y Puerto Rico a bordo del vapor *Hernán Cortes*. También surcaría los mares a bordo de varios cañoneros, de la goleta *Favorita* y de la fragata *Arapiles*. Romera y Barreda visitará en el ejercicio de su cargo, en enero de 1777, Haití y Puerto Príncipe hasta que, por Real Orden de 18 de octubre de 1878 es ascendido a teniente de navío de segunda clase. En 1880 embarca en la fragata *Blanca*, escuela de guardiamarinas, y visita Valencia, Mallorca, Alicante, Santa Pola, Algeciras y Cádiz. La primera vez que viaja a la isla de Fernando Poo será a bordo de vapor inglés *Mayumba*, el 21 de noviembre de 1880. Allí será nombrado comandante del pontón *Trinidad* y capitán del puerto de Santa Isabel por Real Decreto del 1 de diciembre. Desempeñará entonces distintas misiones viajando por todas las islas de la costa guineana hasta que el 10 de enero de 1883, el gobernador español de estos territorios, D. José Montes de Oca, le encarga en comisión viajar al interior de la isla con la idea de recoger material que sirviera para presentar en la Exposición Colonial de Ámsterdam a la que ya nos hemos referido anteriormente. Romera y Barreda cesa en la expresada comisión, atendiendo a lo citado en su hoja de servicios y custodiada en el Archivo General de la Marina D. Álvaro de Bazán, el 4 de marzo de 1883. Ese mismo día regresará enfermo a la península a bordo del vapor inglés *Volta,* llegando a Tenerife el día 8 de abril. Desde ese momento se le concederán dos meses de licencia hasta que, recuperado, ingresa en la Escuela de Torpedos el 31 de agosto de 1883.

En el mismo mes de agosto de 1884 toma el mando de la corbeta *Ferrolana* a bordo de la cual regresará de nuevo a Fernando Poo. Entre la tripulación se encontraba el gobernador Montes de Oca, el teniente de navío de 1.ª clase, D. Edelmiro García, 9 padres misioneros, 9 sacerdotes y 5 madres monjas. Tras unas breves reparaciones en el caño de la Carraca, parten rumbo a Tenerife el 7 de noviembre. El día 20 de octubre llegan a Sierra Leona no arribando a Santa Isabel de Fernando Poo hasta el 27 de enero de 1885. El 27 de febrero, Romera y Barreda se hace cargo de la comandancia de la Estación Naval y del despacho del gobierno de estas posesiones, cargos que ocuparía siempre que el gobernador general estuviese ausente. Además, a partir del 28 de marzo de 1886 se haría cargo también del juzgado y secretaría de este gobierno. El 3 de abril de 1887 regresará de nuevo a la Península. Sin embargo, todavía viajará una vez más a Fernando Poo. Así, el 17 de noviembre de 1887 embarca en el vapor alemán *E. Werman* con destino de nuevo a Santa Isabel, a donde llega el día 5 de diciembre tomando el mando del pontón *Ferrolana* al día siguiente y entregándolo el 21 de octubre de 1889. Por Real Orden de marzo de 1889 se le fue concedida la situación de supernumerario y el 17 de septiembre de 1890 asciende a teniente de navío de primera clase. En esta situación solicita permiso para viajar por la costa guineana, España y el extranjero y no volverá a disponer de mando hasta el año de 1906 en que, por Real Orden de 23 de febrero, será nombrado segundo comandante de la provincial de Huelva. Al año siguiente, y por una nueva Real Orden de 9 de febrero, Romera y Barreda se convertirá en ayudante del distrito de Ayamonte hasta su fallecimiento poco tiempo después.

Atendiendo a la documentación consultada, el teniente de navío Romera y Barreda parece permaneció durante aproximadamente 15 años en la isla de Fernando Poo dedicándose al cultivo y plantación de tabaco, algodón y ñame hasta que, a finales de 1905, regresa a su Andalucía natal. Sin duda Romera se convertiría en uno de los personajes más importantes de la isla, respetado tanto por nativos como por españoles llegados de la Península. Su expedición al interior de Fernando Poo acompañado del fotógrafo africano W.J. Sawyer sentará las bases para la realización de estudios antropológicos a partir de documentación gráfica que a finales del siglo XIX permitirá despegar a la propia Antropología como ciencia.

Referencias bibliográficas

1. Aguilar Piñal, F. La Real Sociedad Económica Matritense de Amigos del País. Madrid, Artes Gráficas Municipales, 1972.
2. Bruquetas de Castro, F. y Lobo Cabrera, M. La Casa Condal de la Vega Grande de Guadalupe (Historia de una familia). Las Palmas, 2014.
3. De Castro, M. y De la Calle, M.L. Origen de la colonización española de Guinea Ecuatorial (1777-1860). Valladolid, Universidad de Valladolid, 1992; 45.
4. De Morós y Morellón, J. y De los Ríos. J. M. Memorias sobre las islas africanas de España, Fernando Poo y Annobon». Madrid, imprenta de D. José de Rebolledo y compañía, 1844.
5. Ferrer Piera, M. Fernando Póo y sus dependencias. Barcelona, 1900; 52.
6. García Cantús, D. Fernando Poo: una aventura colonial española en el África Occidental (1779-19009). Servicio de publicaciones, Universidad de Valencia, 2004.
7. Guillemar de Aragón, A. Opúsculo sobre la colonización de Fernando Poo y revista de los principales establecimientos europeos en la costa occidental de África. Madrid, Imprenta Nacional, 1852.
8. Martínez y Sanz, M. Breves apuntes sobre la isla de Fernando Poo en el Golfo de Guinea. Madrid, imprenta de Higinio Reneses, 1859.
9. Usera y Alarcón, J. M. Memoria de la isla de Fernando Poo. Imprenta de Tomás Aguado. Madrid, 1848.

La ciberdefensa en el derecho de la guerra

Rodríguez Varela, Alfonso Daniel

Capitán del Ejército del Aire y licenciado en Derecho.

Profesor titular del Departamento de Mando y Control de la Escuela de Técnicas de Mando y Control y Telecomunicaciones. Ctra. Extremadura Km 10.5 (Base Aérea de Cuatro Vientos). CP. 28071 Madrid.

Email: arodva4@ea.mde.es

Resumen

El ámbito de la ciberdefensa implica el posible uso de las redes y los equipos informáticos no solo como herramientas de intercambio de información con sus vulnerabilidades, sino también el uso de tales herramientas como arma. En efecto, se puede comprobar como el ataque a las vulnerabilidades de las redes puede tener una afectación importante al funcionamiento a estructuras críticas para la salud y el bienestar de la población. Es por ello por lo que, tanto los expertos en el derecho de la guerra como el Comité Internacional de la Cruz Roja, han comenzado a volcar sus preocupaciones y esfuerzos en la limitación de este novedoso tipo de armamento, prueba de ello es el *Manual Tallinn*, publicado en 2013, que destaca por ser el primer gran estudio del *cyberwarfare*, explorando las posibilidades de aplicación del derecho internacional público a la guerra cibernética.

Este estudio trata de profundizar en las cuestiones esenciales de la aplicación del derecho internacional humanitario y el derecho internacional público en general. Para ello, tomando como razón de ser del derecho internacional humanitario el principio de distinción se procura mostrar la aplicación del mencionado principio consuetudinario en el marco de las operaciones de la ciberguerra.

Esta propuesta responde al hecho de que este estudio puede ser de interés en un foro de intercambio de ideas acerca de la innovación en el ámbito de la seguridad y la defensa como forma de concienciar acerca de las necesarias limitaciones en los nuevos métodos y tácticas de actuación en los conflictos.

Palabras clave

Ciberdefensa, conflicto, *cyberwarfare*, DIH.

1. Introducción

La introducción del medio cibernético como potencial teatro de operaciones expone unos retos que exceden el ámbito tecnológico. En efecto, a lo largo de la historia de la humanidad, siempre ha existido un ánimo de limitar los efectos de la guerra plasmado en unos usos y costumbres, a partir del siglo XIX, se han venido codificando y que deben ser tenidos en cuenta para el caso de los conflictos que se libran en el ciberespacio.

El presente estudio tiene por objeto exponer los argumentos que sostienen la aplicación del derecho internacional humanitario al conflicto librado en el medio cibernético. Por razones de economía de espacio, este artículo no tiene un ánimo exhaustivo y hace hincapié al punto de vista del derecho consuetudinario, es decir, basado en la costumbre y aplicándose a los conflictos armados internacionales, los cuales están contemplados en los cuatro Convenios de Ginebra y en su Protocolo Adicional I.

Para realizar el mencionado análisis, se acudirá a las fuentes documentales, en especial a artículos científicos y académicos que sirvan para delimitar la mejor doctrina, a normas jurídicas vigentes e históricas. Asimismo, esta doctrina se ve complementada por diversos informes procedentes de instituciones competentes en la materia. Asimismo, se tiene en cuenta el *Manual Tallin*, importante hito en la materia al ser el primer gran estudio sobre el derecho internacional público aplicado a los conflictos en el ciberespacio.

2. Aproximación al cyberwarfare desde la perspectiva jurídica

Con carácter previo a abordar el concepto de *cyberwarfare*, se debe delimitar el medio en donde se encuentra este nuevo teatro de operaciones, el ciberespacio. Para este estudio se utilizará la definición de Daniel Kuehl, el cual expuso este concepto como:

«El conjunto de dominio global dentro del entorno de la información cuyo carácter único y distintivo viene dado por el uso de la electrónica y el espectro electromagnético para crear, almacenar, modificar, intercambiar y explotar información a través de redes interdependientes e interconectadas utilizando las tecnologías de información y comunicaciones» [6].

Esta definición ya deja entrever los aspectos del medio cibernético que causan las tres principales dificultades para desarrollar un derecho que regule el medio digital de una forma tan precisa como en el caso de los medios donde se desarrollan las actuaciones *cinéticas* (las del conflicto tradicional) [3]. En primer lugar, el ciberespacio es global, esta ausencia de fronteras obliga a que, como mínimo, se exponga una gobernanza sobre el medio cibernético, al menos mientras no exista la capacidad de imponer una regulación consensuada y global que permita abordar el delito en el ciberespacio. En segundo lugar, ese uso de la electrónica y del espectro implica un cierto anonimato del operador, que se vale de interminables redes globales para proteger su identidad. Por último, ese entramado de redes interdependientes e interconectadas provoca que las acciones realizadas en el ciberespacio se difundan a una altísima velocidad [7].

El término *cyberwarfare*, traducido al castellano como *guerra cibernética* es definida por el Comité Internacional de la Cruz Roja como:

«las operaciones lanzadas contra un ordenador o sistema de ordenadores a través de una corriente de datos, cuando se usan como medios y métodos de guerra en el contexto de un conflicto armado según se encuentra definido en el derecho internacional humanitario» [3].

Existe relativa unanimidad acerca de que, pese a tratarse de uno de los nuevos desafíos, tanto para el *ius ad bello*, como para el *ius in bello*. Así lo establece la ONU, a través del grupo de expertos que publicaron un informe al efecto para la Asamblea General [2]. En la misma línea, el *Manual Tallin* expone la problemática dividiéndose en dos partes, una dedicada al derecho internacional público, *ius ad bello*, y otra dedicada a la visión desde el derecho internacional humanitario. En la misma línea se ha pronunciado la Corte Internacional de Justicia, en su *Opinión Consultiva* acerca de la licitud de la amenaza o del empleo de las armas nucleares, incluía que el uso de toda arma debe estar sometido al derecho consuetudinario de la conducción de las hostilidades. Es razonable esta opinión, ya que, según el análisis hecho por el coronel López de Turiso acerca del conflicto en el espacio virtual, en nada varía la esencia del conflicto al introducir el ciberespacio como teatro de operaciones, sino que «los conflictos han sido y siguen siendo los mismos a lo largo de la historia, y lo único que ha variado han sido los escenarios en los que se llevan a cabo» [5]. No obstante, se debe destacar el hecho de que los ciberataques tienen unas evidentes ventajas cobre las operaciones cinéticas, en especial en materia de vidas, daños y pérdidas económicas. En efecto, un ciberataque que pueda anular el funcionamiento de una infraestructura determinada será más deseable que, por ejemplo, una misión SEAD [9].

Este mismo autor expone las dos formas principales de operaciones en la guerra cibernética, el *ciberataque* y el *ciberespionaje* [5]. Kai Ambos define el ciberataque como el uso de los medios técnicos para pelear una guerra con un enemigo en el ciberespacio [8].

El derecho internacional humanitario pone en valor su propia identidad para casos en los que el desarrollo de una normativa puede ser complicado como en este caso, en el que el potencial militar de la guerra cibernética está en pleno desarrollo. En efecto, ya en el siglo XVII, Hugo Grocio introducía el concepto de *temperamenta in bello* en su obra *De iure belli* para describir la tensión entre la necesidad militar y la necesidad de restringir esas conductas en los albores consuetudinarios del derecho de la guerra [4]. Este hecho, en combinación con las exposiciones anteriores acerca de la aplicabilidad del derecho internacional humanitario tienen como consecuencia la aplicabilidad de los principios fundamentales que rigen este campo del derecho.

3. Aplicación de los principios fundamentales del derecho internacional humanitario

Se puede considerar que el principio de distinción es la auténtica razón de ser del derecho internacional humanitario. En efecto, esta piedra angular de la legislación de los conflictos armados, contenida en el artículo 48 del Protocolo Adicional I de los Convenios de Ginebra se puede definir como la obligación de realizar una distinción entre combatientes y no combatientes en el seno de un conflicto armado. De este principio derivan reglas fundamentales como la prohibición de ataques contra la población civil (artículo 51.2), de los ataques indiscriminados (artículo 51.4), contra los bienes de carácter civil (artículo 52.1), así como el ataque, destrucción, sustracción o inutilización de los bienes indispensables para la supervivencia de la población civil (artículo 54.2).

Para este caso, el profesor Domínguez Bascoy expone el debate doctrinal acerca del concepto de ataque en relación con la ciberguerra [4]. En este sentido, según Schmitt, solamente las ciberoperaciones que se puedan considerar *ataques* podrán ser consideradas a las normas consuetudinarias del derecho internacional humanitario; lo que viene rebatido de forma acertada por Meltzer a raíz del enunciado del artículo 48 del Protocolo Adicional I [4]:

> «A fin de garantizar el respeto y la protección de la población civil y de los bienes de carácter civil, las Partes en conflicto harán distinción en todo momento entre población civil y combatientes, y

> entre bienes de carácter civil y objetivos militares y, en consecuencia, dirigirán sus operaciones únicamente contra objetivos militares».

La lectura que hace Meltzer de esta disposición es que se refiere a operaciones, no a ataques. Esto tiene como consecuencia que cualquier acción directa o indirecta de alguna de las partes en conflicto que no vaya dirigido únicamente contra objetivos militares será considerada como una violación de este principio, la cual podrá ser punible según la valoración de los hechos.

De los diferentes criterios que se exponen para determinar cuándo se puede considerar, con arreglo a derecho, que una ciberoperación constituye un ataque, el *Manual Tallin*, en su regla 30 expone las siguientes acciones que pueden ser consideradas como tal. En primer lugar, se expone que no son solo los actos violentos los que se pueden considerar ataque, sino que una acción de violentas consecuencias podrá ser considerada ataque; un ejemplo de esta afirmación sería una manipulación por medios informáticos de una instalación eléctrica que provoque un incendio. En segundo lugar, un daño que inutilice infraestructuras protegidas por los artículos 52.1 y 54.2 del Protocolo Adicional, que provoquen la pérdida de su funcionalidad; se considerarán, asimismo, ataques. Otro de los posibles papeles que puede jugar una ciberoperación no es constituir un ataque en sí, sino como una parte más de una operación más amplia, como puede ser el uso del ciberespacio con el fin de inutilizar unas defensas que faciliten un bombardeo sobre la población civil [1]. Cabe resaltar que la lista aquí expuesta no es más que una parte de los casos contemplados en el manual y que estos no constituyen en ningún caso una lista exhaustiva.

Establecido el concepto de ataque y de operación, la aplicación del principio de distinción debe ser enfocada a los objetivos de tales ataques y operaciones, es decir; los objetos y los individuos. Para estos casos, la doctrina ha centrado sus esfuerzos en establecer cuáles de esos objetivos son militares, siendo civiles todos los que no tengan esa consideración, según establece la redacción del artículo 52 del Protocolo Adicional.

En el caso de los objetos, aparte de los de uso puramente militar, en el caso del ciberespacio se puede constatar una notable presencia de objetos de doble uso, civil y militar. En el caso de las acciones cinéticas, la postura tradicional siempre ha sido que, existiendo un doble uso, la caracterización de objeto militar primará sobre la civil. Este será el caso de objetos físicos relacionados con el ciberespacio como servidores o redes de comunicaciones. Sin embargo, la doctrina no es pacífica al respecto, dado que, siendo tal la confusión entre ambos usos en un entorno tan difuso como es el cibernético, la caracterización tradicional vaciaría de contenido la protección a civiles; en especial pensando en el caso de las telecomunicaciones (recuérdese que Finlandia, por ejemplo, ha reconocido el derecho humano a Internet [7]). En este caso, las acciones deben ser valoradas en el sentido del *animus* del atacante, omitiendo en muchos casos el principio de la ventaja militar si el ataque va directo a dañar, por ejemplo, la economía del país, como podría tratarse en el caso de un ciberataque a la banca. En cualquier caso, debe regir siempre otro de los principios fundamentales del derecho internacional humanitario, el principio de proporcionalidad. Este principio, en la parte aplicable al objeto del presente estudio, está contenido en el artículo 51.5 b) del Protocolo Adicional I mediante el siguiente enunciado:

> «5. Se considerarán indiscriminados, entre otros, los siguientes tipos de ataque:
>
> […]
>
> b) los ataques, cuando sea de prever que causarán incidentalmente muertos y heridos entre la población civil, o daños a bienes de carácter civil, o ambas cosas, que serían excesivos en relación con la ventaja militar concreta y directa prevista».

En cuanto a qué individuos pueden ser atacados; en relación con este tema caben dos visiones desde diferentes ángulos. En primer lugar, qué individuos pueden ser objetos de ciberataques, grupo que está fuera de debate al tratarse del mismo colectivo que pueda ser objeto de un ataque cinético. En segundo lugar, se trata de exponer qué ciberatacantes pueden ser objeto de ataque, tanto cibernético como cinético en el marco de un conflicto. En este sentido, el profesor Schimitt expone, de forma clara y resumida dos colectivos de combatientes [4]:

- Ciberoperadores que son miembros regulares de un grupo armado que cumple los requisitos para ser considerado parte legítima según el derecho internacional humanitario, el cual conduce hostilidades cinéticas. En este caso, no existe consenso entre la doctrina para establecer si se debe hacer distinción entre ciberoperadores que también realizan actividades hostiles cinéticas y los que no.
- Individuos que, sin pertenecer a un grupo armado o perteneciendo, no desempeñan una función de combate continua. En este caso solo serán objetivos legítimos en el caso de que participen directamente en las hostilidades y solo durante los periodos de tiempo en que estén llevando a cabo dicha participación.

Por otro lado, la regla 28 del *Manual Tallin* acepta la posibilidad de la existencia de mercenarios implicados en las ciberoperaciones. Los mercenarios, según el Derecho Internacional Humanitario tienen, como principal diferencia con los combatientes, el no contar con los beneficios de tal estatuto en caso de caer prisioneros de guerra, al ser combatientes ilegítimos. El artículo 47 del Protocolo Adicional I expone seis requisitos para definir a un mercenario:

> «2. Se entiende por mercenario toda persona:
>
> a) que haya sido especialmente reclutada, localmente o en el extranjero, a fin de combatir en un conflicto armado;
>
> b) que, de hecho, tome parte directa en las hostilidades;
>
> c) que tome parte en las hostilidades animada esencialmente por el deseo de obtener un provecho personal y a la que se haga efectivamente la promesa, por una Parte en conflicto o en nombre de ella, de una retribución material considerablemente superior a la prometida o abonada a los combatientes de grado y funciones similares a las fuerzas armadas de esa Parte;
>
> d) que no sea nacional de una Parte en conflicto ni residente en un territorio controlado por una Parte en conflicto;
>
> e) que no sea miembro de las fuerzas armadas de una Parte en conflicto; y
>
> f) que no haya sido enviada en misión oficial como miembro de sus fuerzas armadas por un Estado que no es Parte en conflicto».

Estos caracteres son extrapolables al mercenario que participa en las ciberoperaciones. En todo caso, tanto para distinguir combatientes como mercenarios de civiles, es necesario llegar al consenso internacional que permita aplicar unos parámetros tan claros como los de las guerras cinéticas.

4. Conclusiones

De todo lo expuesto, se pueden sacar una serie de conclusiones con las que se pretende fomentar el debate e interiorización del derecho internacional humanitario para los combatientes del ámbito del ciberespacio.

En primer lugar, queda establecido que la ciberguerra y la ciberdefensa, en el ámbito del conflicto armado, ni actúan en vacío legal ni están exentos de seguir el derecho internacional humanitario. Por ello se hace necesario que los operadores que realizan las acciones en el medio cibernético sean conscientes de esta situación y conocedores de sus derechos y obligaciones.

En segundo lugar, ante las evidentes lagunas que tiene el conjunto del derecho internacional público en general y el derecho internacional humanitario en particular; en especial debido a la ausencia de fronteras, el anonimato de los operadores y la celeridad de las acciones; siempre será de aplicación el derecho internacional humanitario consuetudinario, en especial, el principio de distinción.

En tercer lugar, al igual que en los ataques cinéticos, los ciberataques deben tener objetivos militares solamente. El reflejo del principio de distinción en el derecho escrito prohíbe, no solo el atentado contra personas, sino también contra bienes e infraestructuras de uso civil; los cuales, en el marco del conflicto armado, deben ser respetados.

En cuarto lugar, de acuerdo con el mencionado principio de distinción, el operador de las ciberoperaciones debe tener la consciencia de que es un combatiente, con lo cual, debe de conocer y tener presentes los derechos y obligaciones derivadas de su estatuto legal. Esto no es aplicable al mercenario, tal y como está definido en el artículo 47 del Protocolo Adicional I a los Convenios de Ginebra.

Referencias

1. *Schmitt, M. N. (Ed.). Tallinn manual on the international law applicable to cyber warfare. Cambridge University Press. (2013).*
2. *United Nations. Group of Governmental Experts on Developments in the Field of Information and Telecommunications in the Context of International Security Sources and effects of ionizing radiation: sources (Vol. 1). United Nations Publications. (2013).*
3. *Comité Internacional de la Cruz Roja. El Derecho Internacional Humanitario y los desafíos de los conflictos armados contemporáneos. Inforrme de la XXXII Conferencia Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja (2015).*
4. *Rodríguez Villasante y Prieto, José, López Sánchez, J., Pérez González, M., & Centro de Estudios de Derecho Internacional Humanitario. Derecho Internacional Humanitario(3ª ed.). Valencia: Tirant lo Blanch. (2017).*
5. *López de Turiso y Sánchez La evaluación del conflicto hacia un nuevo scenario bélico. En El ciberespacio. Nuevo escenario de confrontación (pp. 117-166). Instituto Español de Estudios Estratégicos (2012).*
6. *Grispo MB. Derecho Internacional y seguridad cibernética (2017).*
7. *Sánchez J. Aspectos legales en el ciberespacio. La ciberguerra y el Derecho Internacional Humanitario. Análisis GESI. 2015(7):1.*
8. *Ambos, K. Responsabilidad penal internacional en el ciberespacio (Vol. 47). U. Externado de Colombia. (2015).*
9. *Schaap AJ, M.A.J.O.R. Cyber warfare operations: Development and use under International Law. The Air Force Law Review 2009; 64:121-173.*

Operación Sophia: ¿una lucha contra el tráfico ilícito de migrantes o una causa de casos SOLAS? Posibles soluciones

Rey Moral, Daniel[1,*]

[1] Asesoría Jurídica del Cuartel General de la Armada. c/ Montalbán n.º 2, Madrid. dreymor@oc.mde.es (DRM).

* Autor principal y responsable del trabajo; dreymor@oc.mde.es (DRM).

Resumen

Desde el nacimiento en el año 2015 de la operación EUNAVFOR MED Sophia para luchar contra las redes que trafican con migrantes desde Libia y hasta la actualidad, he tenido el privilegio de ser el único asesor jurídico español embarcado prestando servicio en ella.

Esta posición a bordo del buque «Cantabria» me ha permitido ser testigo de cómo la operación se halla paralizada en la búsqueda de sus objetivos, del cambio de estrategia de las redes mafiosas, y del aumento de los casos SOLAS (*Safety of life at sea*) en el área de operaciones como consecuencia de la presencia de los buques de la Unión Europea.

La intención del presente trabajo no es solo la de llamar la atención sobre el tráfico ilícito de migrantes como una amenaza para la seguridad; sino también el de exponer las controversias jurídicas que se plantean, las posibles soluciones que el derecho internacional nos ofrece, y cómo concurren diversos factores (políticos, geoestratégicos o jurídicos) que afectan a su aplicación, y por ende a lograr la efectividad de la seguridad marítima y de la seguridad nacional e internacional.

Palabras clave

Operación EUNAVFOR-MED Sophia, derecho internacional, migración, Libia, SOLAS.

1. Introducción

La operación EUNAVFOR MED Sophia comenzó en el año 2015 con el objetivo de luchar contra las redes que traficaban con migrantes desde Libia, aprovechándose de la crisis en la que se había sumido el país tras el derrocamiento del coronel Muammar el Gaddafi en el año 2011.

Durante estos tres años de operación, los barcos de la Unión Europea han participado en un mayor número de ocasiones en eventos SOLAS que en la detención de personas y medios implicados en el tráfico ilícito. Esto se debe en parte al cambio de estrategia de las mafias, pero también al estancamiento de la operación debido a la falta de consentimiento del Estado libio y a la ausencia de una resolución del Consejo de Seguridad de Naciones Unidas, que pudieran permitir avanzar en la conducción de la operación.

Si bien ambas opciones son complejas de lograr debido a la diversidad de facciones enfrentadas en el país africano, y/o por los recientes precedentes en el uso de las resoluciones de Naciones Unidas bajo la bandera del principio de responsabilidad de proteger, lo cierto es que, a través de otros mecanismos jurídico-políticos, existe aún esperanza en poner fin a esta barbarie humanitaria, que sin lugar a dudas afecta a la seguridad de los países europeos.

2. Desarrollo

Origen de la operación EUNAVFOR MED Sophia

Uno de los acontecimientos históricos más notables del año 2011, en lo que a sus consecuencias estratégicas se refiere, fue el derrocamiento del líder libio Muammar el Gaddafi. La debilidad política e institucional en la que quedó sumida Libia, incentivó la consolidación de organizaciones criminales en su territorio. Además, su proximidad geográfica a las costas europeas facilitó el desarrollo de redes de tráfico ilícito de migrantes procedentes de diversas regiones de África.

El empleo del Mediterráneo central meridional como ruta migratoria, la consolidación de las redes de traficantes, y el fallecimiento de miles de migrantes en su intento por llegar a Europa huyendo en algunos casos de la pobreza y de los conflictos armados, sirvieron de punto de inflexión para que la Unión Europea emitiese la Decisión (PESC) 2015/778, del Consejo de 18 de mayo de 2015, dando origen a la misión y al mandato de la operación de la Unión Europea en el Mediterráneo central Meridional (EUNAVFOR MED)[1]. A pesar de las múltiples modificaciones que dicha decisión ha ido sufriendo, la misión

1 *EU has never taken the issue of migration as seriously as we are doing now. With this operation, we are targeting the business model of those who benefit from the misery of migrants. But it is only a part of a broader strategy including the cooperation with our partners in Africa, particularly in the Sahel region, and the work with the International Organization for Migration and the UNHCR. As EU, we are determined to contribute to save lives, dismantle the networks of the smugglers of human beings and address the root causes of migration. The target, let me be very clear, are not the migrants, the targets are those who are making money on their lives and too often on their deaths. It is part of our efforts to save lives. (Statement by High Representative/Vice-President Federica Mogherini on the Council decision to launch the naval operation EUNAVFOR Med – 22 June 2015). European Council. Council of the European Union*. http://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2015/06/22/fac-naval-operation/

principal ha sido y es la de contribuir a «desarticular el modelo de negocio de las redes de tráfico ilícito y trata de personas en el Mediterráneo central meridional realizando esfuerzos sistemáticos para detectar, capturar y eliminar los buques y medios que utilizan o que se sospeche que utilizan los pasadores de fronteras o los tratantes de personas, de conformidad con el derecho internacional aplicable, incluidos la CNUDM y cualquier resolución del Consejo de Seguridad de Naciones Unidas».

Para lograrlo, se establecieron diferentes fases:

La 1.ª fase estaba orientada a la recopilación de información, y a patrullar en alta mar con el fin de detectar y seguir a las redes de migración.

