Boletín DE OBSERVACIÓN TECNOLÓGICA EN DEFENSA

Dirección General de Armamento y Material
Armamento y Material

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PLANIFICACIÓN, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN
Boletín de Observación Tecnológica en Defensa n.º 65 • 2.º trimestre de 2020

Tecnologías de protección alternativas para las plataformas terrestres

Taller "9" Fuerza 2035 