La 2.ª fase permitía, solo en alta mar, el ejercicio del derecho de visita, registro, apresamiento y desvío de los buques sospechosos de ser utilizados para el tráfico ilícito o la trata de seres humanos, de acuerdo con el derecho internacional aplicable, incluidas la Convención de Naciones Unidas de Derecho del Mar de 1982 (CNUDM) en su artículo 110.1.d); y el Protocolo contra el tráfico ilícito de migrantes por mar del año 2000 (Protocolo) en sus artículos 8.1 y 8.7.

La 3.ª fase autorizaba el ejercicio de dichas acciones en mar territorial libio, previo consentimiento del Estado libio, o previa resolución del Consejo de Seguridad de Naciones Unidas (CSNU).

La 4.ª fase estaba destinada a adoptar en territorio libio las medidas necesarias contra buques y medios sospechosos de ser usados para el tráfico ilícito de migrantes, previa resolución del CSNU o con el consentimiento del Estado libio.

La fase actual del mandato y los eventos SOLAS provocados

Desde el 28 de septiembre de 2015, fecha en la se inició la 2.ª fase de la operación, los buques de guerra que la integraban comenzaron a actuar en alta mar, frente a las costas de Libia, tratando de dificultar las actividades de las organizaciones que traficaban con migrantes desde el país africano, quienes hasta el momento remolcaban las embarcaciones repletas de migrantes más allá de las doce millas marinas que delimitan el mar territorial libio.

Este cambio de escenario dio lugar, sin embargo, a consecuencias contraproducentes para el objetivo de la propia operación.

Las mafias, con el fin de conservar su negocio sin ser detenidos, alteraron su modo de operar. Así, dejaron de remolcar las embarcaciones de los migrantes hasta la alta mar, limitándose a hacerlo hasta las 12 millas marinas que integran el mar territorial libio, es decir, donde los buques de guerra de la operación Sophia no podían actuar, de acuerdo a la fase del mandato en el que se encontraban.

La limitación jurídica impuesta a las embarcaciones de la operación EUNAVFOR MED para penetrar en las 12 millas náuticas libias, unido a la ausencia de funcionalidad de la marina y de los guarda costa libios, hicieron estéril cualquier esfuerzo por poner fin o al menos limitar el negocio de los traficantes. Conocedores de la presencia de barcos de guerra europeos más allá del mar territorial libio, de la obligación que el derecho internacional exige a los capitanes de los buques de auxiliar a quienes se hallen en peligro en la mar (artículo 98 CNUDM y artículo 33 del capítulo V del Convenio SOLAS, *International Convention for the Safety of Life at Sea 1974*), y del principio de no devolución (*non-refoulement*) de personas a territorios en los que no se garanticen sus derechos humanos de acuerdo con el artículo 33 de la Convención de Naciones Unidas del Refugiado de 1951 y de su Protocolo de 1967; los traficantes dejaron de tomarse la molestia de remolcar y comenzaron a suministrar a las frágiles embarcaciones de migrantes cantidades insuficientes de combustible que apenas les permitían sobrepasar el mar territorial. Esto, unido al exceso de personas en su interior, provocaba el hundimiento de las embarcaciones y la declaración de eventos SOLAS.

De este modo, los buques de la operación que se encontraban frente a las costas libias se han estado viendo obligados a intervenir en los múltiples casos SOLAS y a trasladar a los migrantes a puertos europeos, provocando de esta forma un involuntario efecto llamada que sin duda beneficia a los traficantes.

Así, según fuentes oficiales de la Unión Europea, desde el nacimiento de la operación EUNAVFOR MED, hasta agosto de 2018, solamente ha sido posible arrestar y transferir a las autoridades italianas a

143 sospechosos de traficar con personas o inmigrantes, y neutralizar a 545 embarcaciones destinadas a dichos tráficos. Sin embargo, en ese mismo periodo de tiempo, y según las mismas fuentes, más de 375.000 personas han sido rescatadas en el mar entre las costas de Italia y Libia a través de miles de eventos SOLAS[2].

La formación de la Guardia Costera y Armada Libia

Actualmente, no es extraño que en un mismo evento SOLAS en zona SAR libia (*search and rescue*), puedan acudir y coincidir buques de los guarda costas libios, de organizaciones no gubernamentales, y de la propia operación Sophia, con el paradójico resultado de que los auxiliados por los primeros serían devueltos a Libia, por los segundos quedarían a la espera de encontrar un país que los acogiese, y por los terceros serían desembarcados en puertos italianos.

La razón esgrimida para no transferir a los migrantes auxiliados a uno de los buques libios, es el principio de no devolución (*non-refoulement*) de personas a territorios en los que no se garanticen sus derechos humanos,[3] y en esta misma línea los puertos libios no son considerados como «*place of safety*».

No obstante estas premisas, podrían ser discutidas a través de diversos argumentos:

En primer lugar, de acuerdo con la Convención de Naciones Unidas del Refugiado de 1951 y de su Protocolo de 1967, el principio de no devolución rige para los buscadores de asilo o los refugiados. No obstante, no todos los migrantes, ni tan siquiera la mayoría, ostentan tales condiciones.

Por otra parte, en condiciones normales, la guardia costera y la Armada libias serían los responsables de salvaguardar la vida humana en la mar en su zona SAR. La presencia con esa finalidad de otros buques no haría sino menoscabar las funciones de quienes están siendo formados en diversas materias, entre ellas el «derecho del mar» y los «derechos humanos».

En tercer lugar, el derecho internacional no ha definido el término *place of safety*. No obstante, lo que sí que ha previsto es el principio de soberanía territorial para que los Estados tengan la facultad de decidir el desembarco, o no, de las personas auxiliadas en la mar, bajo otros principios tan elementales como la necesidad de mantener la seguridad e integridad de su territorio y ciudadanos. Así, privar a Libia de la oportunidad de controlar sus fronteras con sus propios oficiales podría suponer una vulneración de sus zonas de responsabilidad, pues no hay que obviar que, de acuerdo con el *annex 5 de la Resolution MSC 155(78)* adoptada en mayo de 2004, la responsabilidad de proporcionar un lugar seguro recae sobre el Estado responsable de la zona SAR en la que los supervivientes han sido auxiliados[4].

Evolución de la operación: controversias jurídicas

Para que la operación evolucione a la 3.ª fase, permitiendo a sus buques intervenir en mar territorial de Libia, y generando así una mayor y más efectiva presión sobre las redes de traficantes, es necesario o un consentimiento del Estado, o una previa resolución del CSNU amparada en el artículo 39 de la Carta de Naciones Unidas. De lo contrario, cualquier acción de la UE en territorio libio podría considerarse una intromisión en su soberanía y territorio.

El consentimiento del Estado

Todo Estado declarado fallido podría ser objeto o prestarse a que una fuerza aliada actuase en su territorio en caso de amenaza para la paz o seguridad internacional (como permitió el Gobierno Nacional de Transición somalí en la operación Atalanta contra la piratería).

No obstante, Libia no tiene la consideración de Estado fallido. En su territorio concurren tres actores: el Gobierno de Acuerdo Nacional, que es la única entidad gubernamental reconocida internacionalmente, la Cámara de Representantes, y el Congreso General de la Nación. A pesar de que todos ellos rivalizan por el control y por el poder sobre todo el país, y principalmente sobre las zonas de influencia: Trípoli,

---

2 http://www.consilium.europa.eu/es/policies/migratory-pressures/sea-criminal-networks/
(Visto el 13/08/2018, a las 20:07 horas).

3 https://www.avvenire.it/attualita/pagine/migranti-ricorso-alla-corte-europea-di-17-nigeriani-italia-complice-della-libia-che-non-soccorre-e-imprigiona

4 https://www.navcen.uscg.gov/pdf/marcomms/imo/msc_resolutions/MSC155(78).pdf

Misratah, y Tobruk; lo cierto es que coinciden en haber expresado la necesidad de buscar una solución sin interferencias externas.

Este escenario se traduce en un país inestable incapaz de gestionar con eficacia las corrientes migratorias en tránsito, y a la vez reticente a la ayuda o colaboración externa.

No obstante, en el hipotético supuesto de que alguno de los actores accediese a la intervención de la comunidad internacional en su territorio, la intervención militar tendría una doble consecuencia. Por un lado, nacería carente de consenso político y territorial, y bajo la sombra de haber, posiblemente, vulnerado la soberanía e integridad territorial libios; y por otro lado generaría sin lugar a dudas una mayor controversia y escalada de la fuerza entre las diversas facciones que apoyan a los mencionados actores.

La Resolución del CSNU

A pesar de la incapacidad (o falta de voluntad) de Libia de controlar el tráfico ilícito desde sus costas, y del poder discrecional que ostenta el CSNU para decidir que se trata de una «amenaza a la paz», de acuerdo con el artículo 39 del capítulo VII de la Carta de Naciones Unidas, este organismo no se ha pronunciado, pudiendo hipotetizar sobre el porqué.

1.- La reinterpretación de las facultades del CSNU. Hasta la fecha, el CSNU se ha caracterizado por una sobreexplotación de sus intervenciones. Sin embargo, esta tendencia podría estar siendo objeto de revisión con el objeto de no influir o afectar aún más en Estados desestabilizados como el libio.

2.- El reciente precedente del uso del principio de responsabilidad de protección empleado por el CSNU (Resolución 1973 -2011) y encabezado por los Estados Unidos, Francia y Gran Bretaña. Invocando el capítulo VII de la Carta de Naciones Unidas so pretexto de dar respuesta al sistemático y desproporcionado uso de la fuerza por el régimen de Gaddafi contra la población civil que pretendía extender por Libia la llamada «Primavera Árabe»; tenía como real objetivo derrocar a un régimen que se había convertido de un incómodo aliado de los países occidentales.

3.- El uso, por parte de los Estados no occidentales del CSNU, del *lawfare*; o lo que es lo mismo, el empleo del derecho como herramienta destinada a fomentar amenazas híbridas. De este modo, estos Estados, evitando impulsar una resolución del CSNU, lograrían «golpear» a Europa en un aspecto tan relevante como es la seguridad y el control de sus fronteras.

3. Conclusiones

3.1. La presencia de los buques de guerra de la operación Sophia en alta mar, frente al mar territorial libio, desencadenó que las mafias dejasen de remolcar a las embarcaciones de migrantes hasta el alta mar, y comenzasen a lanzarlos desde tierra reduciendo así su exposición a ser detenidos.

De esta forma, si los buques están próximos a las costas de Libia, se prestarán a auxiliar en caso de eventos SOLAS y trasladar a los migrantes a los puertos europeos designados como puertos seguros de desembarco, lo que posiblemente daría pie a un incesante «efecto llamada» y consecuentemente a una continuidad de las actividades de las redes mafiosas.

Por el contrario, si los buques se alejan de las costas libias, tendrían una incidencia menor en el cumplimiento de la misión, pero serían testigos lejanos de constantes vidas perdidas en la mar.

3.2. La presencia en zona SAR libia de múltiples embarcaciones de distinta procedencia puede generar, en caso de eventos SOLAS y bajo el criterio de no devolución, mucha confusión, e incluso la dispersión de unidades familiares tras los rescates. La estabilización de las instituciones libias, y (como he podido comprobar al formar parte del claustro de formación de la Guardia Costera y Armada libias el pasado mes de julio), la instrucción de sus oficiales, podrían resultar la herramienta clave para luchar contra el tráfico ilícito de migrantes, y a la vez para el control migratorio procedente de Libia, del mismo modo que sucede en otros Estados del continente africano.

3.3. La ausencia de consentimiento del Estado libio, y la falta de resolución del CSNU para navegar en su mar territorial, serían el motivo principal por el que la operación habría quedado estancada en su fase 2.ª.

Por tanto, son escasas las opciones que el mandato ofrece para que la operación evolucione. La posibilidad de obtener un consentimiento por parte de un Estado no declarado fallido, pero a la vez dividido y enfrentado, parece remota. Pero tampoco parece fácil que el CSNU emita una resolución basada en la «amenaza para la paz y la seguridad», mientras no se produzcan cambios de estrategia o de percepción por parte de sus Estados miembros permanentes no occidentales.

4. Propuesta

Lo expuesto hasta ahora, así como las siguientes propuestas, son el resultado no solo de las reflexiones acumuladas, sino también de la experiencia vivida como asesor jurídico embarcado en la operación Sophia y como parte del claustro encargado de instruir y adiestrar a oficiales libios.

1) Con el fin de evitar estimular las corrientes migratorias a través del mar Mediterráneo, y de potenciar involuntariamente el negocio de las mafias, los buques de guerra de la operación Sophia deberían abandonar su patrulla por alta mar en las proximidades a las costas de Libia hasta que la operación no evolucione a su fase 3.ª.

2) A pesar de que uno de los objetivos de la misión es el de desarrollar las capacidades y la formación de la Guardia Costera y de la Armada libia para luchar contra el tráfico ilícito y la trata de personas; dado el extenso volumen de eventos SOLAS en la mar, y de que los traficantes actúan desde tierra, la formación de la Guardia Costera y Armada libias debería incidir más en desarrollar la vigilancia y la seguridad marítima, acentuar sus responsabilidades para su zona SAR (*Search and Rescue*), y protocolizar el tratamiento de las personas rescatadas, incluyendo el respeto por los derechos humanos.

3) Estas corrientes migratorias tienen un origen o principio y un destino o final, por lo que las medidas de actuación para su control deberían enfocarse en su lugar de origen. Impulsar la estabilidad en Libia, ya sea con acuerdos de colaboración o con recursos orientados a la lucha contra el tráfico ilícito de migrantes, facilitaría la creación de centros encargados de filtrar y gestionar el traslado lícito a Europa de verdaderos buscadores de asilo o de refugiados. Además, supondría una medida disuasoria tanto para quien es sabedor de su no condición, como para reducir la eficacia de la propaganda de las redes mafiosas.

4). Con la finalidad de avanzar en las fases de la misión, el empleo de medidas diplomáticas y no coactivas que permitan lograr una unidad política en Libia, el uso del propio *lawfare* hacía los Estados miembros permanentes no occidentales del CSNU, podrían provocar o bien un consentimiento del Estado, o bien una resolución que permita a los barcos de la UE entrar en aguas libias, e incluso desarrollar la operación en tierra, en pro de garantizar los objetivos de la misión.

Referencias

1. *Bo. M. Fighting Transnational Crimes at Sea under UNSC´s Mandate: Piracy, Human Trafficking and Migrant Smuggling. Ejiltalk. October 2015. Available from: http://www.ejiltalk.org/fighting-transnational-crimes-at-sea-under-unscs-mandate-piracy-human-trafficking-and-migrant-smuggling/*
2. *Cocchini. A. Tráfico ilícito de migrantes y operación Sophia: ¿Podría aplicarse de nuevo la responsabilidad de proteger en Libia?. Revista Electrónica de Estudios Internacionales. Junio 2018. Núm. 35. Available from: http://www.reei.org/index.php/revista/num35/articulos/trafico-ilicito-migrantes-operacion-sophia-podria-aplicarse-nuevo-responsabilidad-proteger-libia*
3. *Lehmann. J. The Use of Force Against People Smugglers: Conflicts with Refugee Law and Human Rights Law. Ejiltalk. June. 2015. Available from: https://www.ejiltalk.org/the-use-of-force-against-people-smugglers-conflicts-with-refugee-law-and-human-rights-law/*
4. *Menendez del Valle. E. Responsabilidad de proteger: la ONU en acción. Real Instituto Elcano. 2016. Documento de trabajo núm. 2: 34-37.*
5. *Passalacqua. V. The «Open Arms» case: Reconciling the notion of «place of safety» with the human rights of migrants. Ejiltalk. May. 2018. Available from: https://www.ejiltalk.org/the-open-arms-case-reconciling-the-notion-of-place-of-safety-with-the-human-rights-of-migrants/*

6. *Teitelbaum. M.S. The truth about the migrant crisis. Foreign Affairs. Septembre. 2015. Available from: https://www.foreignaffairs.com/articles/western-europe/2015-09-14/truth-about-migrant-crisis*
7. *https://www.avvenire.it/attualita/pagine/migranti-ricorso-alla-corte-europea-di-17-nigeriani-italia-complice-della-libia-che-non-soccorre-e-imprigiona*
8. *http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=s/res/1973%20(2011)*
9. *http://www.consilium.europa.eu/es/policies/migratory-pressures/sea-criminal-networks/*
10. *http://www.ceipaz.org/images/contenido/La%20responsabilidad%20de%20proteger_ESP.pdf*
11. *https://www.navcen.uscg.gov/pdf/marcomms/imo/msc_resolutions/MSC155(78).pdf*

Cartografía de biomasa residual en masas de *Pinus halepensis* Miller en el entorno del CENAD «San Gregorio» mediante datos LiDAR-PNOA y trabajo de campo

Domingo Ruiz, Darío[1-3,*], Montealegre Gracia, Antonio Luis[1-3], Lamelas Gracia, María Teresa[2-3], García-Martín, Alberto[2-3] y de la Riva Fernández, Juan[1-3]

[1] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España. ddomingo@unizar.es (D.D.); monteale@unizar.es (A.L.M.); delariva@unizar.es (J.d.l.R.).

[2] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090 Zaragoza, España. tlamelas@unizar.es (M.T.L.); algarcia@unizar.es (A.G-M.).

[3] Grupo GEOFOREST del Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España.

* Autor principal y responsable del trabajo; ddomigo@unizar.es (D.D.).

Resumen

El objetivo de este estudio es la estimación y cartografía de la biomasa residual forestal (BRF) en bosques de *Pinus halepensis* Miller localizados en el entorno del Centro de Adiestramiento CENAD «San Gregorio». Este trabajo hace uso de los datos LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aeroportado de baja densidad (0,5 puntos/m^2) capturados para el conjunto del territorio español en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), así como de las ecuaciones alométricas para calcular las fracciones de biomasa que componen la BRF. La metodología propuesta evalúa la regresión lineal múltiple, el árbol de regresión MDL y Support Vector Machine (SVM), con objeto de relacionar la BRF calculada en 45 parcelas de campo con un conjunto de variables independientes derivadas de las alturas de los retornos láser. Los modelos generados se han sometido a la técnica de validación cruzada dejando un dato fuera. El modelo SVM con *kernel* radial, que incluyó como variables independientes el percentil 40, la varianza y el porcentaje de primeros retornos sobre la altura media, presentó un error cuadrático medio de 2,73 t/ha. Los resultados ponen de manifiesto la utilidad de los datos públicos LiDAR-PNOA de baja densidad para cuantificar la BRF en masas de *Pinus halepensis*. Al mismo tiempo, se contribuye al uso de este producto sistemático y de libre acceso para ayudar en la gestión sostenible de los espacios forestales de los campos de maniobras.

Palabras clave

LiDAR, PNOA, biomasa residual forestal, regresión lineal, modelos no paramétricos, CENAD.

1. Introducción

Las fuentes de energías renovables juegan un papel esencial en la reducción de las emisiones de CO_2 a la atmósfera. Una de estas fuentes es la biomasa residual forestal (BRF), que refiere a las acículas, ramas, raberones e incluso árboles de pequeñas dimensiones procedentes de tratamientos silvícolas o de aprovechamientos madereros que no son convertibles en subproductos por la industria tradicional, pero que pueden utilizarse como biocombustible para aplicaciones térmicas (estufas y hornos), para generar electricidad y para cogeneración (Sebastián y Royo, 2005). En este sentido, el aprovechamiento de la BRF de los campos de maniobras adscritos al Ministerio de Defensa tendría como beneficios la reducción del consumo de energías no renovables y, además, la mitigación del riesgo de incendio forestal.

El primer paso para fomentar el uso de esta fuente de energía debe ser el conocimiento de la cantidad de recursos disponibles para determinar la viabilidad de los proyectos. De acuerdo con García-Martín (2012) y García-Martín *et al*. (2011; 2012), las técnicas de teledetección constituyen una herramienta óptima para la evaluación de la disponibilidad de recursos forestales como la biomasa y, concretamente, la BRF. Existen diversas experiencias de utilización de la teledetección óptica satelital para la cuantificación de dichos recursos, pero son menos numerosos los estudios que utilizan técnicas de teledetección activa como el radar (Austin *et al*., 2003) o el LiDAR aeroportado (Popescu, 2007), pese a que proporcionan, en especial esta última, información tridimensional precisa de la estructura vegetal. Los estudios que utilizan esta última tecnología han sido desarrollados fundamentalmente en bosques boreales caracterizados por una cobertura y altura homogéneas (por ejemplo, Hauglin *et al*., 2014), en bosques mixtos de Europa Central (Straub y Koch, 2011) y en bosques más complejos estructuralmente del sudeste de la Amazonía (Andersen *et al.*, 2014), utilizando en todos los casos nubes de puntos de alta densidad (7-25 puntos/m^2). Sin embargo, no encontramos estudios que hayan estimado la BRF con LiDAR de baja densidad y en ambientes estructuralmente heterogéneos como el caso de los bosques de *Pinus halepensis* Miller del entorno Mediterráneo.

El objetivo principal de este estudio es la estimación y cartografía de la BRF de los bosques de *Pinus halepensis* Miller del entorno del Centro de Adiestramiento CENAD «San Gregorio» utilizando datos LiDAR-PNOA de baja densidad y datos de campo. Como objetivo específico se plantea un análisis comparativo entre tres tipos de modelos de regresión: lineal múltiple (MRL), árbol de regresión MDL y *Support Vector Machine* (SVM) para determinar cuál es la metodología más apropiada para estimar la BRF.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el sector central de la depresión del Ebro, concretamente en el entorno del Centro de Adiestramiento (CENAD) «San Gregorio». Las masas monoespecíficas de *Pinus halepensis* Miller (en adelante pino carrasco) están adaptadas a unas condiciones mediterráneas semiáridas

y ocupan 8.266 ha. La mayor parte de ellas son masas naturalizadas, exceptuando las localizadas en el sudeste del CENAD, que datan de unos cuarenta años, aproximadamente (figura 1). El sotobosque de estos pinares está constituido por especies como *Quercus coccifera* L., *Juniperus oxycedrus* L., *Thymus vulgaris* L., y *Rosmarinus officinalis* L.

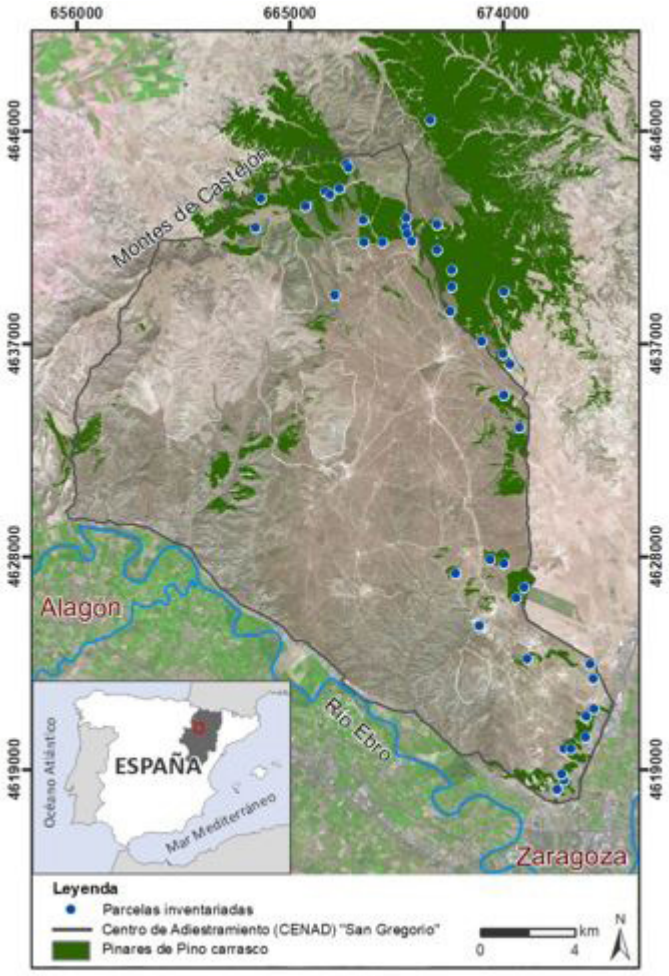


Figura 1. Área de estudio. Localización de las parcelas inventariadas en las masas de pino carrasco del entorno del CENAD.

2.2. Datos de campo

Los datos de campo se tomaron en 45 parcelas entre julio y septiembre de 2014 (figura 1). La localización de las parcelas precisó de la realización de un muestreo aleatorio estratificado con objeto de incluir la variabilidad de condiciones ambientales presentes en los pinares: fracción de cabida cubierta y pendiente topográfica (Montealegre *et al*., 2016).

La localización del centro de cada una de las parcelas circulares de 15 metros de radio se realizó mediante un GPS diferencial Leica VIVA® GS15 CS10 GNSS, obteniendo una precisión media en planimetría de 0,15 m. El diámetro a la altura del pecho (dap) de los fustes con un diámetro superior a 7,5 cm se midió a 1,3 m de altura utilizando una forcípula Mantax Precision Blue de Haglöf Sweden®. La altura de los árboles (h) se midió mediante un hipsómetro Vertex Haglöf Sweden®.

La BRF se calculó para cada pie de pino inventariado utilizando las ecuaciones alométricas para pino carrasco de Ruiz-Peinado *et al*. (2011) (ecuaciones 1 a 3).

$$W_{b7}(kg) = [3,926 \times (dbh - 27,5)] \times Z$$

Si dbh ≤ 27,5 cm entonces Z = 0;

Si dbh > 27,5 cm entonces Z = 1 (1)

$$W_{(b2-7)}(kg) = 4,257 + 0,00506 \times dbh^2 \times h - 0,0722 \times dbh \times h \quad (2)$$

$$W_{(b2+n)}(kg) = 6,197 + 0,00932 \times dbh^2 \times h - 0,0686 \times dbh \times h \quad (3)$$

donde W_{b7} es el peso de la biomasa de la fracción de ramas gruesas con un diámetro superior a 7 cm, $W_{(b2-7)}$ es el peso de la fracción de biomasa de las ramas medias con un diámetro entre 2 y 7 cm y $W_{(b2+n)}$ es el peso de la fracción de biomasa de las ramas finas con un diámetro inferior a 2 cm más las acículas (n).

Los valores de BRF calculados para cada árbol se sumaron posteriormente para obtener los valores totales por parcela expresados en tonvveladas de biomasa seca por hectárea.

2.3. Datos LiDAR

Los datos LiDAR fueron capturados durante los meses de enero y febrero del año 2011 con un sensor Leica ALS60. Los datos se enmarcan en proyecto PNOA (PNOA, 2018) y son distribuidos por el Centro Nacional de Información Geográfica en archivos de 2x2 km de extensión. El desfase temporal entre la campaña de trabajo de campo y el vuelo LiDAR no se ha considerado relevante, dado que no se han producido cambios significativos en la estructura forestal entre 2011 y 2014.

El procesamiento de los datos LiDAR se inició con la eliminación del ruido y el filtrado de los retornos utilizando el algoritmo de clasificación de curvatura multiescala desarrollado por Evans y Hudak (2007) de acuerdo con Montealegre *et al*. (2015a). Posteriormente se interpolaron los puntos correspondientes al suelo desnudo mediante el método *Point-TIN-Raster* para generar un modelo digital de elevaciones (MDE) con una resolución espacial de 1 m (Montealegre *et al*., 2015b). Los valores de elevación del MDE se utilizaron para normalizar las alturas de la nube de puntos, generando valores de elevación de los puntos sobre el nivel del suelo.

La nube de puntos se recortó y normalizó utilizando la geometría de las parcelas de campo y se generó un conjunto de estadísticas que comúnmente se utilizan como predictores en el modelado de variables forestales utilizando el *software* FUSION 3.30 (McGaughey, 2009). Es preciso mencionar que para el cálculo de estas variables se aplicó un umbral de 1 m sobre el suelo, eliminando así los retornos pertenecientes al sotobosque.

2.4. Estimación de la BRF

En el presente estudio se comparan tres métodos de regresión para la estimación de la BRF. El modelo paramétrico MRL es uno de los más utilizados para la estimación de parámetros forestales con datos LiDAR (Næsset and Økland, 2002). Primero se seleccionan las variables LiDAR que muestran una mayor correlación con la BRF mediante el cálculo de los coeficientes de correlación de Spearman y el análisis de su significación estadística. Posteriormente, dichas variables se incluyen en un proceso de selección por pasos hacia delante, seleccionando un máximo de tres variables representativas y verificando el cumplimiento de las hipótesis básicas de los modelos de regresión lineal (García *et al*., 2012). Además, se ha efectuado una transformación logarítmica de las mismas para comprobar si mejora el ajuste del modelo (Næsset, 2002). El método no paramétrico MDL es un árbol de regresión basado en reglas *If Then* que considera que las regularidades en un conjunto de datos pueden utilizarse para comprimir los datos utilizando un menor número de símbolos de un alfabeto finito explicando dicha realidad de forma fidedigna. Por su parte, el método SVM utiliza algoritmos de aprendizaje supervisados capaces de analizar y reconocer patrones, y considera que los datos son separables en el espacio mediante hiperplanos multidimensionales (Mountrakis *et al*., 2011). Con este método se generaron dos modelos SVM con distinto *kernel* (lineal y radial), calibrando los parámetros *cost* y *gamma* según el intervalo 1-1.000 y 0,01-1, respectivamente.

2.5. Validación y comparación entre modelos

La selección de un número máximo de tres variables LiDAR se realizó con objeto de evitar el sobreajuste de los modelos. Se generaron tres modelos distintos: i) modelos que incluían las mismas variables independientes seleccionadas en el modelo MRL; ii) modelos ajustados con las tres métricas que presentaban los mejores coeficientes de correlación de Spearman; y iii) modelos generados utilizando las dos métricas que presentaban los mejores coeficientes de correlación de Spearman con objeto de desarrollar un modelo más parsimonioso.

La capacidad predictiva de los modelos se evaluó mediante una validación cruzada dejando un dato fuera, ejecutando dicha validación 100 veces para el modelo SVM con objeto de reducir la aleatoriedad e incrementar la robustez. El ajuste y bondad de los modelos se estimó mediante el error cuadrático medio (RMSE), el porcentaje del RMSE con respecto a la media (% RMSE) y el promedio de los residuos (sesgo). Posteriormente, se aplicó el test no paramétrico de Friedman, para determinar si existían diferencias significativas entre los modelos (Stojanova *et al*., 2010), y el test *post-hoc* de Nemenyi, con objeto de definir si las diferencias existentes eran estadísticamente significativas con un nivel de significancia de 0,05.

3. Resultados y discusión

El grupo 1 de modelos generado incluye tres variables LiDAR que cumplían las hipótesis básicas de los modelos de regresión lineal: la curtosis (C), el rango intercuartílico de las alturas de los retornos (RI) y el porcentaje de todos los retornos sobre 1 m de altura (% todos ret. sobre 1 m). El grupo 2 incluye las tres variables que presentan los mejores coeficientes de correlación de Spearman sin considerar las hipótesis de los modelos de regresión lineal: el percentil 40 de la altura de los retornos (P40), la variancia (V) y el porcentaje de primeros retornos sobre la media (% primeros ret. sobre media). El grupo 3 incluye las mismas variables que el modelo del grupo 2 exceptuando la varianza. Cabe mencionar que el modelo MRL no fue generado para los grupos 2 y 3 dado que no cumplía las hipótesis básicas de los modelos de regresión lineal.

Como se observa en la tabla 1, el mejor modelo del grupo 1 fue el SVM con *kernel* radial (cost = 40 y gamma = 0,06), seguido del MRL, el SVM con *kernel* lineal (cost = 100 y gamma = 0,01) y el MDL. El modelo SVM con *kernel* radial también mostró mejores resultados que el MDL y el SVM con *kernel* lineal en los grupos 2 y 3. El mejor modelo de todos los grupos fue el SVM con *kernel* radial del grupo 2 (cost = 260 y gamma = 0,02). Los resultados del test de Friedman denotan que los modelos generados no son equivalentes con un p-valor de 0,042, aunque el test *post-hoc* de Nemenyi determinó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los modelos con un 95 % de probabilidad.

Tabla 1. Modelos de estimación de BRF y resultados de la validación de los mismos. Todos los valores están expresados en t/ha. $_{kr}$ refiere a kernel radial y $_{kl}$ refiere a kernel lineal

Grupo	*Variables independientes LiDAR*		*Ajuste*			*Validación (LOOCV)*		
		Modelo	*RMSE*	*%RMSE*	*Sesgo*	*RMSE*	*%RMSE*	*Sesgo*
1	C, RI, % todos ret. sobre 1 m	MRL	4,61	9,78	0,00	5,14	10,89	-0,01
		SVM_{kr}	3,21	6,81	0,49	4,60	9,75	0,56
		SVM_{kl}	4,80	10,18	0,92	5,39	11,43	0,85
		MDL	3,19	6,77	0,11	5,56	11,81	0,71
2	P40, V, % primeros ret. sobre media	SVM_{kr}	2,21	4,68	0,28	2,73	5,79	0,28
		SVM_{kl}	3,38	7,17	0,38	4,04	8,56	0,58
		MDL	3,20	6,81	-0,00	3,85	8,16	-0,01
3	P40, % primeros ret. sobre media	SVM_{kr}	2,76	5,85	0,54	3,11	6,60	0,50
		SVM_{kl}	3,61	7,66	0,67	3,88	8,24	0,46
		MDL	3,41	7,23	0,14	3,64	7,71	0,17

En cuanto a los valores obtenidos en la validación cruzada, los modelos SVM con *kernel* radial muestran siempre errores más bajos que el único modelo paramétricos ajustado, lo que coincide con lo señalado por García-Gutiérrez *et al*., 2015. Finalmente, el modelo con menor error en esta validación, el modelo SVM con *kernel* radial del grupo 2 (RMSE = 2,73 t/ha), fue el seleccionado para estimar la BRF para el conjunto del área de estudio (figura 2).

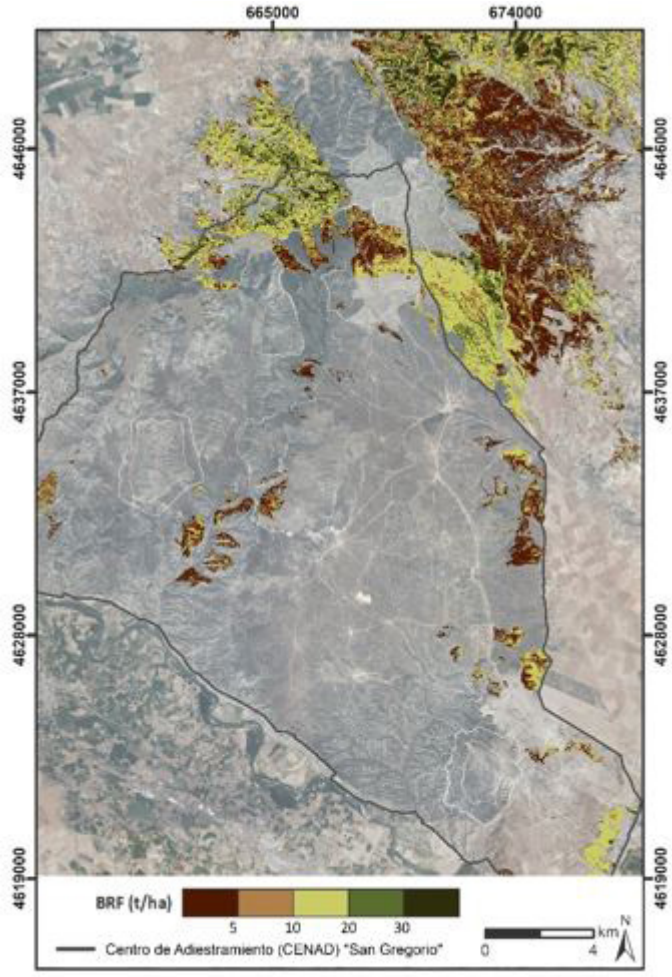


Figura 2. Cartografía de la BRF en el entorno del CENAD «San Gregorio».

4. Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado una metodología para estimar la BRF utilizando datos LiDAR-PNOA de baja densidad en masas forestales de pino carrasco. En ella, se han comparado tres grupos de modelos que incluyen diversas métricas LiDAR y la utilización de tres métodos de regresión. El modelo que presenta los mejores resultados para la estimación de BRF en el CENAD «San Gregorio» es el SVM con *kernel* radial que incluye tres variables LiDAR: el percentil 40 de la altura de los puntos LiDAR, la varianza y el porcentaje de primeros retornos sobre la media, presentando un RMSE de 2,73 t/ha y un sesgo de 0,28. El análisis comparativo entre los modelos ha determinado que no existen diferencias estadísticamente significativas.

De esta manera, la utilización de sensores de teledetección activa LiDAR de baja densidad se ha mostrado útil para obtener información relevante para mejorar la gestión forestal eficiente y sostenible en espacios forestales heterogéneos enmarcados en los campos de maniobras, ya que la extracción de la BRF

inventariada permite disminuir el riesgo de incendios forestales y la severidad de estos aprovechando un recurso energético renovable y local que, a su vez, tienen una implicación global en la reducción de emisiones de CO_2.

La generación de nuevos modelos para otros centros de adiestramiento españoles, caracterizados por disponer de amplias superficies forestales, y la estimación de la BRF para otras especies mediterráneas pueden ayudar a cuantificar mejor, y con menos esfuerzo, los recursos forestales existentes para su aprovechamiento. Asimismo, la utilización de imágenes procedentes de UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) puede tomarse en consideración para estudios de mayor detalle y el seguimiento de las masas forestales a una mayor resolución temporal, dado que las variables de cobertura del dosel forestal tienen gran importancia en los modelos generados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto de Investigación del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza (Proyecto N.º 2017-09) y el contrato predoctoral (FPU14/06250) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Los autores agradecen al CNIG por facilitar los datos LiDAR-PNOA, al CENAD «San Gregorio» por su apoyo en los trabajos de campo y al coronel de Caballería Dr. Francisco Escribano por su colaboración y dedicación durante el trabajo de campo.

Referencias

1. *Andersen HE, Reutebuch SE, McGaughey RJ, d'Oliveira MVN, Keller M. Monitoring selective logging in western amazonia with repeat lidar flights. Remote Sensing of Environment. 2014; 151, 157–165.*
2. *Austin JM, Mackey BG, Van Niel KP. Estimating forest biomass using satellite radar: an explanatory study in a temperature Australian Eucalyptus forest. Forest Ecology and Management. 2003; 176, 575-583.*
3. *Evans JS, Hudak AT. A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return LiDAR in Forested Environments. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2007; 45(4), 1029–38.*
4. *García D, Godino M, Mauro F. Lidar: Aplicación Práctica Al Inventario Forestal. Madrid: Editorial Académica Española; 2012.*
5. *García-Martín A, García Galindo D, Pascual J, de la Riva J, Pérez-Cabello F, Montorio R. Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y Teledetección. GeoFocus. 2011; 11, 19-50.*
6. *García-Martín A. Evaluación del potencial energético de los bosques de Teruel mediante teledetección y SIG. Zaragoza: Consejo Económico y Social de Aragón (CESA), 261 pp; 2012.*
7. *García-Martín A, de la Riva J, Pérez-Cabello F, Montorio R. Using remote sensing to estimate a renewable resource: forest residual biomass. En: Fatoyinbo, T. (Ed.): Remote Sensing of Biomass - Principles and Applications. Rijeka: InTech, 297-322; 2012.*
8. *García-Gutiérrez J, Martínez-Álvarez F, Troncoso A, Riquelme JC. A Comparison of Machine Learning Regression Techniques for LiDAR-Derived Estimation of Forest Variables. Neurocomputing. 2015; 167, 24–31.*
9. *Görgens EB, Montaghi A, Rodríguez LCE. A Performance Comparison of Machine Learning Methods to Estimate the Fast-Growing Forest Plantation Yield Based on Laser Scanning Metrics. Computers and Electronics in Agriculture. 2015; 116, 221–227.*
10. *Hauglin M, Gobakken T, Astrup R, Ene L, Næsset E. Estimating single-tree crown biomass of norway spruce by airborne laser scanning: A comparison of methods with and without the use of terrestrial laser scanning to obtain the ground reference data. Forests. 2014; 5(3), 384–403.*

11. *McGaughey R. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. USA: USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station; 2009.*
12. *Montealegre AL, Lamelas MT, de la Riva J, García-Martín A, Escribano F. Use of Low Point Density ALS Data to Estimate Stand-Level Structural Variables in Mediterranean Aleppo Pine Forest. Forestry. 2016; 89(4), 373–382.*
13. *Montealegre AL, Lamelas MT, de la Riva J. A Comparison of Open-Source LiDAR Filtering Algorithms in a Mediterranean Forest Environment. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015a; 8, 4072–4085.*
14. *Montealegre AL, Lamelas MT, de la Riva J. Interpolation Routines Assessment in ALS-Derived Digital Elevation Models for Forestry Applications. Remote Sensing. 2015b; 7, 8631–8654.*
15. *Mountrakis G, Im J, Ogole C. Support Vector Machines in Remote Sensing: A Review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.2011; 66(3), 247–59.*
16. *Næsset E. Predicting Forest Stand Characteristics with Airborne Scanning Laser Using a Practical Two-Stage Procedure and Field Data. Remote Sensing of Environment. 2002; 80(1), 88–99.*
17. *Næsset E, Økland T. Estimating Tree Height and Tree Crown Properties Using Airborne Scanning Laser in a Boreal Nature Reserve. Remote Sensing of Environment. 2002; 79(1), 105–115.*
18. *PNOA Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. http://pnoa.ign.es/presentacion 06/09/2018. Plan Nacional de Observación del Territorio.*
19. *Popescu SC. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. Biomass and Bioenergy. 2007; 31, 646–655.*
20. *Ruiz-Peinado R, del Rio M, Montero G. New Models for Estimating the Carbon Sink Capacity of Spanish Softwood Species. Forest Systems. 2011; 20(1), 176–188.*
21. *Sebastián F, Royo J. La biomasa como fuente de energías renovables. En: Mandado J, Martínez Cotanda S, Moreno M. (Eds.), Energía y medioambiente. II Seminario Problemática Medioambiental. Zaragoza: Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, 140 pp; 2005.*
22. *Stojanova D, Panče P, Gjorgjioski V, Kobler A, Džeroski, S. Estimating Vegetation Height and Canopy Cover from Remotely Sensed Data with Machine Learning. Ecological Informatics. 2010; 5(4): 256–266.*
23. *Straub C, Koch B. Enhancement of bioenergy estimations within forests using airborne laser scanning and multispectral line scanner data. Biomass and Bioenergy. 2011; 35(8), 3561–3574.*

7C. Psicología y humanidades

Estudio empírico de los estilos de pensamiento de los alumnos de la Academia General Militar

Trujillo Pacheco, F.[1,*], Aceña Medina, J.[2], Ruiz Lopez, C.[3], García-Guiu López, C.[4], Bolao Merlo, A.[5] y Barrios Aznar, G.[6]

1. Francisco José Trujillo Pacheco. Comandante. Licenciado en Psicología. Departamento de Ciencias Jurídicas y Sociales. Academia General Militar. Zaragoza.
2. Javier Aceña Medina. Teniente coronel. Doctor en Psicología. Profesor de Liderazgo. Centro Universitario de la Defensa (Zaragoza).
3. Carlos Ruiz López. Teniente coronel. Diplomado en Investigación Militar Operativa y en Estadística. Profesor de Logística. Centro Universitario de la Defensa (Zaragoza).
4. Carlos García-Guiu López. Teniente coronel. Doctor en Psicología. Departamento de Ciencias Jurídicas y Sociales. Academia General Militar. Zaragoza.
5. Amaya Bolao Merlo. Teniente de Sanidad. Licenciada en Psicología. Gabinete de Orientación Educativa. Academia General Militar. Zaragoza.
6. Germán Barrios Aznar. Capitán de Sanidad. Licenciado en Psicología. Gabinete de Orientación Educativa. Academia General Militar. Zaragoza.

* Autor principal y responsable del trabajo: Francisco José Trujillo Pacheco. Correo electrónico: ftrupac@et.mde.es

Resumen

Esta investigación se basa en la teoría del autogobierno mental de Sternberg en 1997. Su objetivo es realizar un análisis comparativo de los estilos de pensamiento que tienen los alumnos del Plan de estudios actual, iniciado en el año 2010 y adaptado al Plan Bolonia en la Academia General Militar, y continuar con la investigación realizada por Mandiá y Ruiz en el curso académico 2009-10 con alumnos del plan de estudios del año 1992. Para ello se han seleccionado a 326 alumnos de primer curso del plan actual y 171 del plan antiguo.

En la investigación está previsto efectuar un estudio de cohorte prospectivo longitudinal con los actuales caballeros y damas cadetes del curso académico 2017-18 y efectuar una comparación cuando sean oficiales egresados en sus respectivas especialidades, para poder determinar si los alumnos de la Academia General Militar modifican su estilo de pensamiento durante su estancia en la AGM durante 5 años y si presenta ventajas académicas tener un estilo de pensamiento concreto.

Palabras clave

Estilo de pensamiento, teoría del autogobierno mental, enseñanza militar.

1. Introducción

La Academia General Militar tiene como misión proporcionar a España los mejores oficiales, para ello los profesores deben buscar la excelencia en la formación de los alumnos con el fin de dar cumplimiento a este cometido. Además, esta premisa viene recogida en el decálogo del profesor de la AGM, donde se especifican las aptitudes, capacidades y cualidades que debe tener el personal docente pero, sobre todo, se establece como meta diaria la búsqueda de la excelencia.

El objetivo general del presente estudio es comprobar si se produce un cambio en el estilo de pensamiento de los cadetes que ingresaron con el plan de estudios de 2010, en el presente año escolar, con respecto a los alumnos que ingresaron con el plan de estudios de 1992.

Esta investigación es una continuación del estudio que Mandiá y Ruiz llevaron a cabo con alumnos del plan anterior, para la Enseñanza Militar de Formación de Grado Superior de los Cuerpos Generales de Oficiales y que tuvo lugar durante el curso académico 2009-2010. En este sentido, se analizará si existen diferencias entre la investigación del plan de estudios de 1992 y el plan de estudios actual de la Enseñanza Militar de Formación de Oficiales para la integración en el Cuerpo General del Ejercito de Tierra de 2010, en el cual los alumnos compaginan los estudios universitarios con los militares, de forma que los oficiales egresados obtienen el empleo de teniente del Cuerpo General y el grado en Ingeniería de la Organización Industrial de manera simultánea.

2. Estado de la cuestión. Marco teórico

Según la Real Academia de la Lengua Española, el término estilo tiene hasta trece significados. Sin embargo, los que más relación tienen con el concepto que vamos a manejar son: 1. Modo, manera, forma de comportamiento y, 2. Uso, práctica, costumbre, moda.

En 1937, Allport introdujo el término estilo de manera oficial en psicología partiendo de la teoría de Jung. Con este término hacía referencia a distintos tipos de personalidad y conducta. En la actualidad, el término estilo hace referencia a una serie de patrones o modos de hacer las cosas que son relativamente estables y consistentes en el tiempo. Por lo tanto, el término estilo psicológico se aplica a diversos ámbitos entre los que se encuentran los estilos cognitivos o de pensamiento. Así pues, el estilo reúne una serie de patrones habituales o modos preferidos de hacer las cosas –percibir, pensar, aprender, enseñar– que son relativamente estables en el tiempo.

Por otra parte, la teoría más conocida de Robert J. Sternberg es la teoría triárquica de la inteligencia humana, que aboga por un enfoque de carácter cognitivo en contra del enfoque psicométrico imperante. No obstante, Sternberg es también precursor de la «teoría del autogobierno mental» publicada en 1997 y que pretende relacionar el estilo de aprendizaje con los estilos de pensamientos de los individuos.

En la sociedad actual se concede mucha importancia al cociente intelectual como predictor del rendimiento académico y laboral. Sin embargo, Sternberg propone que los test aptitudinales, las notas y el rendimiento escolar pueden no correlacionar con las capacidades reales de éxito profesional.

Sternberg [1] definió que, «un estilo es una manera característica de pensar. No se refiere a una aptitud, sino a cómo utilizamos las aptitudes que tenemos. No tenemos un estilo, sino un perfil de estilos. Las personas pueden ser prácticamente idénticas en cuanto a sus aptitudes y aun así tener estilos muy distintos».

Diferentes estudios realizados en los distintos niveles educativos apoyan la importancia que tiene conocer el estilo de pensamiento del alumnado para poder adecuar las enseñanzas a los estilos de pensamiento. De esta forma se obtendrá una mayor eficacia en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

González *et al*. [2] estudiaron la posible relación existente entre los estilos de pensamiento del profesorado, del alumnado de secundaria y del rendimiento académico sin encontrar resultados concluyentes y sugiriendo nuevos estudios en esta línea. Igualmente se observó que el tipo de estilo intelectual participa notablemente en la definición de una orientación a la meta, lo cual es necesario para definir qué tipo de estrategia se seguirá a la hora de trabajar metodología de enseñanza-aprendizaje.

Ya en el marco de la enseñanza universitaria civil existen varios estudios al respecto. Mogollón y Garrido (3) realizaron un estudio comparativo entre los estilos de pensamiento del alumnado de la Universidad Pública de Navarra y de la Universidad de Pamplona. En este estudio se obtuvieron resultados relevantes en cuanto a la correlación entre la carrera y el estilo de pensamiento, pero no se hallaron diferencias significativas entre los estilos de pensamiento del alumnado de ambas universidades. En esta misma línea, González, Castro y González (4) identificaron la correspondencia entre estilos de pensamiento y diferentes carreras universitarias.

Más adelante, Allueva *et al*. (5) llevaron a cabo un estudio comparativo entre los alumnos de primer curso, alumnos egresados y profesores del curso 2008-2009 de la Universidad de Zaragoza. El objetivo era determinar los estilos de pensamiento predominantes de los grupos que fueron objeto de estudio por medio del análisis de su relación con las distintas áreas de conocimiento y sexo. Estos autores encontraron diferencias significativas en los perfiles de los estilos de pensamiento de los participantes.

También destaca la investigación de Bernardo *et al.,* [6]. Estos autores analizaron los perfiles predominantes de estilo de pensamiento de los alumnos de quince titulaciones de la Universidad de Oviedo con el fin de comprobar el ajuste de estos a las nuevas exigencias del espacio europeo de educación superior (EEES).

En lo que respecta al ámbito militar también se han realizado algunas investigaciones al respecto. Tal es el caso de Castro y Casullo [7] que analizaron los predictores del rendimiento académico y militar de cadetes argentinos. En las conclusiones de dicho estudio, los autores afirman que los predictores principales de los logros académicos en el primer año son: la competencia para el razonamiento abstracto, un estilo de personalidad dominante y las estrategias de afrontamiento focalizadas en la resolución de problemas. Mientras que, los alumnos próximos a graduarse, se muestran más dominantes, asertivos y ambiciosos, con menos redes de apoyo social, mayores relaciones con amigos íntimos y son más globales en la forma de procesar la información.

El único trabajo llevado a cabo por investigadores españoles en el ámbito militar es el realizado por Mandiá y Ruíz (8) en el que se estudió la influencia de la enseñanza superior militar en los estilos de pensamiento de sus alumnos. Los resultados obtenidos mostraron diferencias significativas entre los estilos de pensamiento de los cadetes de primer curso con respecto de los cadetes de segundo y tercer curso; mientras que, los cadetes de segundo y tercer curso no presentaron diferencias entre sí. Dichos resultados indican que se produce un cambio en los estilos de pensamiento de los cadetes de primer curso hacia el estilo legislativo tras un año de formación militar, aumentando esta tendencia en los cursos siguientes. Los resultados muestran independencia entre las calificaciones académicas y el estilo de pensamiento, si bien sugieren que los cadetes con el estilo legislativo obtienen mejores calificaciones académicas. Además, el estilo legislativo se manifiesta como el estilo predominante en los alumnos y en los profesores de la AGM.

A principios de la década de los noventa, Sternberg enunció su «Teoría del autogobierno mental», según la cual las personas eligen el estilo de pensamiento con el que se sienten más cómodas en función de las

situaciones y siendo sensibles a la socialización. Por lo tanto, este estilo es susceptible de ser modificado por el ambiente o por la organización donde se actúe. Según esto, Sternberg describió hasta trece estilos de pensamiento teniendo en cuenta diversos aspectos de funcionamiento a nivel individual tales como: las funciones, las formas, los niveles, el ámbito y, por último, las inclinaciones.

De esta forma, Sternberg cree que las personas elegirán una combinación de estos estilos con la que se encuentren más cómodas. Así pues, considera que las personas son flexibles en el empleo de los mismos, dependiendo del éxito del estilo utilizado en el pasado y de la situación concreta. Esto significa que las personas tienen un perfil de estilos concreto que suelen utilizar pero que es susceptible de variar a lo largo del tiempo y según el contexto.

Al mismo tiempo que se presentó la «Teoría del autogobierno mental» se crearon una serie de cuestionarios para evaluar los estilos de pensamiento y aplicarlos tanto en contextos académicos como no académicos. El primer instrumento, *Thinking Styles Questionnaire for Students* (TSQS), también denominado *Thinking Styles Inventory* (TSI), ofrece una validez sobre la estructura de trece estilos de pensamiento identificados en las cinco dimensiones propuestas. Más tarde surgieron otras investigaciones más operativas que explican la estructura de los estilos de pensamiento iniciales agrupándolos en tres principales. Así pues, para el presente estudio, se toma como referencia la investigación realizada en España por González-Pienda *et al*. [9], donde se considera que los estilos de pensamiento tienen una estructura factorial de segundo orden con tres estilos de pensamiento básicos: I) predominantemente liberal, legislativo, global e interno, II) predominantemente externo y judicial, III) predominantemente conservador, ejecutivo y local.

3. Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es conocer si los alumnos, en el momento de ingresar en la Academia General Militar, tienen un estilo de pensamiento predominante y compararlo con datos obtenidos en la investigación de Mandiá y Ruiz. No obstante, este estudio es mucho más ambicioso ya que forma parte de una investigación más amplia que pretende realizar un estudio longitudinal con los alumnos del curso académico 2017-2018 y terminarlo cuando sean oficiales egresados en sus respectivas especialidades. De esta forma, el fin último de la investigación es comprobar cuál es el estilo de pensamiento predominante en los alumnos de la General y ver si este estilo se mantiene en el tiempo o si, por el contrario, sufre variaciones a lo largo de los años de permanencia en la AGM.

Objetivos específicos

1. Determinar si existen diferencias entre los alumnos del plan de estudios de 1992 y el plan de estudios actual de 2010, respecto a los estilos de pensamiento según Sternberg en su nivel función al ingresar en la Academia General Militar.
2. Identificar el estilo de pensamiento predominante de los alumnos de la AGM del plan de estudios de 2010 a través del cuestionario TSI de Sternberg-Wagner.
3. Estudiar en el futuro si algún estilo de pensamiento proporciona ventajas académicas durante los 5 años que dura la carrera en la AGM.
4. Conocer en un futuro, si modifican su estilo de pensamiento a lo largo del periodo de su formación académica en el centro docente militar.

4. Hipótesis

Tras la revisión de la bibliografía, se han encontrado resultados que consideran que hay indicios para formular la siguiente hipótesis aplicada a los estilos de pensamiento de los alumnos de la Academia General Militar:

«Existen diferencias entre los estilos de pensamiento de los alumnos del plan de estudios 2010 del curso 2017-18 con respecto a los alumnos del plan de estudios 1992 en el curso académico 2009-10».

5. Resultados y discusión

Aunque hay estudios en ambientes militares de estilos de pensamiento y en culturas empresariales y académicas, era necesario continuar con la investigación comenzada por Mandiá y Ruiz en 2010 para poder comprobar si los alumnos del plan de estudios actual, han modificado su estilo de pensamiento con respecto a los alumnos del plan de estudios de 1992.

Como se puede observar en la tabla 1, el estilo de pensamiento dominante en los alumnos del plan antiguo es el ejecutivo (47,7 %), mientras que en el plan actual predominan los cadetes con estilo de pensamiento legislativo (59,5 %). Se va analizar si esas diferencias son significativas y cómo podrían evolucionar a lo largo del tiempo mientras permanezcan los alumnos en la AGM. Esta tabla también muestra la desviación con respecto a la media del porcentaje esperado de los estilos de pensamiento de cada muestra. Por ejemplo con respecto al estilo de pensamiento legislativo en el plan antiguo se ha obtenido un 43,3 %, mientras que en el plan actual un 59,5 %. El porcentaje esperado de la situación ideal de la muestra hubiera sido un 53,9%.

		Plan antiguo	Plan moderno	Total
Estilo de pensamiento	Legislativo	43,3 %	59,5 %	53,9 %
	Ejecutivo	47,4 %	31,6 %	37,0 %
	Judicial	9,4 %	8,9 %	9,1 %
Total		100,0 %	100,0 %	100,0 %

Tabla 1. Porcentaje de la muestra. Elaboración propia

Según la tabla 2, la prueba de la chi-cuadrado para tablas de contingencia nos muestra la relación de los estilos de pensamiento con las dos muestras de alumnos. Obtenemos como resultado un valor del estadístico de contraste de 13.046 (p valor 0,001) que indica que hay relación entre las variables. Es decir, existe una dependencia entre los planes de estudios y los estilos de pensamiento.

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	13.046	2	,001
Razón de verosimilitudes	12.979	2	,002
Asociación lineal por lineal	7.282	1	,007
N de casos válidos	497		

Tabla 2. Prueba chi-cuadrado de Pearson. Elaboración propia

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que sí hay cambios en los estilos de pensamiento predominantes en los alumnos del plan de estudios actual con respecto al plan antiguo. Los alumnos del plan del 2010 muestran un estilo de pensamiento legislativo mayoritariamente, mientras que los alumnos del plan de 1992 tienen un estilo de pensamiento ejecutivo predominante.

6. Conclusiones

La línea de investigación de los estilos de pensamiento de los alumnos de la Academia General Militar representa una vía prometedora de estudio, ya que existen pocas investigaciones en el ámbito militar en contexto nacional. Se ha tenido la suerte de poder realizar esta investigación y poder seguirla en años venideros, gracias a la colaboración desinteresada de los cadetes de la General.

Con respecto al primer objetivo, los resultados sugieren que los cadetes del plan de estudios de 2010 ingresan en la Academia General Militar con un estilo de pensamiento predominantemente legislativo que suelen preferir estrategias cognitivas, suelen ser autónomos y organizados y les gusta imponer sus propias normas. Mientras que los alumnos del plan de estudios de 1992 y del curso escolar 2009-10

ingresaban con estilo de pensamiento ejecutivo, que suelen ser sujetos que realizan los trabajos con unas guías y reglas claras y prefieren que se les planifique el trabajo y que se les indique cómo deben hacerlo.

Existen diferencias entre los estilos de pensamiento legislativo y ejecutivo con respecto a los planes de estudios. Los datos estadísticos muestran que se han encontrado diferencias significativas. Los alumnos del plan de estudios actual ingresan en la Academia General Militar con un estilo predominante legislativo, mientras que en el plan antiguo ingresaban con estilo de pensamiento ejecutivo. Puede ser debido a la modificación del proceso de ingreso en la General. Actualmente ingresan con segundo curso de bachillerato, habiendo superado la prueba de acceso a la universidad (PAU) y un concurso-oposición, actualmente la gran mayoría ingresan la primera vez que lo intentan. Los alumnos del plan de estudios anterior debían superar una fase muy dura concurso-oposición que constaba dos años de media, lo que hacía que ya fueran adquiriendo comportamientos parecidos al alumno de la AGM. Hay que continuar con esta investigación, para comprobar si los alumnos del plan de estudios actual siguen manteniendo el estilo de pensamiento legislativo o si cambiarán al ejecutivo.

Además esta muestra empleaba de media dos años de oposición que implicaba un proceso de socialización que sin ser militares se anticipan con similares comportamientos, creencias y actitudes.

El segundo objetivo es definir cuál es el estilo de pensamiento predominante de la muestra del plan de estudios actual. Existen 194 (59,5 %) alumnos que utilizan un estilo de pensamiento legislativo, 103 (31,65 %) cadetes que prefieren el estilo de pensamiento ejecutivo, mientras que 29 (8,9 %) alumnos que utilizan es estilo judicial. Se observan que las diferencias son significativas en el estilo de pensamiento legislativo, hay más alumnos del plan del 2010. También se encuentran diferencias significativas en estilo de pensamiento ejecutivo donde hay más alumnos del plan de 1992.

En cuanto al tercer y cuarto objetivo, están planteados para describirlos en el futuro, ya que hacen referencia a comprobar si hay un estilo de pensamiento que proporcione ventajas académicas y si los alumnos modifican su estilo de pensamiento a lo largo de la carrera.

Para finalizar queríamos decir que esta investigación está vigente y sigue realizándose con los alumnos que el año próximo estarán en segundo curso. Tiene una clara intención de averiguar cómo influyen los estilos de pensamiento en el rendimiento académico de nuestra muestra y compararlo con el estudio realizado de Mandiá y Ruiz en 2010.

Referencias

1. *Sternberg, R. Estilos de pensamiento. Claves para identificar nuestro modo de pensar y enriquecer nuestra capacidad de reflexión. Barcelona: Ediciones Paidos Iberica, S.A. 1999.*
2. *González-Pienda, J.A., Núñez, J.C., Álvarez,L., González-Pumariega, S., Roces, C., González, P., Rosario, P. y Almeida, L. Estructura del «TSI Thinking Styles Inventory» en adolescentes. Un análisis comparativo entre estudiantes españoles y portugueses. I Congreso Hispano-Portugués de Psicología, Santiago de Compostela. 2000.*
3. *Mogollón, O. y Garrido, E. Estilos de pensamiento de los estudiantes de la universidad Pública de Navarra y de la Universidad de Pamplona. Revista de la Facultad de Ciencias Humanas y Sociales. 2004. 11, 87-121.*
4. *González, G., Castro, A. y González, F. Perfiles aptitudinales, estilos de pensamiento y rendimiento académico. Anuario de investigaciones v.15 Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 2008.*
5. *Allueva, P., Herrero, M. L. y Franco, J.A. Estilo de pensamiento del alumnado y profesorado universitario. Implicaciones educativas. Revista electrónica interuniversitaria de formación del profesorado. 2010. 13(4), 227-240.*
6. *Bernardo, A., Fernández, E., Cerezo, R., Rodríguez, C. y Bernardo, I. Perfiles de estilos de pensamiento en estudiantes universitarios: implicaciones para el ajuste al espacio europeo de educación superior. Revista Iberoamericana de Psicología y Salud. 2011. 2(2), 145-164.*

7. *Castro, A. y Casullo, M. Predictores del rendimiento académico y militar de cadetes argentinos. Anales de Psicología. 2002. 18(2), 247-259.*
8. *Mandiá, P. y Ruiz, C. Influencia de la enseñanza superior militar en los estilos de pensamiento de sus alumnos. Líderes al servicio de la sociedad: liderazgo en entornos internacionales. Madrid. 2003, pp. 17-36.*
9. *González-Pienda, J., Núñez, J., González-Pumariega, S., Roces, C., González, P., Bernardo, A., Valle, A., Cabanach, R., Rodríguez S. y Sales, P. Estilos de pensamiento: análisis de su validez estructural a través de las respuestas de adolescentes al Thinking Styles Inventory. Psicothema 2004. Vol. 16, n.º 1 pp. 139-148.*

La psicología al servicio del Estado

Muñoz-Marrón, Daniel[1,*] y Ariza Lázaro, Víctor Manuel[2]

1 Capitán Daniel Muñoz Marrón, 43 Grupo de Fuerzas Aéreas (Ejército del Aire), Base aérea de Torrejón, Autovía A2 km 24; 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid), danmun01@ucm.es, dmunma1@ea.mde.es

2 Capitán Víctor Manuel Ariza Lázaro, 43 Grupo de Fuerzas Aéreas (Ejército del Aire), Base aérea de Torrejón, A2 Km 24; 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid), nordlingen1634@hotmail.com, varilaz@ea.mde.es

Email: *Muñoz-Marrón, Daniel; dmunma1@ea.mde.es (DMM).

Resumen

La ciencia psicológica ha contribuido al desarrollo de numerosos campos científicos y ámbitos de la vida económica y social. Ya desde los albores de la I Guerra Mundial, las Fuerzas Armadas, no han sido ajenas a la aplicación de estos avances. El estudio de los factores humanos ha estado presente en ámbitos tan dispares como la selección de personal, la adecuación a puestos específicos, la optimización del trabajo en equipo, el control del estrés, la gestión de recursos de las tripulaciones, etc. Estos y muchos otros, son aspectos ampliamente trabajados desde la psicología en su interés por apoyar a nuestros ejércitos.

La defensa nacional es un campo en que esta influencia no se ha prodigado en exceso. La psicología puede y debe colaborar, en la medida que sus conocimientos lo permiten, aprovechando su enorme desarrollo en beneficio y defensa del Estado de derecho, en lo que podría definirse como *psicología de Estado*.

El presente artículo introduce el concepto de *psicología de Estado*, que incluiría aquellas aportaciones realizadas desde la psicología para la planificación de respuestas del Estado frente a ataques a sus intereses. La intervención frente a eventos tales como actos hostiles de otras naciones, atentados terroristas o secuestros de ciudadanos, entre otros, puede beneficiarse de la aplicación de conceptos y procedimientos con una fuerte y contrastada base científica procedentes de la psicología.

Los autores, basándose en hechos pasados, ponen de manifiesto las consecuencias asociadas a ciertas actuaciones por parte del Estado y su repercusión posterior para la defensa nacional. La aplicación y utilización de procedimientos de intervención basados en el estudio del comportamiento humano, puede facilitar la toma de decisiones, y ayudar a una correcta planificación de la acción del Estado frente a situaciones como las descritas, contribuyendo de este modo en la potenciación de la defensa nacional.

Palabras clave

Defensa nacional, psicología aplicada, psicología de Estado, psicología del aprendizaje, secuestro, terrorismo.

1. Introducción

Las Fuerzas Armadas (FAS) desempeñan un papel fundamental en la defensa de los intereses de España y sus ciudadanos [1]. La naturaleza cada vez más variable de los riesgos y amenazas hace que los escenarios en que se hace necesario defender dichos intereses sean enormemente diversos. A pesar de la gran variedad de escenarios, y centrándonos en aquellas amenazas que provienen de la acción de individuos aislados o grupos terroristas, las acciones que pueden suponer una amenaza para los intereses de la nación se rigen por unos patrones de actuación claramente definidos y que pueden ser delimitados y analizados para ser contrarrestados con éxito mediante los instrumentos de poder del Estado.

Una profunda comprensión de las consecuencias que a medio y largo plazo conllevan las diferentes decisiones políticas sobre la utilización de dichas herramientas (ya sea esta una actuación de las FAS o de los Cuerpos de Seguridad del Estado, o una actuación diplomática o de otra índole) posibilitará el abordaje y resolución de situaciones de crisis con la mayor eficiencia y eficacia posible.

El gran avance producido en la psicología durante la última parte del siglo pasado y comienzos de este, ha provocado que las bases teóricas de esta disciplina científica hayan favorecido el desarrollo de otros ámbitos del conocimiento. Uno de los campos a los que la ciencia psicológica ha aportado su granito de arena ha sido y sigue siendo el de las FAS. La evolución del entorno de retos y vulnerabilidades a los que las FAS españolas tienen que hacer frente en el imparable panorama global de seguridad y defensa, hace que sea absolutamente necesario contar con las capacidades necesarias para abordar con éxito todo tipo de situaciones de crisis. Es en este punto donde la psicología puede y debe aparecer, poniendo a disposición del Estado los conocimientos sobre el comportamiento humano y sus patrones de respuesta-aprendizaje.

2. Las bases del aprendizaje humano

El aprendizaje no verbal de los humanos está basado en tres procesos de la denominada psicología del aprendizaje que comprenden las principales formas en que los humanos aprendemos. Estas son: [1] aprendizaje por condicionamiento clásico; [2] aprendizaje por condicionamiento operante; y [3] aprendizaje vicario. A continuación se realiza una breve explicación de cada uno de ellos.

2.1. Aprendizaje por condicionamiento clásico

Es el proceso de aprendizaje descrito por el científico ruso Pavlov [2,3] y puesto a prueba mediante la realización de un experimento en el que se utilizaba a un perro al que se le presentaba comida por primera vez. El animal inicialmente salivaba cuando la comida llegaba a su boca, pero cuando el perro era expuesto a varios de estos ensayos, comenzaba a salivar antes de tener contacto directo con la comida [2]. Pavlov demostró cómo otro estímulo a priori neutro, como podía ser el sonido de un timbre, podía ser asociado al estímulo incondicionado inicial (la comida) adquiriendo la capacidad de producir por sí mismo la respuesta de salivación sin que se produjese la presentación de la comida, convirtiéndose de este modo en estímulo condicionado [3].

2.2. Aprendizaje por condicionamiento operante

Procedente de la vertiente psicológica conocida como conductismo [4], el aprendizaje instrumental o aprendizaje por condicionamiento operante es aquella adquisición de comportamientos basada fundamentalmente en los refuerzos que recibe la persona que desarrolla una conducta. O lo que es igual, en las consecuencias positivas o negativas que tiene para una persona la ejecución de una conducta concreta. Esta importante teoría psicológica postula que si la realización de una conducta es reforzada (utilizando términos conductistas) mediante la aparición (inmediatamente después de llevarla a cabo) de un aspecto positivo, dicha conducta tenderá a repetirse en el futuro. Si por el contrario, la ejecución de un comportamiento va seguida de un resultado negativo, esto es, la aplicación de un castigo, dicho comportamiento tenderá a desaparecer del repertorio del sujeto. De este modo los conductistas definieron dos procesos básicos para conseguir que una conducta tienda a aumentar su ejecución futura y otros dos para lograr su desvanecimiento o desaparición progresiva. Así, tenemos como métodos para *aumentar* la probabilidad de aparición de una conducta dada:

1. Reforzamiento positivo: proceso mediante el cual *se aplica* un refuerzo (algo bueno) de forma contingente a la ejecución de una conducta dada.
2. Reforzamiento negativo: proceso mediante el cual *se retira* un castigo (algo malo) que estaba asociado de forma contingente a la ejecución de una conducta dada.
3. Por el contrario, si nuestra intención es la de *disminuir* la probabilidad de aparición de una conducta concreta, utilizaremos:
4. Castigo positivo: proceso mediante el cual *se aplica* un castigo (algo malo) de forma contingente a la ejecución de una conducta dada.
5. Castigo negativo: proceso mediante el cual *se retira* un refuerzo (algo bueno) que estaba asociado de forma contingente a la ejecución de una conducta dada.

2.3. Aprendizaje vicario

También conocido en el ámbito psicológico como aprendizaje por observación o imitación de modelos, se basa fundamentalmente en cómo la persona aprende a realizar una conducta mediante la observación de su ejecución en otros. La teoría del aprendizaje social [5] se fundamenta en la dificultad que existe para que el aprendizaje se produzca utilizando exclusivamente una metodología de ensayo-error. El profesor canadiense Albert Bandura defiende que se puede aprender observando las acciones de los demás. Bandura denomina a este tipo de aprendizaje, aprendizaje observacional y teorizó que existen cuatro procesos inmersos en el mismo: [1] atención; [2] retención o almacenamiento de información; [3] reproducción, esto es, ejecución y repetición del comportamiento observado; y [4] motivación, ya que las acciones se debilitarán a menos que las consecuencias de realizarlas sean percibidas por el sujeto como favorables para provocar dicha repetición [6,7].

La explicación aquí presentada sobre los procesos de aprendizaje no verbal en humanos pretende ser una primera aproximación a dichos conceptos, cuyo análisis pormenorizado incluye una gran cantidad de variables que los hacen mucho más complejos. Sin embargo, los autores consideran que esta primera definición resulta suficiente para fundamentar las actuaciones en materia de defensa que posteriormente se proponen y que se basarán, en este caso, en el aprendizaje por condicionamiento operante y en el aprendizaje vicario, que por sus características resultan más adecuados para introducir este tipo de conceptos psicológicos en el ámbito de la defensa y explicar cómo reducir de forma preventiva a medio y largo plazo acciones en contra de los intereses del Estado, como pueden ser secuestros o ataques terroristas. El abordaje de dichos temas basándose en el aprendizaje por condicionamiento clásico, así como una profundización en los aspectos aquí planteados para los otros dos tipos de aprendizaje descritos anteriormente, será fruto de trabajos posteriores y constituye una puerta abierta a la investigación futura.

3. La repetición y la fuerza del modelo como principios fundamentales en la adquisición de conductas

La adquisición del aprendizaje a partir de los conceptos descritos en el apartado anterior, es modelada por la actuación de diferentes variables que, pueden aumentar enormemente la complejidad de los mismos. Sin embargo, y a pesar de no estar dentro del ámbito del presente trabajo la descripción de todas ellas, existen dos variables que afectan en gran medida a este tipo de aprendizajes y cuya influencia debe ser aquí analizada: la repetición y la fuerza del modelo.

3.1. Repetición

¿Qué entendemos en este ámbito por repetición? En el aprendizaje por condicionamiento operante es necesaria la repetición de la secuencia acción-refuerzo[1] o acción-castigo para que se produzca la adquisición o eliminación de la acción realizada. En el caso del aprendizaje por observación, la repetición de la reproducción de la conducta que quiere adquirirse resulta fundamental como parte de la secuencia de dicho aprendizaje. También, y a pesar de que los postulados iniciales de Bandura defendían que el aprendizaje se produce en el observador aunque no aparezca el reforzador contingentemente a la realización de la conducta por parte del modelo, la interiorización de un comportamiento conductual dentro del repertorio propio estará influenciada por las consecuencias positivas o negativas que el sujeto observa cuando una conducta es llevada a cabo por otra persona, es decir, por la «rentabilidad» que en apariencia proporciona dicha conducta para quien la ejecuta, y por supuesto por la repetición de dichas consecuencias.

De este modo, y siguiendo los postulados del condicionamiento operante, si una acción como puede ser el secuestro de personas proporciona unos beneficios positivos para una persona u organización (aparición del refuerzo o retiro del castigo), ya sean estos económicos, en forma de pago de rescates (por citar un caso concreto, es lo que ocurrió con el boom de la piratería somalí de comienzos de los años 2000, que pasó de los 50 secuestros de media del bienio 2005-2007 a los más de 300 de 2011 [8], políticos (cesión de independencia de territorios, acercamiento de presos o condonación de penas, como la liberación, por parte del Gobierno de Israel de 16 prisioneros políticos para solventar el secuestro del vuelo 426 de El-Al por parte del Frente Popular para la Liberación de Palestina después de cinco semanas de negociación con los pasajeros retenidos [9]), de publicidad o patrocinio de una organización delictiva, o de cualquier otro carácter, la probabilidad de aparición de dicha conducta en el futuro aumenta. Este es el caso de los secuestros realizados por terroristas a ciudadanos del grupo de países denominados «concesionarios» [10], es decir, aquellos más proclives a negociar una solución pactada. Durante el periodo 2001-2013 este grupo de países vio incrementado el secuestro de sus nacionales entre un 64 % y un 87 % [10].

De igual modo, si una acción de este tipo va seguida de la aparición de un castigo (ya sea positivo o negativo), como por ejemplo las múltiples ocasiones en que una operación militar ha desbaratado secuestros (Operación Nimrod en 1980, [11]) y/o eliminado células y líderes terroristas (Operación Neptune Spear en 2011, [12]), y la aparición de este castigo se produce un determinado número de veces (esto es, de forma repetida), asociada contingentemente a la realización de la conducta delictiva o criminal, su ejecución tenderá a desaparecer, ya que el mensaje que envía a estos grupos y organizaciones es absolutamente claro, directo e inequívoco.

3.2. Fuerza del modelo

Por otra parte, en base a la teoría del aprendizaje social, respecto a la fuerza que presenta un modelo para el observador, parece lógico que cuanto más representativo sea el modelo para el observador, mayor

1 Se entiende por refuerzo aquel elemento cuya aparición tras la ejecución de una conducta dada provoca el aumento futuro de dicha conducta. Se entiende por castigo aquel elemento cuya aparición tras la ejecución de una conducta dada provoca el descenso futuro de dicha conducta.

fuerza presentará la conducta observada y consecuentemente más fácil y rápida será su introducción en el repertorio del observador. Si un potencial terrorista islamista se siente fuertemente identificado con un individuo que comete un atentado con unas características concretas, la posibilidad de que realice una acción similar aumentará. Tenemos un claro ejemplo en los atentados llevados a cabo mediante atropellos masivos por parte de células y seguidores del DAESH que van imitando a sus predecesores, especialmente desde el atentado del paseo de los Ingleses en Niza en 2016 y del que, entre muchos otros, el acaecido en la Ramblas de Barcelona en 2017 estaba claramente inspirado [13]. Una acción que es llevada a cabo por un sujeto u organización que ejerce como fuerte modelo para el observador y con el que este último desarrolla una fuerte identificación, seguirá un proceso de generalización para sujetos u organizaciones de similares características que ejercen como observadores, y por ello, su frecuencia de aparición tenderá a aumentar.

A la fuerza del modelo hay que añadirle las consecuencias positivas o negativas que la realización de dicha conducta presenta para quien ejecuta la conducta y que modelará la variable *fuerza del modelo* añadiendo la variable *refuerzo*. De este modo, cualquier sujeto u organización tratará de reproducir una conducta u otra similar no exclusivamente por la fuerza que tiene para él el modelo que ejecuta la conducta, sino también por alcanzar beneficios similares a aquellos que ha observado en el modelo. Así, por ejemplo, la llamada masacre de Munich de 1972, llevó a la creación de un cuerpo de operaciones especiales contraterrorista de la policía alemana, el GSG9, que, tras la brillante intervención en la Operación Feuerzauber de 1977 [14], antítesis de la actuación anterior en Munich cuando no existía dicha unidad, llevaría a la creación de nuevos grupos similares en otros países, caso del Grupo Especial de Operaciones (GEO) español [15] o a la inclusión o el refuerzo de las capacidades contraterroristas en otras unidades militares similares ya creadas, como el Special Air Service (SAS) británico [16].

4. Psicología de Estado

La aparición de la psicología aplicada se produjo como respuesta a las demandas del enorme cambio social y tecnológico producido en las últimas décadas del siglo XIX y comienzos del siglo XX [17], y los campos que ha abordado desde entonces han sido tan diversos como prolíficos. Las dos guerras mundiales hicieron que la psicología se introdujera de lleno en el ámbito de las Fuerzas Armadas [18] ámbito en el cual su desarrollo ha sido, desde entonces, enorme, abordando un amplio espectro de cuestiones. Actualmente, y superada, con creces, la etapa inicial en la que la ciencia psicológica dentro de las FAS se dedicó, de forma prioritaria, a la selección de los mejores candidatos y su adaptación al desarrollo de puestos concretos, nos encontramos en la actualidad con una psicología que, sin abandonar esas primeras tareas, se concentra en favorecer el desarrollo de misiones complejas en equipos de trabajo especializados.

Sin embargo, existen campos dentro de lo que es la psicología en el ámbito militar poco desarrollados hasta el día de hoy. Uno de estos aspectos en el que la ciencia psicológica debe poco a poco introducirse, es el del asesoramiento al mando para el desarrollo de doctrina al más alto nivel. La psicología puede y debe contribuir al asesoramiento, fundamentalmente a nivel estratégico, mediante la aportación del conocimiento científico existente sobre el comportamiento humano, y cómo este funciona en situaciones de crisis muy concretas.

Dentro de este complejo conglomerado es donde queremos situar el concepto de nueva creación que hemos denominado psicología de Estado. Este concepto debe definirse como la rama de la psicología aplicada dedicada a asesorar a las más altas esferas de dirección del Estado sobre las consecuencias, basadas en las teorías del comportamiento humano, que producirá a medio y largo plazo la toma de una decisión concreta de cara a la resolución de una situación de crisis acaecida.

La dirección política cuenta con las FAS como una de las herramienta, junto con otras como puede ser la diplomacia, para la resolución exitosa de situaciones de crisis. La psicología de Estado debe introducirse en este ámbito, proporcionando sus conocimientos para la compleja misión de asesoramiento a nivel político y militar, mediante la creación de guías de acción coherentes que posibiliten la creación

de estándares de actuación a largo plazo, poco vulnerables a los devenires políticos. No se pretende otra cosa que proporcionar un asesoramiento, con fuerte base científica, al mando militar y político sobre las consecuencias, basadas en las teorías anteriormente expuestas, que a medio y largo plazo tendrá para la Defensa Nacional una decisión política concreta frente a una situación concreta de amenaza.

5. Conclusiones

De lo expuesto en apartados anteriores pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. La psicología representa una herramienta de importancia fundamental en el asesoramiento para la creación de una cultura nacional de defensa.
2. Para que esta cultura nacional de defensa sea exitosa debe ser planificada a medio y fundamentalmente largo plazo, huyendo de posiciones políticas concretas y partidistas basadas en el éxito electoral de unas siglas políticas concretas, definiendo como objetivo prioritario la defensa de los intereses del ciudadano y de la nación.
3. El mantenimiento de posiciones de acción duraderas en el tiempo basadas en teorías psicológicas con fuerte base científica provocará resultados positivos para los intereses nacionales, si bien es cierto que estos no serán cortoplacistas y que sus resultados serán apreciables a medio y largo plazo.
4. El término psicología de Estado es acuñado para hacer referencia a la utilización de los conocimientos científicos de la ciencia psicológica sobre el comportamiento humano como herramientas para la defensa del Estado de derecho frente a situaciones de amenaza recurrentes.
5. La utilización de esta rama de la psicología aplicada contribuirá fundamentalmente a alcanzar el primero de los objetivos estratégicos militares para las FAS españolas: «disuadir a las posibles amenazas contra los intereses nacionales y la seguridad y bienestar de nuestros ciudadanos, y evitar su escalada» [1], en el objetivo por que el empleo de la mínima fuerza proporcione al Estado el mayor beneficio posible.

Referencias

1. *Ministerio de Defensa. Concepto de Empleo de las Fuerzas Armadas 2017. Madrid, España; 2018.*
2. *Gutierrez G. Ivan Petrovich Pavlov (1849-1936). Rev Latinoam Psicol [Internet]. 1999;31(3):557-60. Disponible en: http://www.redalyc.org/pdf/805/80531311.pdf*
3. *Pavlov IP. Conditioned reflexes: an investigation of the physiological activity of the cerebral cortex. Oxford Univ Press. 1927;1-430.*
4. *Watson JB. Psychology as the behaviorist views it. Psychol Rev. 1913;20:158-77.*
5. *Bandura A. Social Learning Theory. New York, NY: General Learning Press; 1971.*
6. *Bandura A. Social foundations of thought and action: a social cognitive theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall; 1986.*
7. *Yi MY, Davis FD. Developing and validating an observational learning model of computer software training and skill acquisition. Inf Syst Res. 2003;14(2):146-69.*
8. *Ibáñez F, Esteban MÁ. Analisis de los Ataques Piratas Somalíes en el Océano Índico (2005- 2011): Evolución y Modus Operandi. Rev del Inst Español Estud Estratégicos. 2013;1:1-28.*
9. *Dunstan S. Israel´s Lightning Strike: The Raid on Entebbe, 1976. Oxford, UK: Osprey Publishing; 2009.*
10. *Brandt PT, George J, Sandler T. Why concessions should not be made to terrorist kidnappers. Eur J Polit Econ [Internet]. 2016;44:41-52. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpoleco.2016.05.004*

11. *Fremont-Barnes G, Winner P. Who Dares Wins, the SAS and the Iranian Embassy Siege 1980. Oxford, UK: Osprey Publishing; 2009.*
12. *Panzeri Jr. PF. Killing Bin Laden, Operation Neptune Spear 2011. Oxford, UK: Osprey Publishing; 2014.*
13. *G4S. Vehicular Terrorism. The Threat Behind the Wheel [Internet]. Corporate Risk Services. 2017 [citado 10 de julio de 2018]. Disponible en: http://www.g4s.us/en/learn-more/g4s-knowledge-center/whitepapers/vehicular-terrorism-the-threat-behind-the-wheel*
14. *McNab C. Storming Flight 181, GSG9 and the Mogadishu hijack 1977. Oxford, UK: Osprey Publishing; 2011.*
15. *Ministerio del Interior. Página oficial de la DGP-G.E.O [Internet]. 2018 [citado 1 de agosto de 2018]. Disponible en: https://www.policia.es/org_central/dao/geo/presentacion.html*
16. *Thompson L. SAS Great Britain´s Elite Special Air Service. Minneapolis, MN: MBI Publishing Company; 1994.*
17. Sáiz, M. y Sáiz D. El inicio de la psicología aplicada a la aviación: desde el principio del siglo XX a la década de los años treinta. Rev Hist Psicol. 2012;33(4):7-36.
18. *Muñoz-Marrón D. Human Factors in Aviation: CRM (Crew Resource Management). Papeles del Psicólogo [Internet]. Disponible en: https://doi.org/10.23923/pap.psicol2018.2870*

Empleo del sistema de análisis de validez en la evaluación (Meta-protocolo SAVE) en el proceso de obtención de HUMINT en inteligencia militar

García-Rodrigo Vivanco, José Manuel[1,*]; Domínguez Muñoz, Antonio[2,4]; García Collantes, Ángel[3]; López Pérez, Rafael[4]; Pery Pardo de Donlebún, Lucía[1]

1. CIFAS (MINISDEF) (1).
2. UMEVI de Málaga. INSS (Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social) (2).
3. Universidad a Distancia de Madrid (3).
4. Fundación Universitaria Behavior&Law (4).

* Autor principal y responsable del trabajo;

Cte. psicólogo José Manuel García-Rodrigo Vivanco, jmvivanco@et.mde.es, JMGRV.

Resumen

Con una base científica interdisciplinar, el sistema de análisis de validez en la evaluación (Meta-protocolo SAVE) está diseñado para incorporar una amplia gama de métodos y técnicas. La fórmula propuesta es: $X = (V_1 + V_2 + V_3)\ V_{0,}$ siendo la X aquello por descubrir; verosimilitud (V_1), el análisis del contenido verbal; veracidad (V_2) la relativa a la congruencia entre lo verbal y lo no verbal, y la verificación (V_3) como el proceso de comprobación de la información obtenida. La valoración (V_0), es el proceso de calibración conteniendo el análisis de variables personales y psicológicas.

El Centro de Inteligencia de las Fuerzas Armadas (CIFAS) como «órgano responsable de facilitar al ministro de Defensa, la inteligencia militar precisa para alertar sobre situaciones de interés militar, procedentes del exterior», dentro de sus funciones de obtención de información cuenta con la de inteligencia humana (HUMINT). El proceso de incorporación de los operadores HUMINT consta de diversas fases, empleando la entrevista como instrumento de idoneidad. También en las labores de obtención, una de las herramientas es la entrevista que desarrollan con diversa tipología de fuentes.

Es de enorme importancia contar con un instrumento de evaluación de entrevistas que analice su validez para dar mayor fiabilidad a la información que HUMINT incorpora al ciclo de inteligencia y por otro de cara al proceso de selección del operador.

Palabras clave

Obtención de información, fuentes humanas, operador HUMINT, análisis de validez, metaprotocolo, entrevista de investigación.

1. Introducción

1.1. La evaluación en psicología

Dicho proceso abarca numerosas áreas de aplicación, que van desde la escolar (medida de los resultados de aprendizaje), la referida a casos clínicos, o la asociada a los procesos de recursos humanos (RR.HH.), en concreto la selección de personal.

Los procedimientos de evaluación del desempeño son tan antiguos como la relación laboral de dependencia y los mismos han venido siendo actualizados progresivamente [1]. La evaluación en RR.HH. ha sido considerada de manera tradicional en relación a la atribución de salario (rendimiento laboral), pero el concepto ha variado y en la actualidad se aplica en muchos niveles de gerencia empresarial, con una clara tendencia hacia la mejora en el desempeño competencial y así, la evaluación trata de una apreciación sistemática del desempeño de cada persona en el cargo o del potencial de desarrollo futuro; toda evaluación es un proceso para estimular o juzgar el valor, la excelencia, las cualidades de alguna persona [2].

Es importante para los profesionales recibir retroalimentación de su trabajo para la mejora del mismo [3]. La aplicación del metaprotocolo SAVE permite además de proporcionar información al operador HUMINT, la retroalimentación a la persona evaluada.

1.2. La evaluación del desempeño. Las competencias

La evaluación del desempeño se debe concebir como un proceso o conjunto de procesos que buscan establecer un conocimiento compartido acerca de lo que se debe conseguir y de cómo se va a conseguir que incremente las posibilidades de que se pueda lograr [4]. No cabe duda de que, en muchas organizaciones, incluidas las dos de inteligencia en España (CNI y CIFAS), los procesos de selección se desarrollan con metodología de *assessment center*, cuyo objetivo principal es la evaluación del desempaño a través de un sistema de competencias.

Aunque hay una diversidad de criterios acerca del origen del término *competencia*, procedería de los estudios del psicólogo David McCelland en 1973 [5], que lo introduce en sustitución de los procedimientos que hasta el momento se basaban en la evaluación por inteligencia, y con herramientas como la entrevista, tests aptitudinales, y en menor medida, encuestas, grafología, dinámicas de grupo, etc. Para otros, el origen procede de la filosofía griega ya que encontramos cómo los temas esenciales son abordados por los filósofos griegos desde problemas contextualizados, y en este sentido, no son ocurrencias al azar [6].

1.3. El Centro de Inteligencia en las FAS

El CIFAS, es el responsable de facilitar al ministro de Defensa, a través del jefe de Estado Mayor de la Defensa, y a las autoridades militares, la inteligencia militar precisa para alertar sobre situaciones inter-

nacionales susceptibles de generar crisis que afecten a la defensa nacional, así como de prestar el apoyo necesario, en su ámbito, a las operaciones.

Perteneciente a su Estado Mayor, en octubre de 2014, se crea el Gabinete de Psicología, como único órgano del mismo competente en materia de psicología dentro del CIFAS, y encargado de los procesos de selección y formación de personal, en su vertiente psicológica. Recibe apoyo del Servicio de Psicología de las FAS (equipo psicólogos colaboradores, EPC), y establece colaboraciones con la universidad e instituciones, como es el caso de la Fundación Behavior and Law.

1.4. La inteligencia HUMINT

Según recoge la *Doctrina conjunta de Inteligencia*, HUMINT *is defined as 'a category of Intelligence derived from information provided by, or collected on, human sources and individuals of Intelligence interest, as well as the systematic and controlled exploitation, by interaction with, or surveillance of, those sources or individuals* [7]. En el *Glosario de Inteligencia*, es el tipo de inteligencia que se elabora a partir de información recogida o suministrada directamente por personas, las cuales pueden ser espías, infiltrados y agentes dobles; informadores o contactos como periodistas, académicos, empresarios…(8).

Los procesos de obtención de información que llevan a cabo los operadores HUMINT son complejos y comprometidos por su naturaleza personal y por el tipo de información que recogen, por lo que es necesario un proceso de selección riguroso y una formación pluridisciplinar.

1.5. La entrevista y la entrevista en HUMINT

La enorme importancia que tiene la obtención por HUMINT es citada por Sun Tzu cuando establece que una buena práctica en inteligencia acortaría el conflicto, ahorrando vidas. La herramienta más usual para el operador HUMINT es la entrevista, aunque se han incorporado el análisis de imágenes y técnicas semejantes que, a posteriori, ayudan a la evaluación de la misma. Del gran número de definiciones existentes, se extractan en que la entrevista profesional es una conversación especializada, con un objetivo predefinido.

En la tabla siguiente se recoge las partes de la entrevista HUMINT, según estudio del Gabinete de Psicología del CIFAS:

1.- PREPARACIÓN A PLAZO:		
1.1. Análisis del objetivo.	1.4. Estudios de apoyo y petición de información.	1.6. Comparación posibilidad.
1.2. Selección de la fuente.	1.5. Cobertura.	1.7. Entrevista.
1.3. Selección de los agentes.		
2.- ESTUDIOS PREVIOS:		
2.1. Estudio del escenario.	2.4. Establecimiento del contacto.	2.7. Ensayos.
2.2. Estudio de la fuente.	2.5. Esquema de la entrevista.	
2.3. Preparación del material, equipo y personal.	2.6. Medidas de seguridad.	
3.- EJECUCIÓN:		
3.1. Desplazamiento al lugar.	3.5. Clima de confianza.	3.7. Resumen.
3.2. Reconocimiento del lugar.	3.6. Tratamiento de los temas objetivos. Control del encuentro.	3.8. Finalización del encuentro y despedida.
3.3. Espera.		
3.4. Acogida.		
4.- INFORME.		

Tabla 2. *Partes de la entrevista HUMINT.*

La información obtenida es trasmitida a los analistas, por lo que la evaluación de la información recogida es fundamental para saber el grado de fiabilidad (estabilidad en el tiempo) y validez (verdadera o falsa) de la misma.

1.6. El metaprotocolo SAVE: sistema de análisis de validez en la evaluación

La validez en SAVE es entendida en su sentido de firmeza, consistencia en relación con la realidad y, en su caso, valor legal. Sería útil para la evaluación de la consistencia en diversos campos, además

de HUMINT; desde la credibilidad de declaraciones criminológico-penales (testificales, entrevistas de investigación…) hasta el fraude en sus diversos entornos, pasando por la simulación en el ámbito médico-legal, etc. [9].

Su aplicación se podría iniciar al detectar, de manera intuitiva mediante el pensamiento rápido de [10], una desviación, un elemento de sospecha de fraude o engaño, lo que solemos llamar el paradigma patrón/anomalía. Es compatible con otras aplicaciones de análisis conductual [11] y permite combinar ordenadamente diferentes protocolos para una evaluación múltiple.

En sus cuatro fases se estudian de manera específica las diversas manifestaciones de la conducta humana; el análisis del contenido verbal del discurso se incluye en el apartado de verosimilitud o coherencia interna, llamado V_1, el análisis del contenido verbal. El análisis de los indicadores presentes en el comportamiento no verbal y su relación con los verbales, hacer referencia a la veracidad o congruencia (V_2). Estas dos fases, V_1 y V_2 –íntimamente relacionadas– corresponden al dominio de la entrevista, en sus diversos tipos.

La tercera fase o V_3, en íntima relación con la inteligencia con el concepto de prueba en derecho, es la verificación, correspondencia o contexto, y se refiere a la búsqueda de elementos externos a la entrevista con los que confirmar o falsar lo declarado previamente. Incorpora elementos objetivos (grabaciones, otras pruebas, etc.) y subjetivos (testimonios, etc.) y, en general, los diversos medios de acceso a la información. Por último y aunque de aplicación transversal durante todo el proceso –de ahí que se le llame V_0– estaría la valoración o calibración del sujeto de interés, habitualmente mediante el perfilado indirecto para conocer sus principales rasgos de personalidad y adaptar nuestras acciones en concordancia, para optimizar los resultados del análisis. Las fases V_3 y V_0 conformarían el dominio de la investigación. Todo ello se podría representar mediante una fórmula simple:

$$\mathbf{X = (V_1 + V_2 + V_3)\ V_0}$$

Siendo la X el elemento a validar. En cada una de estas fases pueden usarse una o varias herramientas, previamente validadas, tanto para comprobar credibilidad del testimonio en V_1, como para estudiar la congruencia verbal-no verbal en V_2, comprobar con los distintos medios de prueba en V_3 o usar los diversos modelos de perfilado de personalidad en V_0, que permite ir de lo sencillo, como el modelo PEN de Eysenck [12] a lo complejo, como el ENCUIST [13].

Sus posibilidades son muy amplias, es flexible y siempre cabe simplificar su aplicación en función de nuestras circunstancias y las del caso. Está previsto y en HUMINT es claramente recomendable, aplicar las fases en un orden diferente al numérico, por ejemplo, usando V_3 como primera actuación del SAVE, revisando la información contextual disponible para obtener referencias previas sobre los asuntos acerca de los que después, en la entrevista, obtendremos una declaración (V_1) junto con su CNV asociado (V_2).

2. Desarrollo

2.1. El proceso de selección de los operadores HUMINT en el CIFAS.

El Gabinete de Psicología del CIFAS desarrolla desde septiembre del 2016 procesos de incorporación de candidatos a su Unidad HUMINT. En la figura quedan reflejadas sus etapas:

Figura 1. Descripción del proceso de incorporación.

Se ha definido para el operador HUMINT un perfil basado en 7 competencias, asociadas tanto a cualidades personales como de trabajo en equipo, con 7 niveles cada una de ellas. En colaboración con un grupo de expertos HUMINT, se han situado las puntuaciones críticas mínimas a obtener en cada una de ellas por los aspirantes (niveles mínimos).

El proceso de captación es individualizado; el equipo de captación, formado por personal de HUMINT y del Gabinete, toma contacto con los sujetos señalados realizando una evaluación de su idoneidad. Se agrupa al personal que ha superado la captación y este sometido a un nuevo proceso de filtraje y evaluación competencial y de personalidad en un *assessment*, de tal manera que a la finalización del mismo cada uno de los sujetos estará enmarcado en un perfil.

Del resultado de la comparación entre resultado y criterio mínimo, se obtiene la brecha o *gap* que el sujeto ha de superar en la fase de formación inicial. La tabla siguiente muestra diversas variaciones: cuando ambos perfiles coinciden (capacidad del sujeto y exigencia en el mismo grado); cuando el nivel de la persona es superior al solicitado, y el tercer caso cuando se requiere un nivel superior al que trae el sujeto: lógicamente, el *gap* que ha de corregirse es de este último tipo.

Variable	***Perfil de la persona***	***Perfil del puesto***
1	Capacidad media	Exigencia media
2	" baja	" muy alta
3	" media	" baja
4	" muy alta	" alta

Tabla 1. *Establecimiento del gap competencial.*

Para poder corregir el *gap* evaluado se desarrolla un proceso de tutorización individual, que consiste en formar, mediante planes de instrucción adaptados al sujeto en los desempeños que definen los niveles del *gap*, hasta que la persona alcanza el requerido para el puesto.

2.2. Assessment center

Se conceptualiza como un proceso estandarizado de evaluación de competencias que permite emitir juicios basados en situaciones de simulación. Así, en las tareas que dichas simulaciones exigen, el aspirante proyecta e implementa sus capacidades, modo de actuar (*modus operandi*) y su estilo y características personales.

El objetivo es doble: filtrar al personal cuyo perfil no es adecuado, y obtener la nivelación competencial para establecer el *gap*. En el proceso de *assessment* se llevan a cabo casi 30 pruebas distintas en las que se evalúa, por medio de protocolos, el desempeño en las 7 competencias.

3. Metodología

«Método» viene del latín *methodus*, que significa «el camino a seguir», los pasos a dar para llevar algo a cabo, el procedimiento. La entrevista y otras diversas técnicas de investigación no serían –en este sentido– un método, sino solo dispositivos, herramientas del método, y este, un proceso empleado en un marco teórico [14], como ocurre con el método clínico [15].

Ese es el objetivo del SAVE, ser el método para una aplicación ordenada, flexible, lógica y adaptada al caso de las técnicas y herramientas más adecuadas para la evaluación a realizar en el marco del análisis de conducta [16]. Combinando distintos puntos de vista y estructurando lo que, en otros campos, se realiza hoy de forma individual e intuitiva [16]. Como meta-protocolo, integra y ubica diversas herramientas basadas en la evidencia empírica y previamente validadas para su uso independiente, desde el HELPT [17] hasta el perfilado indirecto de la personalidad mediante ENCUIST [13] y consta, en su versión más básica, de un triple filtro:

- Verosimilitud (V_1 o coherencia interna): se basa en los protocolos de análisis del contenido verbal; evaluación de la validez de la declaración (*Statement Validity Assessment, SVA*) [18], el control de realidad (*Reality Monitoring, RM*) [19], análisis de la estructura de la declaración [20], análisis lingüísticos cuantitativos [21], etc.
- Veracidad (V_2 o congruencia): análisis integrado del comportamiento verbal (CV) y no verbal (CNV) para estudiar su congruencia. Puede hacerse mediante protocolos específicos como el NBAP o *Non verbal Behavior Analysis Protocol*, que puede incorporar el FEAP (*Facial Expression Analisys Protocol*) y la matriz de análisis del comportamiento no verbal (*Non verbal Behavior Analisys Matrix, NBAM*), de aplicación preferente cuando se dispone de grabaciones en vídeo [22].
- Verificación (V_3, coherencia externa, contexto o correspondencia): contraste de la información con elementos objetivos y subjetivos del contexto, obtenidos mediante investigación en fuentesdiversas (criminalísticas, OSINT - *Open Source Intelligence*-, etc).

Debe añadirse siempre, bien de manera transversal o como una fase específica, el perfilado indirecto de la personalidad, que llamaremos valoración (V_0) y en su formato protocolizado, *Indirect Personality Profiling* (*IPP*) formaría parte del *NBAP* desarrollado desde la Fundación Universitaria Behavior and Law.

El núcleo del análisis estaría constituido por las fases ya explicadas y, dado que se trata de una investigación basada en la ciencia, debe contener una hipótesis de partida que, para mayor garantía y en concordancia con el modelo de *Truth Default Theory* [23], corresponderá siempre a la autenticidad del caso, dejando la carga de la prueba en contrario a lo recogido en el análisis de validez. En función de los resultados obtenidos, que en V_1, V_2 y V_3 pueden darse en una escala de tipo Likert, se establecerán las conclusiones acerca del supuesto de hecho o motivo que ha precisado la aplicación de SAVE y si este resulta o no compatible con el análisis practicado.

Específicamente, pretende contribuir a superar algunas de las limitaciones mostradas en el campo académico de la detección del engaño [24]. Se plantean dos nuevas líneas estratégicas [25] ambas incluidas en SAVE: el desarrollo de estrategias activas de entrevista, a aplicar en V_1 y V_2, y la búsqueda de indicios contextuales de engaño, el campo natural de V_3. Precisamente entre otras ventajas, usar V_0 para adaptar las estrategias activas de entrevista o acotar el campo de investigación, redundaría también en una mayor eficacia.

La combinación de herramientas para mejorar los resultados es otra de las tendencias en la investigación académica, como podemos observar en diversos trabajos [17, 26]. De hecho, es esta posibilidad de integración de protocolos útiles –actuales o futuros [27] incluso los basados en intenciones [28] o entrevista a más de un sujeto [29]– flexible y adaptada a cada área, otra de las características principales del SAVE y la que le otorga su condición de metaprotocolo. De ese modo, en SAVE se simplificaría la interacción entre elementos de las diferentes fases generando sinergias; no solo en V_2 se tiene en cuenta V_1 para establecer la veracidad, sino que, por ejemplo, el uso del *Verifiability Approach* [27] en V_1 puede permitir comprobar en V_3 los detalles verificables obtenidos. Igualmente, mediante una aplicación única o sucesiva de SAVE, la información obtenida en la investigación (verificación y valoración) puede usarse estratégicamente (*SUE, Strategic Use of Evidence*) por el entrevistador activo [30] para después aplicar el correspondiente análisis de contenido (V_1) y congruencia (V_2).

4. Discusión

Es de sobra conocido que el ciclo de la inteligencia es un paradigma que, aunque discutido, permanece con más o menos variaciones, y no han sido pocos los autores que han intentado su cambio sin éxito. No hay duda de la importancia que la inteligencia HUMINT tiene no solo en la fase de obtención, sino dentro de todo el proceso de inteligencia.

El desconocer que la persona entrevistada está cometiendo un fraude, que para la inteligencia HUMINT equivaldría a comunicar datos inexactos, podría ocasionar un perjuicio de dimensiones catastróficas, por ejemplo, si estuviéramos hablando de la posibilidad de un ataque terrorista. Las organizaciones de inteligencia cuentan con los parámetros de evaluación de una entrevista mediante las escalas de fiabilidad de

la fuente y validez de la información, pero en relación con el engaño y fraude el uso de SAVE mejorará sin duda la exactitud de su apreciación.

El desarrollo del metaprocolo SAVE se basa en una combinación interdisciplinar de métodos validados científicamente que se ordenan y estructuran de manera simple e intuitiva con la intención de optimizar su eficacia en el análisis de validez en la práctica real, permitiendo un uso flexible y adaptado a cada medio, en nuestro caso el de HUMINT.

Este trabajo pretende favorecer el intercambio de opiniones y esperamos contar con todas las aportaciones para seguir desarrollando la metodología del análisis de conducta basada en SAVE en la que venimos trabajando desde hace unos años.

Referencias

1. *Camejo (2008). The competence-based management model and the performance assessment in human resource management. Entelequia. Revista Interdisciplinar, n.º 8.*
2. *Chiavenato, I. (1994). Administración de Recursos Humanos. 5.ª Edición. McGraw Hill. Madrid.*
3. *McGregor, D. (1994). El lado humano de las organizaciones. Colombia. McGraw Hill.*
4. *Hartle, F. (1993). Las competencias: clave para una gestión integrada de recursos humanos. Madrid. Editorial Deusto.*
5. *Díaz, R, Arencibia (2011). Enfoque de las Competencias Laborales: Historia, Definiciones y Generación de un Modelo de Competencias para las Organizaciones y Personas. Psykhe, 11(2).*
6. *Tobon, S. (2004). Formación Basada en Competencias. Madrid. UCM.*
7. *Department of the Army. (September de 2006). Human intelligence collector operations. Obtenido de: file:///F:/Inteligencia%20new/bibliografia/FM2-22.3.HUMAN%20INTELLIGENCE.pdf*
8. *Esteban Navarro, M. A. (2006). Glosario de Inteligencia. Madrid. Minsterio de Defensa.*
9. *Domínguez-Muñoz, A, De la Fuente, J. L., Gómez, A. M., García, P., López M. J. y López, R. (2018). SAVE-Sistema de Análisis de Validez en la Evaluación Médico-Pericial. En: XII Jornadas de Valoración del Daño Corporal. Aspectos médico-prácticos. Madrid: Fundación Mapfre. ISBN 978-84-9844-670-8.*
10. *Kahneman, D. (2012). Pensar rápido, pensar despacio. Barcelona: Editorial Debate.*
11. *Vilalta, R. J., Winberg, M. (2016) El análisis funcional de conducta en la evaluación psicológica forense de la credibilidad del testimonio. Behavior & Law Journal 2 (1), 1-10.*
12. *González, J. L., y López, R. M. (2016). Personalidad y Comportamiento. Perfilación Indirecta de Personalidad. In R. López, F. Gordillo y M. Grau (Eds.), Comportamiento no Verbal: más allá de la comunicación y el lenguaje. Madrid: Pirámide.*
13. *Halty, L., González J.L., Sotoca, A. (2017). Modelo ENCUIST: aplicación al perfilado criminal. Anuario de Psicología Jurídica, 27, 21–31.*
14. *Nateras González, M. (2005). La importancia del método en la investigación. Espacios Públicos, 8 (15), 277-285.*
15. *Ilizástegui Dupuy, F., Rodríguez Rivera, L. (1990). El método clínico. Rev Finlay, 4(4), 3-23.*
16. *Domínguez-Muñoz, A., De la Fuente, J. L., Gómez, A. M., García, P., López M. J. y López, R. (2017a). Análisis de Conducta en Medicina Evaluadora: una propuesta interdisciplinar. Medicina y Seguridad en el Trabajo, 63(248), 260-275.*
17. *Manzanero, A. L. y González, J. L. (2015). Modelo holístico de evaluación de la prueba testifical (HELPT). Papeles del Psicólogo, 36(2),125-138.*
18. *Köhnken, G., Manzanero, A. L., y Scott, M. T. (2015). Análisis de la Validez de las Declaraciones (SVA): mitos y limitaciones. Anuario de Psicología Jurídica, 25, 13-19.*

19. *Raye, C.L. y Johnson, M.K. (1980). Reality Monitoring vs. Discriminating Between External Sources of Memories. Bullerin of the Psyconomic Society, 15(6), 405-408.*
20. *Adams, SH (1996). Statement analysis: What do suspect's words really reveal?. FBI Law Enforcement Bulletin. 12-20.*
21. *Pennebaker, JW (2011). The secret Life of Pronouns: What our words say about us. 1th Edition. New York: Bloomsbury, USA.*
22. *López, R. M., Gordillo, F., y Soto, J. E. (2016). Protocolo NBAM (Nonverbal Behavior Analysis Matrix). In R. López, F. Gordillo y M. Grau (Eds.), Comportamiento no Verbal: más allá de la comunicación y el lenguaje. Madrid: Pirámide.*
23. *Levine, T. R. (2014). Truth-Default Theory (TDT). A theory of human deception and deception detection. Journal of Language and Social Psychology, 33(4), 378-392.*
24. *Masip, J. & Herrero, C. (2015a). Nuevas aproximaciones en detección de mentiras I. Antecedentes y marco teórico. Papeles del Psicólogo, 36, 83-95.*
25. *Masip, J. & Herrero, C. (2015b). Nuevas aproximaciones en detección de mentiras I. Antecedentes y marco teórico. Papeles del Psicólogo, 36, 96-108.*
26. *Blair, J.P., Reimer, T.O. & Levine, T.R. (2018). The Role of Consistency in Detecting Deception. The Superiority of Correspondence over Coherence, Communication Studies, DOI: 10.1080/10510974.2018.1447492.*
27. *Masip, J. (2017). Deception detection: State of the art and future prospects. Psicothema, 29, 149-159.*
28. *Feijoo Fernández, M.C. y Halty, L. (2018). La intención es lo que cuenta. Una revisión sobre la detección del engaño en intenciones. Papeles del psicólogo, 39, pp. 51-59.*
29. *Vernham, Z. y Vrij, A. (2015). A review of the collective interviewing approach to detecting deception in pairs. Crime Psychology Review, 1, 43-58. Doi:10.1080/23744006.2015.1051756.*
30. *Hartwig, M., Granhag, P. A., Strömwall, L. a, & Kronkvist, O. (2006). Strategic use of evidence during police interviews: when training to detect deception works. Law and Human Behavior, 30(5), 603–19.*

Un enfoque cognitivo-conductual para la radicalización violenta. Más allá de las ideologías o creencias subyacentes[1]

Peco Yeste, Miguel

Licenciado en psicología y doctor en seguridad internacional. Profesor asociado de la Universidad Complutense de Madrid. Correo electrónico: mpeco@ucm.es

Resumen

El enfoque cognitivo-conductual basado en la psicología del aprendizaje permite abordar en detalle los mecanismos de radicalización producto de la interrelación entre factores *push* y *pull*. Inspirándose en estos últimos, el modelo «vía épica del proceso de radicalización» (VEPR) propone un mecanismo factible y congruente que explica cómo algunos individuos se involucran y desarrollan el correspondiente proceso. El modelo es capaz de transitar transversalmente desde un contexto con raíces políticas revolucionarias hasta otro con raíces yihadistas, mientras que en el plano individual es compatible y complementa en mayor o menor medida a otras posibles vías de radicalización. El modelo VEPR, por otro lado, proporciona respaldo científico a la constatación empírica de que, bajo influencia yihadista, en las sociedades occidentales se gestan de manera espontánea estructuras autónomas, al tiempo que proporciona acomodo al fenómeno de los «lobos solitarios». También desafía creencias en buena medida arraigadas, como la de que el yihadismo es un movimiento fuertemente estructurado, la efectividad de las prácticas de influencia agresivas, o la relevancia del contexto de radicalización con respecto al individuo. Además, proporciona coherencia a las líneas de acción habitualmente empleadas a la hora de contrarrestar el fenómeno y sugiere estrategias para revertirlo. Finalmente, el modelo VEPR permite abordar una de las cuestiones más reticentes en este ámbito de estudio: si existe un mecanismo que explica cómo los individuos pueden convertirse en radicales violentos e incluso terroristas, ¿por qué bajo condiciones similares no todos lo hacen?

Palabras clave

Radicalización, enfoque cognitivo-conductual, terrorismo, yihadismo.

1 Esta comunicación presenta los resultados en su conjunto de una línea de investigación llevada a cabo desde 2007. Como resultados parciales, hasta la fecha se ha elaborado una tesis doctoral (referencia 5), se han publicado dos artículos en revistas científicas con proceso de revisión por pares (referencias 2 y 8) y un último artículo está aceptado y pendiente de publicación (referencia 4).

1. Introducción

El estudio científico de la radicalización violenta presenta dos grandes problemas. Por un lado, que las disciplinas utilizadas de manera preferente son las mismas que han sido utilizadas para estudiar a su «hermano mayor», esto es, el terrorismo. Este sesgo a la hora de abordar el fenómeno ha llevado a dejar en un segundo término el nivel de análisis centrado en la conducta individual en favor de aspectos políticos y sociales y, por consiguiente, a sobreestimar los factores externos que podrían influir en el proceso. Y, por otro lado, que la cantidad de variables involucradas en los contextos de radicalización hace difícil establecer relaciones causa-efecto, identificar patrones de radicalización coherentes, predecir la evolución del proceso y, en definitiva, implantar estrategias encaminadas a combatirlo.

El primero de dichos problemas puede abordarse utilizando un enfoque cognitivo-conductual. De esta manera, la conducta radical violenta es vista como una conducta aprendida, cuya adquisición y mantenimiento están sujetos a los principios de la Teoría del Aprendizaje. Utilizando este enfoque se puede dotar de base científica a algunos de los conceptos más empleados en las investigaciones sobre radicalización, como la dicotomía entre factores *push* y factores *pull*. En efecto, el proceso de radicalización es visto por algunos como […] *a product of interplay between push- and pull-factors within individuals*. Entre los primeros se encontrarían agravios sociales, políticos o económicos, sentimientos de injusticia, discriminación o exclusión, marginalización, etc., mientras que los factores *pull* englobarían a sentimientos de pertenencia a una causa, ideología o grupo social, búsqueda de identidad, lealtad, compromiso, aventura o posibilidad de convertirse en un héroe, entre otros [1][2].

El segundo problema –la cantidad de variables implicadas– puede abordarse recurriendo al estudio de contextos donde sea discutible la presencia de factores de conflictividad objetivos, dificultades para satisfacer necesidades básicas, etc., aspectos que suelen estar relacionados con la aparición de movimientos violentos organizados. Uno de estos contextos es el del autodenominado Movimiento de Liberación Nacional Vasco (MLNV) entre los años 1987 y 2003, época de apogeo de la violencia callejera protagonizada por algunos grupos afines. Puede argumentarse que en este contexto se dieron las anteriores condiciones y, al mismo tiempo, se caracterizó por una considerable capacidad para generar violencia, como lo demuestran los más de 400 asesinatos cometidos por la organización ETA y los más de 7.000 episodios de *kale borroka* contabilizados durante dicho periodo [2][3].

---

2 La dicotomía *push-pull*, con su importante carga subjetiva, es especialmente aplicable en contextos con escasa presencia de factores de conflictividad objetivos, como suele ser el caso de las sociedades avanzadas.

3 Durante dicho periodo de tiempo el País Vasco era una de las regiones más ricas y con uno de los mayores niveles de autogobierno de Europa, las sucesivas plataformas políticas del MLNV podían concurrir libremente a las elecciones y las actuaciones tanto de la Justicia como de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad de Estado se ajustaban estrictamente a la legalidad. Los Grupos Antiterroristas de Liberación (GAL) para entonces ya habían cesado su campaña de asesinatos contra el entorno de la ETA y sus miembros estaban siendo detenidos, enjuiciados y encarcelados. En definitiva, que fuera de consideraciones subjetivas no existía un clima de represión real capaz de generar las típicas dinámicas de acción-reacción ni necesidad de satisfacer necesidades básicas –de seguridad incluidas– que en otros tiempos y/o escenarios han contribuido a la aparición de fenómenos de violencia organizada semejantes.

En la actualidad, uno de los contextos de radicalización violenta más preocupantes está enraizado en el movimiento yihadista, y su repercusión en las sociedades occidentales se materializa en lo que algunos han denominado «cuarta ola de militantes y aspirantes a combatientes» [3]. Algunas de las características distintivas de este contexto son la magnitud en las cifras de los llamados *foreign fighters* –occidentales que se unen a la organización yihadista para combatir en sus teatros de operaciones–, la importancia de los agentes de radicalización, la menor influencia de la religión que en anteriores oleadas, las particularidades de las comunidades musulmanas, el profuso empleo de Internet y, sobre todo, la capacidad de las organizaciones yihadistas para extender el movimiento no solo de manera organizada, sino también indirectamente a través de fomentar en las sociedades occidentales la generación espontánea de células y grupos locales con los que eventualmente pueden llegar a vincularse. Esta característica coincide con los resultados que arrojaba el estudio del contexto del MLNV, a la vez que también se podría seguir objetando aquí la presencia de factores de conflictividad. Todas estas similitudes invitan a lanzar la hipótesis de que existe un mecanismo de radicalización común a ambos contextos que, sin abarcar necesariamente toda la complejidad del proceso, podría explicar por qué algunos individuos abrazan la vía de la violencia para alcanzar objetivos tan dispares.

2. Método

En una primera fase se analizó el contexto del MLNV bajo el problema de investigación que suponía la aparente ausencia de condiciones objetivas que explicaran la continuidad de las actividades violentas por parte de algunos grupos y activistas. La hipótesis preliminar era que estas actividades podrían constituir una conducta adquirida y que, independientemente de que fueran fomentadas e impulsadas por el núcleo de ETA a través de otras organizaciones, el correspondiente proceso de aprendizaje podría darse de manera espontánea a través de la mera interacción natural del individuo con el resto de militantes. Como herramienta se utilizó el análisis funcional, que permitió desvelar los beneficios –básicamente satisfacciones internas e inmateriales– que subyacen detrás de la conducta violenta, una conducta que en apariencia no es adaptativa en el contexto de las sociedades desarrolladas[4]. Los resultados apoyaban la anterior hipótesis, proporcionaban una explicación a la continuidad de las actividades violentas en el seno del MLNV y sugerían que procesos allí identificados –estrechamente relacionados con los mencionados factores *pull*– podrían extrapolarse a otras situaciones [4]. En un trabajo posterior, las consideraciones cognitivo-conductuales se reescribieron en términos de factores motivadores (atractivo de las actividades, narrativas y condiciones favorables para ejercer violencia) y disuasorios (consecuencias legales, barreras morales y rechazo social a la violencia), al tiempo que se profundizó en los mecanismos que podrían estar detrás de la adquisición y consolidación de conductas violentas [5][5].

A la hora de extrapolar resultados, la dificultad que entrañaba una comparativa directa del contexto del MLNV con otros contextos de radicalización pudo superarse adoptando una perspectiva sistémica. Por un lado, el contexto de radicalización pasó a verse como un auténtico sistema cuyo proceso principal, el proceso de radicalización, es resultado de la interacción entre ciertos elementos estructurales –organización, grupo radical, individuo y entorno social– a través de diferentes secuencias [actividades ejer-

4 Aparentemente, la violencia en las sociedades desarrolladas no es adaptativa porque no es necesaria para satisfacer las necesidades básicas del individuo y, por el contrario, la trasgresión de la ley suele llevar aparejadas sanciones considerables de privación de libertad. Sin embargo, el ejercicio de la violencia en circunstancias especiales, como las propiciadas por los ambientes radicales, puede llegar a resultar muy adaptativa a la hora de conseguir la aceptación del individuo en el grupo e incluso la admiración por parte de los camaradas, constituyendo adicionalmente una fuente de satisfacciones internas para el individuo. Véase que el uso del análisis funcional evita caer en la valoración moral tanto del individuo como del contexto, una reacción frecuente cuando se trata con temáticas tan sensibles como esta.

5 La motivación humana desde el punto de vista cognitivo conductual se explica en términos de adquisición de expectativas. Sin embargo, la versión en clave de motivación es más familiar para la mayoría de los lectores y proporciona también una explicación adecuada. Además, teorías acerca de la motivación como la de Maslow (1943) son muy útiles cuando estudiamos conductas en entornos como las sociedades avanzadas, en las que las necesidades básicas –fisiológicas y de seguridad– están prácticamente resueltas [6].

cidas – funciones realizadas – efectos alcanzados]. La variable dependiente, el nivel de radicalización individual (NRI), reflejaba conceptualmente la probabilidad de llevar a cabo conductas violentas representativas de dicho contexto. Como resultado, se identificó una vía de radicalización coherente y factible que podía explicar el proceso de radicalización individual [7]. Por las características y circunstancias particulares involucradas en dicha vía, en revisiones posteriores se la denominó «vía épica en el proceso de radicalización» o, simplemente, modelo VEPR [8].

Finalmente, en un cuarto trabajo se buscó constatar que el modelo VEPR era aplicable al anteriormente mencionado contexto de radicalización yihadista. Para ello se sometió a prueba una consecuencia directa de esto último: que la versión de dicho modelo resultante de la incorporación de las características específicas del contexto yihadista, así como la supresión de aquellas que no son de aplicación, podría seguir explicando la aparición de efectos de radicalización [9].

3. Figuras

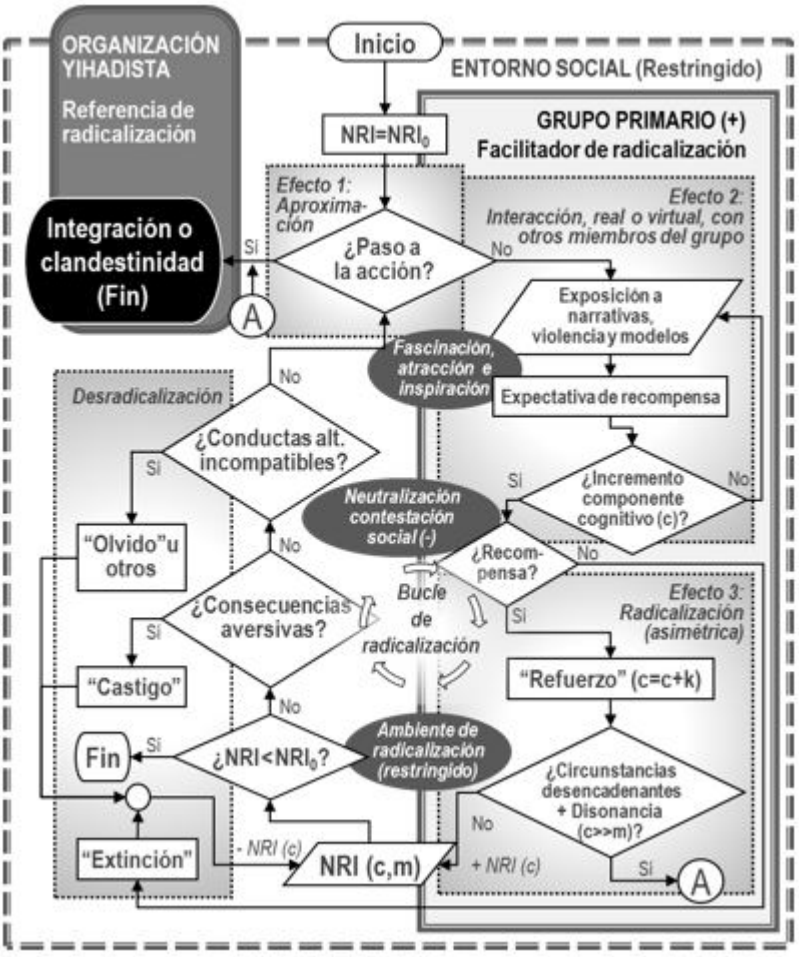


Figura 1. Modelo VEPR aplicado al contexto de radicalización yihadista en las sociedades occidentales. La falta de oportunidades para ejercer la violencia hace que el componente cognitivo de la conducta se distancie considerablemente del componente motor durante el proceso. De este modo, se crea una asimetría entre ambos que, bajo las circunstancias adecuadas, podrá reducirse bruscamente con el paso a la acción (elaboración propia).

Figura 2. Detalles del proceso en el contexto del MLNV, con disponibilidad de violencia de baja intensidad. El incremento de ambos componentes durante el proceso transcurre de manera simétrica (elaboración propia).

4. Resultados y discusión

Las diferencias entre ambos contextos de radicalización afectan de manera evidente a todos y cada uno de los elementos estructurales: organización, grupo, individuo y entorno social, así como a las relaciones entre ellos. Sin embargo, teniendo en cuenta que estas discrepancias incluyen una redistribución de actividades y no su desaparición, las diferencias en el nivel de las funciones llevadas a cabo por el sistema en su conjunto se reducen considerablemente, lo que se traslada a su vez al nivel de los efectos creados. Así, por ejemplo, la interacción real entre militantes que se daba en el grupo radical extenso del contexto del MLNV queda sustituida en el contexto yihadista por la interacción en las comunidades virtuales de internet, por lo que narrativas, modelos de conducta y refuerzos a la conducta violenta siguen disponibles. Por el contrario, en este último contexto no existen habitualmente oportunidades seguras para ejercer la violencia, sea de baja o de alta intensidad, al menos hasta que se den las circunstancias adecuadas. Finalmente, el componente religioso inherente al yihadismo no introduce diferencias cualitativas esenciales, aunque incrementa substancialmente el valor intrínseco de la recompensa interna e inmaterial a que puede aspirar el individuo en mayor o menor medida creyente: un designio divino en cuanto a las acciones en la vida presente y la convicción de su trascendencia más allá de este mundo. Todo ello hace que se mantenga la esencia del proceso de radicalización pero, al mismo tiempo, introduce matices distintivos entre ambos contextos.

En ambos casos la conducta violenta se podría adquirir inicialmente presenciando las acciones de otros y sus consecuencias, esto es, por aprendizaje social en el sentido de Bandura [10]. Ello es posible a través de la participación en las actividades del grupo (o interacciones con la comunidad virtual) y queda

materializado por la adquisición de una expectativa de recompensa interna e inmaterial en forma de sentimientos de camaradería, pertenencia, una causa «trascendente» por la que luchar, etc. No se descarta aquí la existencia de sentimientos de odio que, aun actuando como facilitadores del proceso, no deben considerarse como consustanciales a esta vía y sí como una conducta adquirida a través de otros mecanismos de aprendizaje individual u observacional. De cualquier modo, la probabilidad de que el individuo extreme en alguna medida aspectos cognitivos como actitudes, creencias, etc. se incrementa considerablemente, lo que a su vez induciría la aparición de una disonancia –en el sentido de Festinger [11]– entre pensamiento y acció[6]. Dado que todavía está presente una expectativa de recompensa, es más probable que la reducción de dicha disonancia se lleve a cabo al alza, esto es, que el individuo incremente su conducta violenta efectiva y la equipare a sus nuevas convicciones, y no al contrario[7]. Para ello, no obstante, son necesarios contextos como el del MLNV, donde era posible llevar a cabo un amplio abanico de actividades violentas de manera más o menos segura. Una vez llevado a cabo este ajuste, la nueva conducta incipiente es consolidada (reforzada) por la reducción de dicha disonancia, por el reconocimiento por parte de otros militantes y por la aparición de las anteriormente mencionadas satisfacciones internas e inmateriales. El proceso se repite de manera cíclica, el individuo acaba justificando la violencia como una vía legítima para alcanzar una idílica situación final y llega incluso a verse como el elegido para desempeñar tal misión.

A diferencia del MLNV, en el contexto yihadista la falta de oportunidades para ejercer la violencia no permite que el ajuste al alza entre aspectos cognitivos y actos violentos se lleve a cabo de manera progresiva. Así, tras reiteradas intensificaciones de las manifestaciones cognitivas de la conducta –esto es, pensamientos, actitudes y posturas cada vez más extremas–, el ajuste se produce de manera súbita cuando el individuo aislado o en grupo comete algún atentado o decide engrosar las filas de la organización. Este paso a la acción tiene lugar bajo el impulso motivador de una considerable disonancia, de una potente expectativa de recompensa interna e inmaterial y ante la aparición de circunstancias tales como el establecimiento de un vínculo directo con la organización yihadista, la disponibilidad de material y logística para cometer atentados, la llegada de un agente de radicalización, u otras. Tras ello, y al igual que en el contexto del MLNV, el modelo dejaría de ser aplicable. Finalmente, para ambos contextos el modelo VEPR contempla que la conducta radical violenta podría disminuir o incluso desaparecer a través de mecanismos tales como la extinción, la aparición de estímulos aversivos que en determinadas circunstancias podrían originar un efecto de «castigo», en el sentido técnico de la Teoría del Aprendizaje [14], o por la competencia exitosa de otras actividades a la hora de convertirse en fuente de recompensa para el individuo (figuras 1 y 2).

5. Conclusión

La radicalización violenta es un fenómeno extremadamente complejo donde confluyen multitud de variables y procesos. Bajo un enfoque cognitivo-conductual, puede contemplarse como un proceso de adquisición y consolidación de conductas violentas, referidas a ideologías o creencias determinadas, donde los aspectos cognitivos y motores se ajustan entre sí en una tendencia ascendente impulsados por el propio individuo. Dentro de dicho enfoque, el modelo VEPR mantiene el hilo conductor de un componente épico en el proceso de radicalización y es capaz de transitar transversalmente desde un contexto

6 En el enfoque cognitivo-conductual los pensamientos, actitudes y creencias asociadas a la conducta manifiesta (o motora) se consideran también parte de la respuesta del individuo. Así, de acuerdo con autores de referencia, se dice que la conducta en general se manifiesta en tres sistemas: cognitivo, fisiológico y motor [12]. Aunque habitualmente se asume que el pensamiento precede a la acción, el modelo VEPR también contempla que el proceso contrario tenga lugar de manera ocasional y que el individuo cometa actos violentos, por encima de sus convicciones, debido a mera presión del medio (*peer pressure*) o a facilidades para ejercer la violencia de manera segura.

7 Para dar cuenta de cómo las barreras psicológicas y morales del individuo pueden ser salvadas se puede acudir a mecanismos de desvinculación moral propuestos por Bandura tales como justificación moral, deshumanización, atribución de culpa, o difusión de la responsabilidad, entre otros [13]. La disponibilidad de narrativas adecuadas en los ambientes radicales, especialmente aquellas capaces de generar sentimientos de odio, propicia la actuación de dichos mecanismos.

con raíces políticas revolucionarias hasta otro con raíces yihadistas. Identificar una «vía épica» aplicable a diferentes contextos de radicalización y estrechamente relacionada con factores *pull* abre la puerta a nuevas perspectivas de investigación. Por un lado, resulta razonable suponer que dicha vía también podría estar presente en otros contextos de radicalización, ya estén arraigados en sociedades occidentales, desarrolladas, en conflicto u otras. Y por otro lado, que también podría existir otra vía de radicalización similar vinculada con factores *push* tales como marginación, exclusión social, afrentas recibidas, etc. Esta supuesta «vía trágica» sería compatible con la anterior y también es razonable suponer que ambas podrían concurrir en un mismo contexto e individuo.

El modelo VEPR invita a desafiar creencias ampliamente extendidas. En primer lugar, aquella que postula que la movilización propiciada por conocidos grupos yihadistas en las sociedades occidentales es un fenómeno fuertemente organizado. Por el contrario, el modelo proporciona un respaldo científico a la constatación empírica de que en el contexto yihadista existen estructuras autónomas que se gestan de manera espontánea y pueden evolucionar con el tiempo hacia sistemas más complejos. En particular, el fenómeno de los denominados «lobos solitarios» puede considerarse un caso extremo de dichas estructuras. Para dar cuenta de él, el modelo VEPR acepta que la radicalización es un fenómeno social, aunque matizando que este aspecto es relevante por su capacidad para ofrecer al individuo tanto modelos de conducta a seguir como reforzamiento de su conducta radical incipiente por parte de otros. Ahora bien, las posibilidades que ofrece Internet para acceder fácilmente a los materiales de propaganda y formar parte de comunidades virtuales hacen prescindibles al grupo radical, al grupo primario y, en general, a las comunidades reales a la hora de incorporar al sistema dichos modelos y refuerzos a la conducta violenta. Como conclusión, individuos aislados pero influenciados por entornos virtuales podrían desarrollar su propio proceso de radicalización y, en determinadas circunstancias, podrían ser utilizados por la organización yihadista o atreverse a cometer atentados por cuenta propia. Este mismo proceso puede generalizarse a grupos primarios y podría explicar la aparición y evolución de las mencionadas estructuras autónomas de manera espontánea. Desde el punto de vista del modelo, la presencia de agentes de radicalización reales o virtuales se asemeja más a un catalizador que, en mayor o menor medida, podría facilitar el proceso y adelantar el paso a la acción.

En segundo lugar, el modelo desafía el énfasis en recurrir a supuestos adoctrinamientos, «lavados de cerebro», etc., para explicar por qué algunos individuos se radicalizan. Aunque la existencia de estas prácticas de influencia agresiva es un hecho constatado, no son estrictamente necesarias para explicar el fenómeno de la radicalización. En realidad es el propio individuo quien se radicaliza a sí mismo, incrementando su conducta violenta y modificando sus pensamientos, creencias y sentimientos, bajo el impulso motivador de una expectativa de recompensa interna e inmaterial. Influencias externas como la del grupo o comunidad virtual son importantes a la hora de potenciar los factores motivadores de la conducta violenta y de inhibir aquellos que podrían ser disuasorios, pero no pueden sustituir al protagonismo y responsabilidad del individuo en su propio proceso de radicalización.

En tercer lugar –y estrechamente relacionado con lo anterior–, el modelo relativiza la relevancia de que el contexto se base en una u otra creencia, ya sea política, religiosa u otras. Por un lado, porque queda constatado el papel activo del individuo en la gestión de su propio proceso de radicalización, independientemente de las influencias que pueda recibir. Y por otro lado porque, aun reconociendo la necesidad de una ideología o creencia subyacente, el hecho de que esta se base en política, religión u otros trasfondos solo introduce diferencias de carácter técnico. Todo ello, sin embargo, no contradice la posibilidad de que existan contextos más proclives que otros para generar violencia, ya sea por su potencial para hacer concurrir varias vías de radicalización, ya sea por la capacidad de sus postulados para ser manipulados y suscitar sentimientos de odio que potenciarían a todas y cada una de ellas.

El modelo VEPR también permite dar coherencia a líneas de acción habitualmente empleadas a la hora de contrarrestar el fenómeno. El contexto de radicalización puede contemplarse en su conjunto como un sistema abierto y sujeto a influencias externas entre las que se incluyen las derivadas de las actuaciones punitivas del Estado en su lucha contraterrorista. Sin embargo, el subsistema formado por el individuo y el grupo, cuyo subproceso asociado es el bucle de radicalización, debido a sus propias dinámicas puede

llegar a ser extremadamente selectivo a las influencias que recibe, tanto desde fuera como desde dentro del sistema. De este modo, si bien permitiría influencias procedentes de la organización en forma de fascinación, atracción e inspiración, también neutralizaría aquellas otras procedentes de una actitud de rechazo social a la violencia o de las mencionadas actuaciones del Estado, ambas potencialmente disuasorias de la conducta violenta. Todo ello crea en el interior del grupo un clima de euforia y, al mismo tiempo, un sentimiento de impunidad, convirtiéndose de este modo en una auténtica factoría a la hora de producir individuos radicales.

Visto de este modo, las estrategias encaminadas a luchar contra la radicalización violenta pasarían por revertir esta dinámica, ya sea mediante la prevención y detección temprana en el ámbito familiar y social como a través de actuaciones de las fuerzas de seguridad. Centrándonos en estas últimas, en primer lugar es necesario eliminar dicho sentimiento de impunidad dando la suficiente visibilidad a las mencionadas actuaciones e impulsando el rechazo social contundente y manifiesto a la violencia por parte del entorno de los individuos involucrados. Semejante nivel de rechazo social puede ser difícil de alcanzar en el caso de las comunidades musulmanas más cerradas, pero dado que el componente religioso y trascendente del yihadismo hace que aspectos como ser encarcelado o incluso morir en el intento pierdan significativamente su valor disuasorio, esta vía podría constituir la opción con más posibilidades de éxito. En segundo lugar, habría que neutralizar las influencias procedentes de la organización, ya sea proporcionando narrativas alternativas, dando cuenta de sus contradicciones o incluso buscando directamente su desarticulación allá donde opera libremente. Esto último, cuando se trata de contextos yihadistas, podría requerir el despliegue de medios militares en operaciones y en misiones de desarrollo de capacidades de defensa y seguridad. Finalmente, promover alternativas al proceso de radicalización es un complemento necesario tanto para abandonarlo como para evitar retomarlo y constituye, por tanto, un campo que tiene potencial suficiente como para ser explorado a fondo. Véase que, lejos de apartarse de la norma, el modelo aglutina y da sentido a medidas que son habitualmente utilizadas en la lucha contra el fenómeno y permite optimizar las estrategias empleadas.

Por último, el modelo VEPR y el enfoque cognitivo-conductual, en general, arrojan luz sobre una incógnita recurrente cuando se trata de radicalización: si existe realmente un mecanismo que explica cómo los individuos pueden convertirse en radicales violentos e incluso terroristas, ¿por qué bajo condiciones similares no todos lo hacen? La clave está en que los avances en el proceso de radicalización dependen del balance entre factores motivadores y disuasorios, y la eficacia de ambos depende a su vez de la historia de aprendizaje de cada individuo. Y además –al menos en la «vía épica»– resulta que este balance no es constante durante todo el proceso. Cuanto más progrese el individuo hacia el comportamiento violento, más valor cobran los factores disuasorios en detrimento de los motivadores. Simpatizar con un grupo terrorista, llevar a cabo acciones de proselitismo o incluso violencia de baja intensidad, de manera ocasional y segura, puede ser una empresa emocionante para algunos activistas. Pero cometer delitos graves, pasar a la clandestinidad y renunciar a las ventajas del Estado del bienestar probablemente no sea una opción para la mayoría de ellos, aunque bien es cierto que la existencia de un componente trascendente marcaría una diferencia importante. Visto de este modo, la radicalización en las sociedades desarrolladas es una carrera en contra de las corrientes sociales dominantes que la mayoría de los participantes no podrán o no querrán completar.

Referencias

1. *Radicalisation Awareness Network. The Root Causes of Violent Extremism. European Commission. 2016.*
2. *Peco Yeste, M. A Cognitive–Behavioral Approach to Violent Radicalization, Based on a Real Case, Psicología Política. 2014, (49):7-26.*
3. *Coolsaet, R. Facing the Fourth Foreign Fighters Wave. Egmont–The Royal Institute for International Relations. 2016.*

4. *Peco Yeste, M. Análisis funcional de los movimientos radicales en el ejercicio de la violencia política. Tesis doctoral. UNED, Madrid. Noviembre de 2011.*
5. *Peco Yeste, 2014, op. cit.*
6. *Maslow, A. A Theory of Human Motivation. Psychological Review. 1943 (50).*
7. *Peco Yeste, M. A Functional Approach to Violent Radicalization: Building a Sistemic Model Based on a Real Case. Revista de Estudios en Seguridad Internacional. 2016, 2(1):63-76.*
8. *Peco Yeste, M. Una aproximación sistémica a la radicalización violenta: Cerrando el círculo alrededor de la «vía épica». Revista de Estudios en Seguridad Internacional. En prensa.*
9. *Ibid.*
10. *Bandura, A. Social Learning Theory. New York: General Learning Press. 1977.*
11. *Festinger, L. A Theory of Cognitive Dissonance. Stanford: Stanford University Press. 1957.*
12. *Lang, P. Fear Reduction and Fear Behaviour: Problems in Treating a Construct. Research in Psychotherapy. 1968 (4).*
13. *Bandura, A. The role of selective moral disengagement in terrorism and counterterrorism, en Moggahadam & Marsella (Eds.), Understanding terrorism: Psychological roots, consequences and interventions. Washington DC: American Psychological Association Press. 2004.*
14. *Skinner, B. F. The Behavior of Organisms: An Experimental Analysis. New York: Appleton-Century-Crofts. 1938.*

Toma de decisiones bajo estrés y su relación con los niveles hormonales de cortisol en sangre

Aceña Medina, Javier[1,*], Gómez Cabello, Alba María[1], Villacampa Gutiérrez, Raquel[1], González Calderón, Roberto[2], Palop Asunción, Jorge[3], César Párraga Nuñez[3], Maroto Mayoral, Montserrat[3]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090 Zaragoza, España; E-Mail: jacename@unizar.es (J.), agomez@unizar.es (A.), raquelvg@unizar.es (R) y cruizl@unizar.es (C).

[2] Academia General Militar. Ctra. de Huesca s/n, 50090 Zaragoza, España; E-mail: rgoncal@et.mde.es (R.).

[3] Escuela Militar de Montaña y Operaciones Especiales. C/ San Bernardo, s/n, 22700 Jaca, España. E-Mail: jpalasu@mde.es (J.), rparnun@et.mde.es (C.), mmarmay@et.mde.es (M.).

[4] Autor principal y responsable del trabajo; e-mail: jacename@unizar.es (J.).

Resumen

Es un hecho bien documentado que el estrés influye notablemente en nuestra capacidad de decicir y que dichos efectos pueden ser potenciadores o reductores en función de la magnitud e intensidad del estrés experimentado. Ante una situación generadora de estrés el hipotálamo, mediante una combinación de señales hormonales y nerviosas, provoca que las glándulas suprarrenales secreten una serie de hormonas, siendo el cortisol la que altera en mayor medida nuestro funcionamiento psicofísico. Para el presente estudio se ha utilizado un diseño cuasi-experimental pretest-postest con grupo de control no equivalente, contando con un grupo experimental al que se le exponía a una situación potencialmente estresante y un grupo de control no expuesto. Los participantes pertenecían al Curso 2017-2018 de Operaciones Especiales que se realiza en la Escuela Militar de Montaña y Operaciones Especiales (Jaca). El estrés era provocado por los propios instructores del curso al exponer a los alumnos (del grupo experimental) a situaciones potencialmente estresantes como parte de su instrucción habitual en operaciones especiales. El nivel de estrés experimentado se ha medido a través de la concentración hormonal de cortisol en sangre de cada participante, mediante extracción por parte del equipo médico de la Escuela y posterior análisis en el Hospital General de la Defensa de Zaragoza. Para evaluar la capacidad de toma de decisiones se diseñó por el equipo investigador una prueba de «disparo-no disparo» en la que los participantes tenían que decidir en función de unos criterios que variaban cada serie de cuatro imágenes que se proyectaban sobre una pantalla. Los resultados observados muestran que el grupo experimental, expuesto a un estresor previo, se toma más tiempo para ejecutar la prueba de toma de decisiones que el grupo de control no expuesto a dicho estresor. Por el contrario no se observaron diferencias significativas entre ambos grupos respecto a su precisión (aciertos y errores cometidos).

Palabras clave

Estrés, toma de decisiones, cortisol.

1. Introducción

La toma de decisiones (TD) es uno de los procesos más complejos a los que se enfrenta el ser humano y se puede definir como un procesamiento de carácter cognitivo cuando este se encuentra en una situación en la que debe evaluar una o más características para establecer cuál de las alternativas cumple con sus expectativas, metas o intereses, de las cuales se debe derivar un proceso reflexivo o una conducta que se va a seguir (Wang, 2008). Sin embargo, los glucocorticoides secretados por las glándulas suprarrenales durante episodios de estrés (principalmente el cortisol) pueden influir notablemente en nuestra capacidad de decidir (Roelofs, Bakvis, Hermans, Van Pelt, & Van Honk, 2007; Starcke, Wolf, Markowitsch, & Brand, 2008; Van den Bos, Harteveld & Stoop, 2009; Van Honk, Shutter, Hermans, & Putman, 2003). Dichos efectos pueden diferir en función del nivel de cortisol y el tipo de tarea realizada. La presente investigación pretende precisamente analizar la relación existente entre el nivel de cortisol en sangre de alumnos del curso de operaciones especiales y el desempeño en una tarea de TD «disparo-no disparo».

2. Materiales y métodos. Sección experimental

2.1. Muestra

Alumnos del Curso de Operaciones Especiales 2017-2018 de la Escuela Militar de Montaña y Operaciones Especiales (EMMOE) de Jaca (Huesca). Número de participantes: 29; edad media 27,1 años. Se contó para el estudio con un grupo experimental GE (n=15) y un grupo de control GC (n=14). La asignación de los sujetos a ambos grupos se ha realizado aleatoriamente, pero como paso previo se ha hecho una estratificación al objeto de que existan en ambos grupos la misma proporción de oficiales y suboficiales (ya que poseen distintos niveles de estudio).

2.2. Instrumentos de medida

La medición del nivel de estrés (variable independiente) se determinó a través de la medición de las concentraciones hormonales de cortisol en sangre de los participantes. El cortisol, es considerado como un excelente biomarcador del nivel de estrés experimentado. La extracción de sangre a los participantes se realizó por parte del servicio médico de la EMMOE (médico y enfermera), tanto al principio del curso (medición basal) como instantes previos a la realización de una prueba de TD.

El rendimiento en la toma de decisiones (variable dependiente) se realizó a través de una prueba diseñada específicamente para nuestra investigación. Se trata de una prueba «disparo-no disparo» en la que se le proyectaba a los sujetos una serie de diapositivas sobre una pantalla con imágenes relacionadas con armamento, material y equipo militar y en la que tenían que decidir si disparar o no disparar en función de unos criterios que iban variando cada serie de diapositivas. La prueba requiere de los participantes ciertas exigencias cognitivas tales como capacidad de atención sostenida, velocidad de procesamiento perceptivo, memoria de trabajo, flexibilidad mental, y fluidez de la respuesta motora. El rendimiento en la prueba se determina en función del «tiempo» empleado en su realización (tiempo de ejecución) y la «precisión» en la misma (aciertos y errores cometidos).

2.3. Diseño

Se utilizó un diseño cuasi-experimental con grupo de control no equivalente. Se trata de una muestra incidental, constituida previamente a nuestra investigación (alumnos seleccionados para realizar el Curso de Operaciones Especiales, en función de unos criterios de selección específico del Ejército de Tierra.

La prueba de TD fue realizada por todos los participantes, con la salvedad de que solamente el GE fue expuesto a un estresor previo a la misma. El estresor previo consistía en una actividad potencialmente estresante de instrucción en operaciones especiales llevada a cabo por los propios instructores del curso.

Inmediatamente antes de la realización de la prueba de TD, se extrajo una muestra de sangre a todos los participantes para conocer el nivel real de estrés en ese preciso momento. Dicho nivel se determinaba conociendo la concentración hormonal de cortisol en sangre (nmol/l) en cada sujeto.

2.4. Análisis estadístico

Tras el análisis de las variables de estudio, y constatar los supuestos de normalidad (test de Shapiro-Wilk) y el de homocedasticidad (prueba de Levene) en cada uno de los grupos, se ha utilizado la prueba t para muestras independientes a fin de comprobar la existencia de diferencias estadísticamente significativas, exigiéndose un nivel de significación del 0,05 ($p < 0,05$). Como herramienta para el tratamiento estadístico de los datos se utilizó una versión del *Statistical Pakage for Social Sciences* (SPSS).

3. Resultados y discusión

Al inicio del curso se realizó una medición basal del nivel de cortisol en sangre de todos los participantes. Los resultados no mostraron diferencias estadísticamente significativas (p-value=0,928) entre el GC y el GE. Sin embargo, instantes antes de la realización de la prueba de TD, sí se observaron diferencias significativas (p-value=0,000007) en el sentido de que el GE (expuesto a un estresor previo) mostró mayores niveles de cortisol en sangre que el GC (no expuesto a un estresor previo).

	GRUPO	N	Media	Desviación típica	Error típico de la media
Cortisol basal	Grupo control	14	167.0936	58.87283	15.73442
	Grupo experimental	15	168.9760	52.62805	13.58850
Cortisol prueba	Grupo control	14	158.9779	63.68308	17.02002
	Grupo experimental	15	312.7000	82.99781	21.42994

Tabla 1. *Estadísticos de grupo (nivel de cortisol en sangre).*

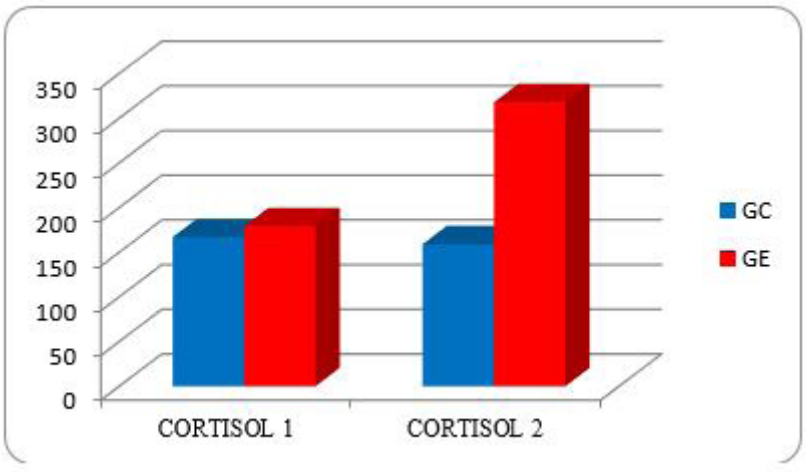


Figura 1. Niveles de cortisol (medición basal-1 y antes de la prueba de TD-2).

	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
Cortisol basal	-0.091	27	0.928	-1.88243	-44.36974	40.60489
Cortisol prueba	-5.617	26.064	0.000007	-153.72214	-209.96800	-97.47629

Tabla 2. *Prueba T de muestras independientes (nivel de cortisol en sangre).*

Respecto a la prueba de TD, los resultados mostraron que el GE empleó más tiempo que el GC en la realización de la misma, mostrando diferencias significativas (p=0,001) entre ambos grupos, según resultados del contraste de hipótesis y Box plot (tabla 4 y figura 2).

		N	Media	Desviación típica	Error típico de la media
Tiempo de ejecución	Grupo control	14	27.8650	3.51355	0.93904
	Grupo experimental	15	33.6860	4.64118	1.19835

Tabla 3. *Estadísticos de grupo (tiempo de ejecución).*

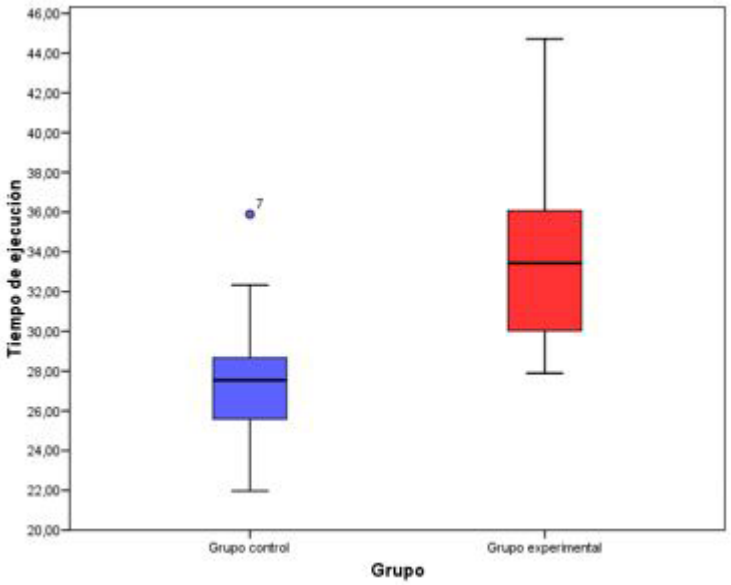


Figura 2. Tiempo de ejecución.

	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
Tiempo de ejecución	-3.787	27	0.001	-5.82100	-8.97524	-2.66676

Tabla 4. *Prueba T de muestras independientes (tiempo de ejecución).*

En cuanto a la prueba de precisión, los resultados señalaron que no existían diferencias significativas intergrupos en cuanto al número de aciertos y errores cometidos (p-value=0,321).

		N	Media	Desviación típica	Error típico de la media
Precisión	Grupo control	14	81.95911232	9.51175	2.54212
	Grupo experimental	15	78.19680320	10.54149	2.72180

Tabla 5. *Estadísticos de grupo (precisión).*

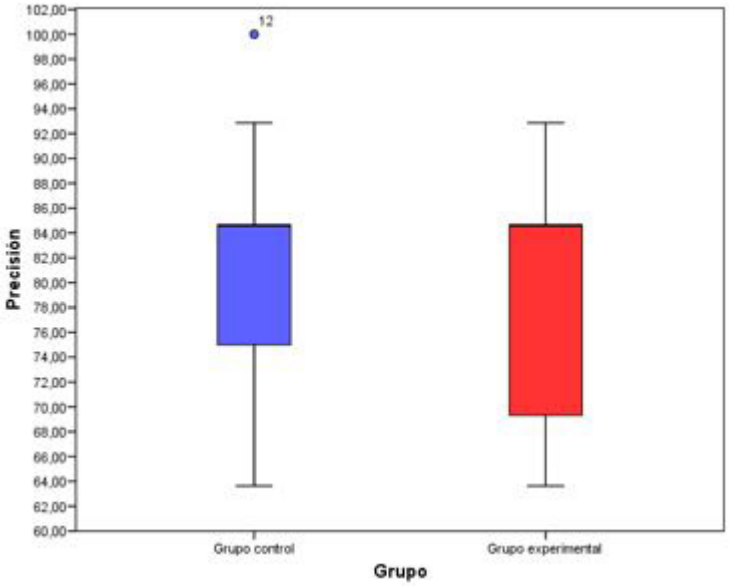


Figura 3. Tiempo de ejecución.

	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
Precisión	1.010	26.974	0.321	3.76230	-3.87972	11.4043

Tabla 6. *Prueba T de muestras independientes (precisión).*

4. Conclusiones

Del análisis de los resultados podemos afirmar que en el momento previo a la realización de la prueba de TD, el GE mostró un mayor nivel de estrés y que dicho estado podría ser el causante de las diferencias que se observaron en la realización de la misma. En concreto, se observó que aunque ambos grupos fueron igualmente precisos, el GE necesitó más tiempo para su realización.

Hay que significar finalmente que los resultados pueden variar de una investigación a otra en función de la intensidad del estrés experimentado por los participantes y la carga cognitiva que se les exija. Es decir, previsiblemente cuanto mayor sea el nivel de estrés experimentado y el nivel de dificultad de la tarea, mayores dificultades podrían observarse a la hora de tomar decisiones.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la EMMOE, particularizando en director, por brindarnos la oportunidad de llevar a cabo la investigación. Igualmente, agradecer a los alumnos del Curso de Operaciones Especiales por su colaboración y buena predisposición. Finalmente destacar la imprescindible colaboración del Hospital General de la Defensa en Zaragoza, quien nos facilitó las analíticas de sangre.

Referencias

1. *Roelofs, K., Bakvis, P., Hermans, E.J., van Pelt, J., y van Honk, J. The effects of social stress and cortisol responses on the preconscious selective attention to social threat. Biological Psychology. 2007; 75, 107.*
2. *Starcke, K., Wolf, O. T., Markowitsch, H. J., y Brand, M. Anticipatory stress influences decision making under explicit risk conditions. Behavioral Neuroscience. 2008; 122, 1352-1360.*
3. *Van den Bos, R., Harteveld, M. y Stoop, H. (2009). Stress and decision-making in humans: Performance is related to cortisol reactivity, albeit differently in men and women. Psychoneuroendocrinology. 2009: 34, 1449-1458.*
4. *Van Honk, J., Shutter, D.J., Hermans, E.J. y Putman, P. (2003). Low cortisol levels and the balance between punishment sensitivity and reward dependency. Neuroendocrinology. 2003; 14, 1993-1996.*
5. *Wang, X. Decision making in recurrent neuronal circuits. Neuron. 2008; 60, 215-234.*

Una propuesta de empleo para la toma de decisiones en el Ministerio de Defensa. *Analytic Hierarchy process*

Ruiz Lopez, C.[1,*]

[1,*] Carlos Ruiz López. Teniente coronel. Diplomado en Investigación Operativa y en Estadística. Profesor de Calidad y Proyectos. Centro Universitario de la Defensa (Zaragoza).

* Autor principal y responsable del trabajo: Carlos Ruiz López. Correo electrónico: cruizl@unizar.es

Resumen

La toma de decisiones es un aspecto inherente al ser humano y adquiere vital importancia cuando estas decisiones afectan a un grupo de personas o a una gran organización. Se pueden tomar de forma subjetiva, basándonos en la intuición y en la experiencia, o bien aplicando el método científico. Las técnicas de decisión multicriterio TDM constituyen un instrumento racional y objetivo de ayuda a los centros decisores a abordar la necesaria comparación entre alternativas. La elección entre varios sistemas de armas, vehículos, ... son casos concretos donde aplicar las TDM. En este trabajo se presenta esta metodología y más concretamente el análisis AHP de Thomas Saaty con propuestas de empleo para las Fuerzas Armadas. Se expondrán casos donde se ha aplicado esta metodología. Su conocimiento por parte de centros decisores del Ministerio de Defensa y su replicabilidad en casos futuros, hacen de esta metodología una oportunidad de mejora en la toma de decisiones en las Fuerzas Armadas.

Palabras clave

Toma de decisiones, AHP, *Saaty*, decisión multicriterio.

1. Introducción

> «…Se abrió un largo debate en el que las posturas de los presentes difirieron significativamente sobre las distintas alternativas presentadas. No se aportaron datos adicionales, por lo que los posicionamientos se basaron mayoritariamente en convicciones o en hábitos actuales más que en hechos o datos específicos…» [1].

El párrafo anterior procede de una reunión al más alto nivel en el que se abordaban temas referentes al escalonamiento logístico. Son palabras del secretario general del Mando de Apoyo Logístico de Ejército de Tierra durante una reunión de coordinación de mandos logísticos. Algo está cambiando en el Ejercito, porque no solo se detectó esa falta de «análisis científico» si no que además se corrigió, siguiendo la metodología del análisis multicriterio para determinar el escalonamiento logístico más adecuado, estudiando y comparando cinco opciones que iban desde la invariabilidad de la situación actual hasta la centralización de las capacidades de los batallones en los grupos logísticos.

Puede parecer una simpleza, pero cualquier mejora debe empezar por la detección de que algo se está haciendo mal, o al menos no todo lo bien que se debiera. ¿Cuántas veces se toman decisiones sin aportar datos y basados mayoritariamente en convicciones o hábitos, en el saber vulgar y la experiencia?

El saber vulgar se apoya en la experiencia, en los años de conocimiento en un mismo puesto de trabajo y/o destino. El saber vulgar se sustenta en la teoría de los «dígitos oscilantes», «en el más o menos», donde la intuición y la subjetividad son la base de la decisión adoptada. Comprar un coche es una decisión importante que podemos realizar de forma personal. Pero decidir qué sistema de armas o vehículos adquirir para las Fuerzas Armadas es algo que no es intuitivo y necesita un análisis pormenorizado de todas las variables que influyen en el proceso de toma de decisión.

Es por ello que el método científico, las técnicas de ayuda a la toma de decisiones y los métodos cuantitativos son una herramienta imprescindible que toda organización moderna debe utilizar para resolver problemas y decisiones complejas. Estos métodos persiguen eliminar las conjeturas improvisadas, el pensamiento no explicado, injustificado e intuitivo que en ocasiones acompaña a la mayoría de las decisiones que se toman con respecto a problemas complejos [2].

La toma de decisiones podría concebirse como la elección por parte de un centro decisor (un individuo o grupo de individuos) de «lo mejor» entre «lo posible». Los problemas surgen a la hora de definir «lo mejor» y «lo posible» en un determinado contexto decisional. Una vez determinado lo posible (conjunto factible), se aborda la determinación de lo mejor. Para ellos definimos una función criterio, función valor o función de utilidad que reflejará las preferencias del centro decisor. Recurriendo a técnicas matemáticas optimizaremos la función de utilidad obteniendo entre las posibles alternativas la solución más favorable [3].

Lo mejor de esta metodología no serán solamente los resultados obtenidos sino la información aportada sobre los sistemas y alternativas analizadas en función de variables y criterios, no visibles a simple vista para el mando responsable de la elección. Una buena decisión es aquella que está basada en la lógica, considerando todos los datos disponibles y las alternativas viables y aplica una aproximación cuantitati-

va y cualitativa para resolverlos. Con ello aplicamos lo que Galileo Galilei decía hace más de 400 años: «mide lo que se pueda medir, y lo que no se pueda medir, hazlo medible».

Por estos motivos creemos que el empleo de técnicas de decisión multicriterio como ayuda a la toma de decisiones militares pueden facilitar al decisor una visión más ajustada a la realidad de las alternativas que se le proponen, sin desvirtuar la acción de mando inherente a la responsabilidad del cargo. «La decisión multicriterio es el conjunto de aproximaciones, métodos, modelos, técnicas y herramientas dirigidas a mejorar la calidad integral y a incrementar el conocimiento de los procesos de decisión seguidos por los individuos y sistemas, esto es, a mejorar la efectividad, eficacia y eficiencia de los procesos de decisión, y a aumentar el valor añadido del conocimiento de los mismos»[4].

En este artículo se pretende dar a conocer unos procedimientos de ayuda a la toma de decisiones de problemas complejos para que sean de conocimiento y uso, si así se estima, en diferentes órganos de decisión de las Fuerzas Armadas.

2. Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer la metodología *Analytic Hierarchy process* (AHP) en el ámbito del Ministerio de Defensa. La finalidad es extender el conocimiento de estas técnicas para que su aplicación sea replicable por nuestros analistas destinados en las Fuerzas Armadas. Hay que tener en cuenta la gran movilidad y rotación de nuestro personal en los destinos. Normalizar y estandarizar el uso de metodología garantiza la continuidad, coherencia y replicabilidad en la toma de decisiones.

Para ello se van a presentar varios trabajos realizados por diferentes mandos militares donde emplean TDM y más concretamente la metodología *Analytic Hierarchy process* (AHP) de Thomas Saaty.

Actualmente el autor de este artículo imparte docencia en el Master oficial de técnicas de ayuda a la decisión (Universidad Politécnica de Cartagena) y Master oficial en dirección y gestión de adquisiciones de sistemas de la defensa (Universidad de Zaragoza), impartiendo clases sobre esta metodología AHP y difundiendo su conocimiento. El 90 % de los alumnos de estos master son oficiales del Ejército de Tierra, la Armada, el Ejército del Aire y de la Guardia Civil, la mayoría comandantes y tenientes coroneles, analistas destinados en órganos de decisión en adquisiciones y ayuda a la toma de decisiones en sus respectivos Ejércitos, y en el Órgano Central del Ministerio de Defensa, principalmente en la Dirección General de Armamento y Material (DGAM). Es una buena base de partida para conseguir el objetivo planteado.

3. Metodología

El proceso o método de jerarquización analítica (AHP) es desarrollado por el matemático Thomas L. Saaty (1980) con el objeto de disponer una metodología robusta, fiable y válida para la ayuda en la toma de decisiones, particularmente, para la evaluación y ordenación de alternativas en función de varios criterios/subcriterios. Sintetiza un problema multicriterio (con múltiples dimensiones) en una escala de prioridades con una sola dimensión.

Se basa en la organización (de forma jerárquica y gráfica) de la información respecto a un problema de decisión, su descomposición y análisis por partes. Mayor detalle sobre los *pilares* del método se encuentra en Saaty [5].

Tres conceptos se destacan en la jerarquía del método AHP:

a) **Objetivo** o meta, que define el problema de decisión.
b) **Alternativas** o posibles soluciones/productos/proveedores a elegir.
c) **Criterios** (y subcriterios), directrices que permiten evaluar las alternativas.

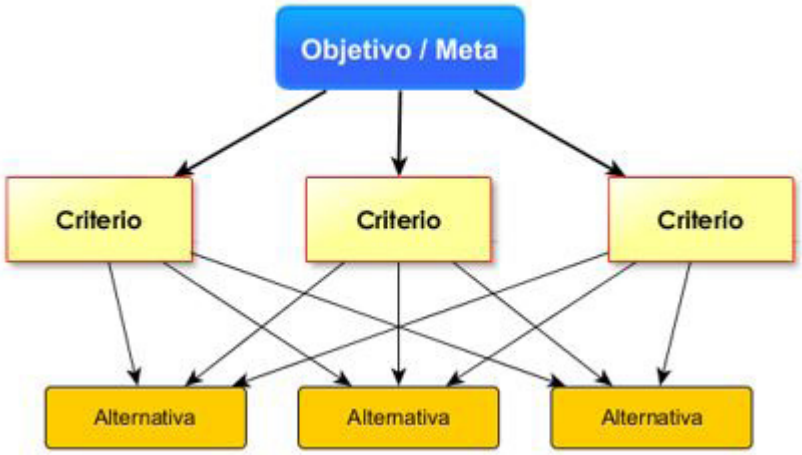


Figura 1. Representación jerarquía AHP.

El método AHP permite incorporar los juicios y valores personales, subjetivos (aspectos intangibles), proporcionados por las personas con mayor conocimiento de la organización sobre el tema en cuestión, utilizando el método científico, sobre la base de las matemáticas y la psicología, frente a decisiones tomadas tradicionalmente por la intuición-experiencia del decisor.

En la figura 2 se ilustran las 4 etapas de la metodología AHP:

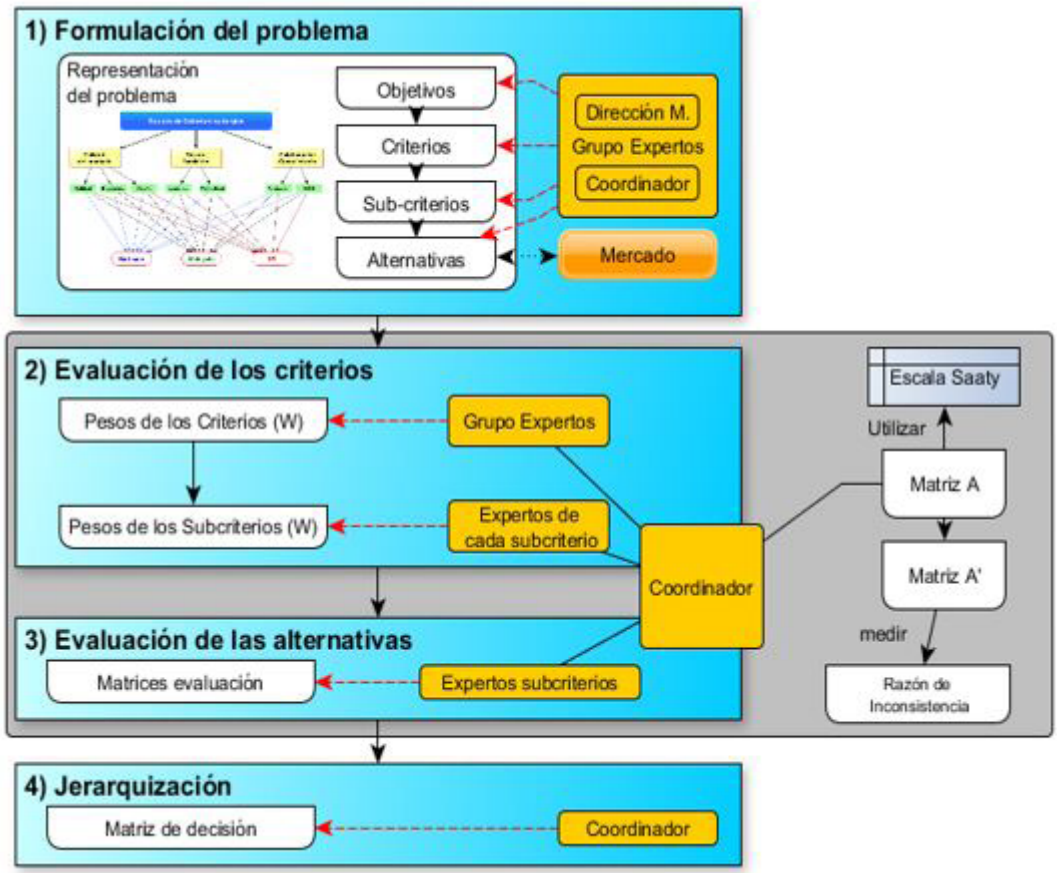


Figura 2. Etapas de la metodología AHP.

3.1. Formulación del problema

En la que se desglosan los principales componentes: **objetivo o meta, criterios, subcriterios y alternativas**, que se representarán mediante un diagrama de árbol jerarquizado. El problema de decisión es planteado por la **Dirección** responsable de la toma de dicha decisión. La definición de criterios será tarea del **experto o grupo de expertos** que dispongan del conocimiento global y experiencia sobre el problema propuesto siendo conveniente que conozcan la estrategia de la entidad.

3.2. Evaluación de los criterios

Se calculan los **pesos de los criterios**. La asignación de los pesos de los criterios es tarea del **responsable** de la toma final de la decisión, que podrá delegar la tarea en el experto (o grupo) que considere más adecuado, estableciendo las directrices oportunas.

Dos elementos son claves para la evaluación en el método AHP. Por una parte, la comparación de criterios **dos a dos**; evita la complejidad de realizar comparaciones entre varias alternativas de forma simultánea. Estudios psicológicos de autores como Miller [6] reflejan la imposibilidad del cerebro humano para comparar más de 7 alternativas. En segundo lugar, la utilización de una escala (de Saaty) para comparar alternativas teniendo en cuenta su importancia (o preferencia) (figura 3)**.**

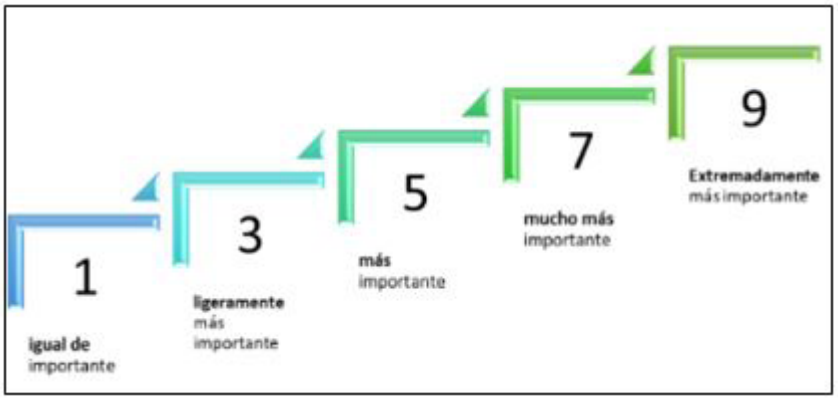


Figura 3. Escala de Saaty.

3.3. Evaluación de las alternativas

Se compararán entre sí (dos a dos) las alternativas de acuerdo con cada criterio y subcriterio, construyéndose las matrices necesarias para dichas comparaciones, de forma similar al proceso de la fase 2, aunque el tipo de la escala, en este caso, estará basada en las preferencias. El usuario o experto en cada subcriterio es el encargado de emitir los juicios sobre cada alternativa. La evaluación de las alternativas se llevará a cabo por el **usuario o experto** (o grupo) **de cada subcriterio (o criterio sin subcriterios)** establecido. Solo evaluará la alternativa en lo referido al ámbito de dicho subcriterio

3.4. Jerarquización de las alternativas

Se traslada la información obtenida en las etapas anteriores a la matriz de decisión para obtener la puntuación final de cada alternativa. Los resultados obtenidos muestran al responsable de la decisión las fortalezas y debilidades de cada alternativa en relación con los criterios/subcriterios definidos, proponiendo el reparto de puntos entre cada una de ellas, según una metodología científica, en la que han participado los expertos de la organización.

4. Resultados y conclusiones

El primer caso que presentamos de aplicación de la metodología AHP se realizó en Zaragoza. En el mes de noviembre del año 2013 tuvo lugar la FOC del Cuartel General de la Brigada Logística (BRILOG)

mediante el Ejercicio «Antorcha Audaz 2013». Esta evaluación (FOC) conllevó la confección de documentos procedimentales y operativos asociados a la preparación y despliegue del CG BRILOG como PCMALCE.

La BRILOG manifestó su interés meses antes en contar con un núcleo de apoyo a la toma de decisiones integrado en su Cuartel General durante el citado ejercicio. Este núcleo compuesto por un oficial diplomado en Investigación Operativa, tendría principalmente la misión de aplicar la metodología AHP para la comparación de las diferentes líneas de acción logísticas (LAL) propuestas por el Cuartel General de la BRILOG a su general jefe durante el planeamiento logístico. Para ello se redactó un documento donde se estableció el procedimiento a seguir para implementar la metodología AHP. El resultado fue un éxito en palabras del general jefe de la BRILOG.

Se analizaron las 2 líneas de acción logísticas (LAL) y 7 criterios y 12 subcriterios seleccionados por los expertos (11 comandantes y tenientes coroneles del CG BRILOG), siguiendo la metodología expuesta en el punto 3 de este trabajo, bajo la dirección del diplomado en Investigación Operativa (ver figura 4). La FOC fue muy positiva y se aplicaron las soluciones propuestas en los resultados obtenidos en el AHP.

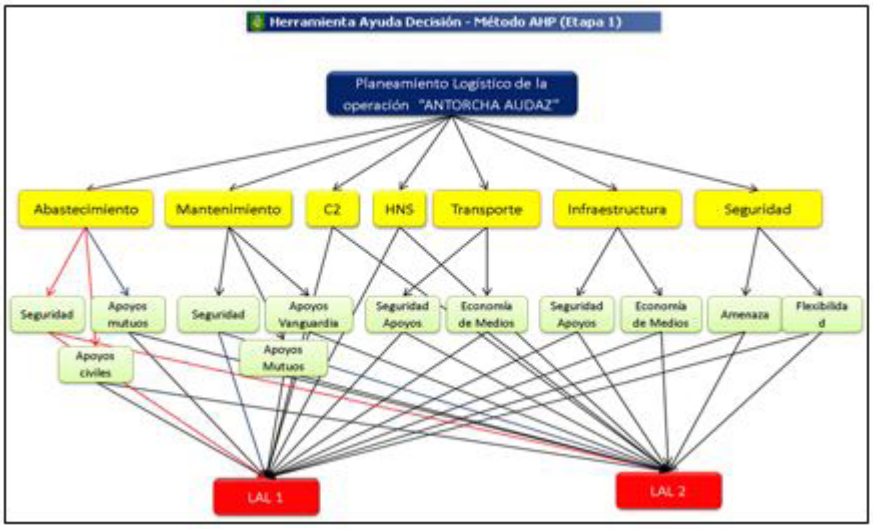


Figura 4. Formulación del problema BRILOG.

El segundo caso se realizó en beneficio de la Guardia Civil. Los sistemas aéreos pilotados de forma remota, (*Remotely Piloted Aircraft System*, RPAS), se han convertido en una herramienta de gran valía para multitud de finalidades. En este caso se utilizó la metodología de decisión multicriterio AHP para seleccionar los equipos más idóneos RPAS para la Guardia Civil. Se definieron los criterios/cualidades considerados más importantes y condicionantes en un RPAS y se jerarquizaron entre ellos. Los resultados obtenidos se consideran que podrían ser de gran utilidad para el Cuerpo de la Guardia Civil. El trabajo fue realizado por un comandante perteneciente al Estado Mayor del MOT.

Otros trabajos realizados por cuadros de mando empleando AHP son:

1. Aplicación de la técnica de decisión multicriterio AHP en los criterios de valoración para las licitaciones públicas de las Fuerzas Armadas.
2. Método AHP aplicado a la elección de un obús de artillería de campaña del ET para desplegar en zona de operaciones.
3. Empleo del análisis multicriterio AHP en el plan de alternativas de atraque de las lanchas del grupo naval de playa (GNP) en el arsenal de Cádiz.
4. Método AHP en la elección del futuro sistema de radiocomunicaciones de banda ancha europea para redes de seguridad pública y emergencias.

5. Empleo de la metodología AHP en la selección de un nuevo proveedor del carro de transporte de un motor aeronáutico.
6. Empleo del análisis multicriterio AHP en el proceso de decisión del plan de concentración de los centros logísticos del Ejército de Tierra (COLCE).

El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer la metodología AHP en el ámbito del Ministerio de Defensa y extender el conocimiento de estas técnicas para que su aplicación sea replicable por nuestros analistas destinados en las Fuerzas Armadas. Las metodologías multicriterio son técnicas de ayuda a la decisión que bien utilizadas, pueden convertirse en un arma fundamental, y que los mandos podemos y debemos emplear para tomas buenas decisiones. Los militares sabemos que la responsabilidad en la toma de decisiones siempre es del jefe pero la misión principal de los analistas y subordinados es proporcionar a este jefe toda la información elaborada para ayudarle a tomar buenas decisiones.

Referencias

1. *Bohigas, E. RECOMALOG del Mando de Apoyo Logístico. Acta 01/13. 2013.*
2. *Martínez, E. Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME. Anuario jurídico y económico escurialense. 2007.*
3. *Romero, C. Análisis de las decisiones Multicriterio. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas, ISDE-FE. 1996.*
4. *Moreno, J.M. Problemas de gran tamaño en el proceso analítico jerárquico. Estudios de economía aplicada. 1997; 8, 25-40.*
5. *Saaty, T. L. The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process. Boston: Springer. 2012; 22-40.*
6. *Miller, G. A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two Some Limits on Our Capacity for Processing Information. Psychological review. 1955; 63(2), 81.*

Los efectos de la carga mental sobre la actividad electroencefalográfica: un estudio experimental con conductores de vehículos LMV

Diaz-Piedra, Carolina[1]*, Sebastián, María Victoria[2], Fuentes Merlos, Jaume[3], Antuña Martínez, J. Emilio[3], Morales, José Miguel[1,4] y Di Stasi, Leandro L.[1, 5]*

[1] Centro de Investigación Mente, Cerebro y Comportamiento (CIMCYC), Universidad de Granada, 18071 Granada. Correos electrónicos: dipie@ugr.es (CDP), jmmorales@ugr.es (JMM), distasi@ugr.es (LLDS).

[2] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, 50090 Zaragoza. Correo electrónico: msebasti@unizar.es (MVS).

[3] Centro de Adiestramiento (CENAD) «San Gregorio», Acuartelamiento General Quintana, 50071 Zaragoza. Correo electrónicos: umetesmer@hotmail.com (JFM), jatmar1@et.mde.es (JEAM).

[4] Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (CITIC), Universidad de Granada, 18071 Granada.

[5] Centro Mixto Universidad de Granada - Mando de Adiestramiento y Doctrina del Ejercito de Tierra, 18071 Granada.

* Autores principales y responsables del trabajo; correo electrónico: dipie@ugr.es (CDP) y distasi@ugr.es (LLDS).

Resumen

En entornos operativos hostiles y violentos, el éxito en aquellas operaciones en las que se despliegan medios acorazados depende, entre otros factores, de la correcta actuación de los operadores/conductores. La ejecución durante la conducción no solo se relaciona con una adecuada instrucción, sino también con la dificultad de las maniobras, principal factor modulador de la carga mental (relación entre los recursos empleados y los demandados para ejecutar correctamente la operación). En este estudio, se evaluaron los efectos de la carga mental impuesta por diferentes operaciones simuladas sobre la actividad electroencefalográfica de 41 conductores de vehículos LMV (*Light Multirole Vehicle*). Los suboficiales y MPTM (militares profesionales de tropa y marinería) llevaron a cabo tres operaciones simuladas con diferentes niveles de complejidad en el Centro de Adiestramiento «San Gregorio» de Zaragoza. Se crearon dos escenarios por los que los participantes debían conducir, que diferían en la topología del terreno, de baja (Mali) y alta (Afganistán) complejidad, y un circuito de entrenamiento en pista con diferentes ejercicios de conducción (complejidad media). Durante las tres operaciones simuladas, se registró la actividad electroencefalográfica (potencia espectral en la banda *theta* en canales frontales [F3-F4], temporales [T3-T4] y occipitales [O1-O2]), el desempeño (número de accidentes) y la percepción subjetiva de carga mental. En la muestra final se incluyeron 35 conductores (2 mujeres, edad media: 31,1±6,2 años). La potencia espectral en la banda *theta* en todos los canales difería dependiendo de la complejidad de la operación, $F(2, 68) = 7{,}01$, $p = 0{,}001$. En concreto, los escenarios de complejidad media y alta inducían una mayor potencia espectral en comparación al escenario de baja dificultad (*ps.* corregidas $< 0{,}05$). Estos resultados sugieren que la potencia espectral en la banda *theta* durante la conducción podría ser un índice sensible de esfuerzo cognitivo y de carga mental en operadores/conductores militares.

Palabras clave

Carga mental, EEG, factor humano, fatiga.

1. Introducción

Los medios acorazados actuales ya no se caracterizan por el control manual de la mecánica y los instrumentos. Así, los nuevos diseños que operan en campos de batalla cada vez más digitalizados integran y, a su vez distribuyen, más información hacia, desde y dentro del propio vehículo [1]. Estos complejos flujos de información implican el control multimodal de *displays* informáticos integrados y altamente sofisticados. Es más, el contexto de trabajo se caracteriza por la toma de decisiones bajo presión temporal en un entorno hostil y con amenazas no siempre evidentes. Por ello, la carga de trabajo de los operadores/conductores de medios acorazados ha pasado de ser predominantemente física a ser predominantemente mental [2].

La carga mental (i.e., la relación entre los recursos empleados y los demandados para ejecutar correctamente la operación) es un factor muy importante para la correcta ejecución de los operadores/conductores de medios acorazados [3]. A menudo, cuando las demandas de una operación (su dificultad) exceden los recursos mentales del operador/conductor (sobrecarga), la ejecución se perjudica [4, 5]. Es más, los efectos deletéreos de la sobrecarga mental del operador/conductor comprometen la eficiencia de todo el sistema y su seguridad. Por ello, el estudio objetivo de los factores asociados a la sobrecarga mental (habilidades a instruir, manejo del estrés, dificultad de la tarea) es de vital importancia. Estudios de este tipo son más habituales en conductores civiles, que conducen vehículos particulares o comerciales en autovías y calles [e.g., 6, 7]. Sin embargo, el contexto militar entraña la conducción de vehículos militares de elevada complejidad, que han sido concebidos específicamente para el transporte y la protección de sus ocupantes en situaciones tácticas, en la mayoría de las ocasiones al límite de sus posibilidades [8]. El conductor no solo conduce. Por ejemplo, en situaciones de relativa tranquilidad, observa y evalúa el terreno adyacente, monitoriza los instrumentos, maneja las comunicaciones o controla la dirección a alcanzar, siguiendo mapas e instrucciones. Es más, el personal militar recibe entrenamiento especializado, lo que produce efectos a nivel funcional (por ejemplo, en los sistemas inmunológico, endocrino y neurológico, así como a nivel cognitivo) [9], por lo que identificar los efectos de la sobrecarga mental en el contexto militar implica tener en cuenta interacciones muy complejas (personal operando bajo fatiga extrema, déficits calóricos o privación de sueño).

En este estudio, nos hemos centrado en la evaluación de los cambios en la actividad *theta* (un índice electroencefalográfico habitual de carga mental y esfuerzo cognitivo [10]) dependientes de la complejidad operacional de diferentes escenarios simulados en conductores militares de vehículos LMV (*Light Multirole Vehicle*).

2. Desarrollo

2.1. Participantes

Los participantes fueron 41 suboficiales y MPTM (militares profesionales de tropa y marinería), conductores de vehículos LMV (edad: 32 ± 7,3 años; rango 20-52, 2 mujeres). Catorce de ellos eran instructores de conducción. Debido a fallos en el sistema de recogida de datos/simulador o nauseas debida a la simulación, se descartaron 6 participantes. La muestra final fue de 35 conductores (31 ± 6,4 años; rango 20-47, 2 mujeres). Todos los participantes firmaron el consentimiento informado antes de comenzar en el estudio.

2.2. Instrumentos y materiales

1) Simulador de vehículo LMV y operaciones simuladas

Se utilizó la plataforma de simulación dinámica destinada a la instrucción de conductores del vehículo LMV Lince (Simulación y Formación S.L., Madrid, España), situada en las dependencias del Centro Nacional de Adiestramiento (CENAD) «San Gregorio». Se crearon dos escenarios por los que los participantes debían conducir, que diferían en la topología del terreno, de baja (Mali) y alta (Afganistán) complejidad, y un circuito de entrenamiento en pista con diferentes ejercicios de conducción (complejidad media). Se registró el número de paradas de motor en cada escenario.

2) Registro electroencefalográfico

Se utilizó el electroencefalógrafo SOMNOwatch plus EEG-6 (Somnomedics, Alemania). Se registraron los canales F3, F4, T3, T4, O1 y O2 (ver figura 1) referenciados a CZ (frecuencia de muestreo: 256 Hz). El registro EEG se segmentó en tres épocas: Mali, Afganistán y pista. Cada época a su vez se dividió en segmentos de 4 segundos. Se realizó el análisis espectral de estos segmentos para calcular la potencia espectral de las bandas δ (0,5-4 Hz), θ (4,0-8 Hz), α (8,0-13 Hz) y β (13,0-30 Hz).

3) Cuestionarios

Se utilizaron la escala de somnolencia de Stanford (SSS [11]), que evalúa la sensación de alerta/somnolencia de la persona con una escala de 1 (máxima somnolencia) a 7 (máxima alerta), y el índice de carga mental NASA (NASA-TLX [12]), que evalúa la carga mental subjetiva con una escala de 0 (mínima carga) a 100 (máxima carga).

2.3. Procedimiento

Una vez colocados los electrodos, y antes del comienzo de la sesión experimental en el simulador, se evaluó la somnolencia del conductor con el SSS para comprobar que sus niveles de alerta eran adecuados [10]. Los participantes llevaron a cabo tres operaciones simuladas con diferentes niveles de complejidad conduciendo el vehículo LMV Lince en la plataforma de simulación. Para evitar la ocurrencia de efectos de aprendizaje o cansancio debido al paso del tiempo, el orden de los escenarios se modificó según un esquema de cuadrado latino. Al final de cada operación, se evaluó la carga mental subjetiva con el NASA-TLX. Durante toda la simulación, se grabó la actividad cerebral del conductor.

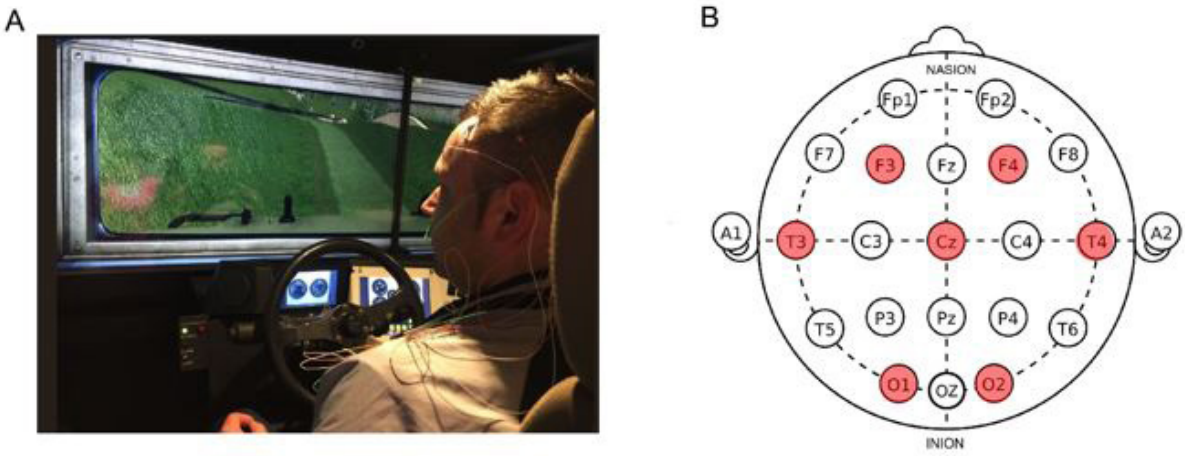


Figura 1. A) Conductor realizando una operación simulada en la plataforma de simulación dinámica del vehículo LMV Lince del Centro Nacional de Adiestramiento «San Gregorio». Durante el experimento, se registró la actividad cerebral del conductor mediante electroencefalografía (en la figura, pueden apreciarse algunos de los electrodos). B) Disposición de los electrodos utilizados en el cuero cabelludo (en rosa), según el Sistema Internacional 10-20 [13].

2.4. Análisis estadístico

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis de la varianza (ANOVA) de medidas repetidas con dos factores intrasujeto, *complejidad de la operación* (alta, media y baja) y *canal* (F3/Cz, F4/Cz, T3/Cz, T4/Cz, O1/Cz, 02/Cz). La variable dependiente fue la potencia espectral de la banda *theta*. En segundo lugar, se llevaron a cabo dos ANOVA de medidas repetidas, con un factor intrasujeto *complejidad de la operación* (alta, media y baja). Las variables dependientes fueron la carga mental subjetiva y el número de paradas de motor. Las comparaciones *post hoc* se realizaron mediante la prueba de Bonferroni. Todas las pruebas fueron consideradas significativas con $p < 0{,}05$.

3. Resultados y discusión

En este estudio se pretendía evaluar la sensibilidad de la actividad *theta* para detectar variaciones del estado cognitivo del conductor durante simulaciones de diferente complejidad con el vehículo LMV Lince (figura 1A).

3.1. Actividad theta

Los efectos principales fueron significativos. Es decir, los niveles tanto del *canal*; $F(5, 170) = 19{,}86$, $p < 0{,}001$; como de la *complejidad de la operación*; $F(2, 68) = 7{,}01$, $p = 0{,}002$; afectaron de forma diferente a la actividad *theta.* Sin embargo, la interacción no fue significativa, $F(10, 340) = 0{,}35$, $p > 0{,}05$. Las comparaciones *post hoc* indicaron que la potencia espectral de la banda *theta* fue mayor para las operaciones de alta y media complejidad, que para la de baja complejidad (todos los valores de $p < 0{,}05$) (ver figura 2 y tabla 1).

3.2. Carga mental subjetiva y ejecución en cada operación

Los niveles de la *complejidad de la operación* afectaron de forma diferente a la carga mental subjetiva medida con el NASA-TLX; $F(2, 68) = 63{,}82$, $p = 0{,}001$. Las comparaciones *post hoc* indicaron que los conductores percibieron como más compleja la operación en *Afganistán*, seguida por la operación en *pista* y la operación en *Mali* (todos los valores de la $p < 0{,}05$) (ver figura 2 y tabla 1).

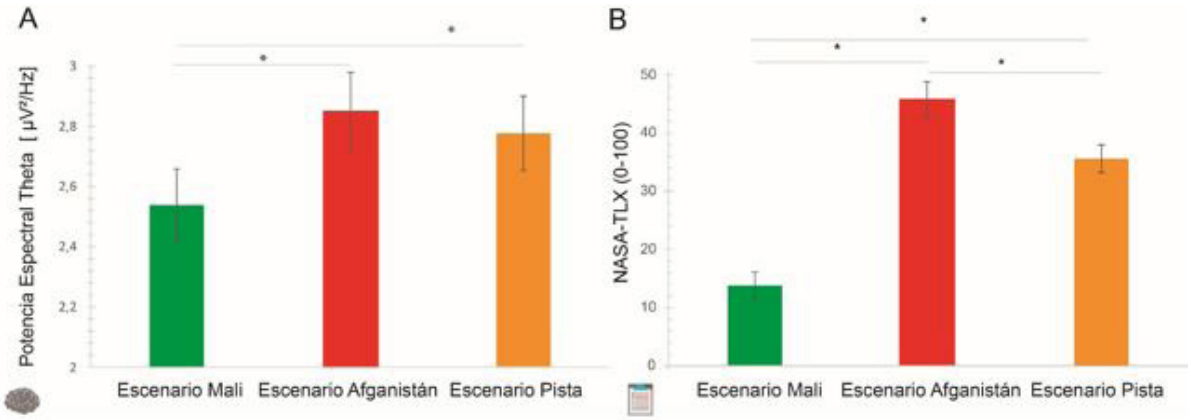


Figura 2. A) Potencia espectral del registro electroencefalográfico en la banda theta (que se asocia con carga mental y esfuerzo) en cada una de las tres operaciones. Las operaciones de alta (Afganistán) y media (Pista) complejidad requerían más actividad cognitiva. B) Una mayor complejidad en las operaciones provocó un incremento de la carga mental subjetiva. Los conductores evaluaron la operación en Afganistán como la más compleja y demandante, seguida por la operación en pista y por Mali. Se representan los valores medios por cada operación. Las barras de error representan el error estándar de la media. Las diferencias significativas se presentan con un asterisco.

Tabla 1. Valores medios (entre paréntesis, desviaciones típicas) de los 35 conductores en cada una de las tres operaciones en actividad *theta*, carga mental subjetiva y desempeño. La actividad theta hace referencia a la potencia espectral de *theta* colapsando los seis canales. La carga mental subjetiva se evaluó con el índice de carga mental NASA, cuyas puntuaciones varían de 0 a 100. El desempeño hace referencia al número de paradas del motor. Las diferencias significativas se presentan con un asterisco

	Complejidad del escenario		
	Baja Operación en Mali	Media Operación en Pista	Alta Operación en Afganistán
Actividad theta*	2,54 (0,12)	2,85 (0,13)	2,78 (0,12)
Carga mental subjetiva*	13,83 (2,29)	35,55(2,39)	45,64 (3,07)
Paradas del motor (núm.) *	0,03 (0,03)	0,14 (0,06)	0,37 (0,10)

Además, la *complejidad de la operación* afectó al desempeño (número de paradas del motor); $F(2, 68) = 6{,}11$, $p = 0{,}003$. Las comparaciones *post hoc* indicaron que los conductores desempeñaron peor la operación en *Afganistán* (mayor número de paradas del motor), comparada con las otras dos operaciones (todos los valores de la $p < 0{,}05$) (ver tabla 1).

En resumen, la complejidad de la operación moduló la actividad cerebral de los conductores. Nuestros resultados sugieren que la potencia espectral en la banda *theta* podría ser un índice sensible de esfuerzo cognitivo y de carga mental en operadores/conductores militares durante la conducción en operaciones militares. Esto es coherente con diversos estudios realizados en población civil en diferentes contextos (por ejemplo, tareas cognitivas [14], conducción [15], aviación [16], etc.) y con pilotos militares [10]. Es más, en nuestro estudio, la actividad *theta* se ve validada por los resultados encontrados en carga mental subjetiva y el desempeño.

Aunque la seguridad operacional puede verse afectada por otros factores ambientales y organizacionales, la sobrecarga del conductor parece ser la limitación funcional más relevante para conseguir un sistema fiable y libre de errores. Es más, simulaciones computerizadas de carga mental indican que, sin ayuda, el personal militar no será capaz de manejar eficientemente la carga mental que suponen los nuevos sistemas [17]. De ahí, la importancia de poder reconocer las fases de sobrecarga en los conductores de vehículos acorazados. Tradicionalmente, los expertos en factores humanos y de gestión de riesgos han utilizado autoinformes para evaluar las demandas impuestas a los operadores, así como para evaluar su rendimiento [18]. Dichos autoinformes son fáciles de administrar e interpretar, pero no permiten la evaluación continua del rendimiento del operador, presentan una sensibilidad insuficiente para detectar pequeñas variaciones en las demandas de trabajo y ciertos factores personales y motivacionales pueden sesgar las respuestas [19]. Por ello, es necesaria la validación de índices capaces de evaluar, en tiempo real, de manera fiable, no instrusiva y objetiva la carga mental del operador, como es la actividad *theta*. En el futuro, los avances en esta área permitirán el diseño y creación de sistemas de monitorización de la carga mental, integrados en el equipamiento del soldado, que permitan detectar de forma prematura condiciones de sobrecarga mental y que activen rutinas de gestión de problemas [20].

4. Conclusiones

Las actividades dirigidas a mejorar la instrucción, la evaluación del desempeño y el diseño de los puestos de trabajo deben estar orientadas a la optimización de la carga mental del combatiente. Así, cuando un nuevo adelanto tecnológico es introducido en los vehículos militares, la carga mental no solo debería mantenerse o reducirse, sino que la eficiencia de las operaciones y la seguridad de los operadores y conductores debería mantenerse intacta o mejorarse. Con este trabajo, presentamos evidencia de la validez de la actividad *theta* para indicar de forma objetiva la sobrecarga del operador. Estudios futuros deberán tener en cuenta posibles diferencias en actividad cerebral asociadas al género [21].

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza (CUD-ID: 2015-05 y 2017-03 dirigidos por M. V. Sebastián) y por el CEMIX UGR-MADOC (Proyecto PINs 2018-15 dirigido por L. L. Di Stasi y C. Díaz-Piedra). L. L. Di Stasi está financiado por el programa Ramón y Cajal (RYC-2015-17483). Agradecemos a Eduardo Bailón por su ayuda en el procesamiento de los datos.

Referencias

1. *Cook M, Noyes J, Masakowski Y (Eds.). Decision making in complex environments (pp. 333–347). Aldershot, UK: Ashgate; 2007.*
2. *Mao M, Xie F, Hu JJ, Su B. Analysis of workload of tank crew under the conditions of informatization. Defence Technology 2014, 10, 17–21.*
3. *Lundin M. Simulating the effects of mental workload on tactical and operational performance in tankcrew. [Internet, 2004]. [cited 2018 Aug 23]. Available from: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:20034/FULLTEXT01.pdf*
4. *Wickens CD. Multiple resources and mental workload. Human Factors 2008, 50, 449-455.*
5. *Wickens CD. Automation stages & levels, 20 years after. Journal of Cognitive Engineering and Decision Making 2018, 12, 35–41.*
6. *Di Stasi LL, Álvarez-Valbuena V, Cañas JJ, Maldonado A, Catena A, Antolí A, Candido A. Risk behaviour and mental workload: Multimodal assessment techniques applied to motorbike riding simulation. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 2009, 12, 361–370.*
7. *Di Stasi LL, Renner R, Staehr P, Helmert JR, Velichkovsky BM, Cañas JJ, ... Pannasch S. Saccadic peak velocity sensitivity to variations in mental workload. Aviation, Space, and Environmental Medicine 2010, 81, 413–417.*
8. *Antuña Martínez JE. La accidentalidad vial en el Ejército de Tierra. Revista del Ejército 2009, 816, 60–66.*
9. *Weeks SR, McAuliffe CL, DuRussel D, Pasquina PF. Physiological and psychological fatigue in extreme conditions: the military example. PM&R: The journal of injury, function, and rehabilitation 2010, 2, 438–441.*
10. *Di Stasi LL, Diaz-Piedra C, Suárez J, McCamy MB, Martinez-Conde S, Roca-Dorda J, Catena A. Task complexity modulates pilot electroencephalographic activity during real flights. Psychophysiology 2015, 52, 951–956.*
11. *Hoddes E, Zarcone V, Smythe H, Phillips R, Dement WC. Quantification of sleepiness: a new approach. Psychophysiology 1973, 10, 431–436.*
12. *Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. Advances in Psychology 1988, 52, 139–183.*
13. *Jasper H. The 10/20 intemational electrode system. EEG Clinical Neurophysiology 1958, 10, 371–375.*
14. *Puma S, Matton N, Paubel PV, Raufaste É, El-Yagoubi R. Using theta and alpha band power to assess cognitive workload in multitasking environments. International Journal of Psychophysiology 2018, 123, 111–120.*
15. *Lal SK, Craig A. Electroencephalography activity associated with driver fatigue: Implications for a fatigue countermeasure device. Journal of Psychophysiology 2001, 15, 183–189.*
16. *Borghini G, Isabella R, Vecchiato G, Toppi J, Astolfi L, Caltagirone C, Babiloni F. Brainshield: HREEG study of perceived pilot mental workload. Italian Journal of Aerospace Medicine 2011, 5, 34–47.*
17. *Brendle B. Cognitive decision aids for ground combat vehicles. Systems, Man, and Cybernetics, 2001 IEEE International Conference 2001, 3, 2089–2092.*

18. *Young MS, Stanton NA. Mental workload: theory, measurement, and application. International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors 2001, 1, 507–509.*
19. *Di Stasi LL; McCamy MB, Macknik SL; Mankin JA, Hooft N; Catena A, Martinez-Conde S. Saccadic eye movement metrics reflect surgical residents' fatigue. Annals of Surgery 2014, 259, 824–829.*
20. *National Research Council. Opportunities in neuroscience for future army applications. Washington, DC: National Academies Press; 2009.*
21. *Sebastián Guerrero MV, Arana Aritméndiz MV, Arcos Sánchez C, Navascués Sanagustín MA, Idiazábal Alecha MA, Ruiz López C, Iso Pérez JM. Procesos atencionales en tareas de simulación militar: diferencias relacionadas con el género. Revista Científica de la Sociedad Española de Enfermería Neurológica 2018, en prensa, https://doi.org/10.1016/j.sedene.2018.04.002*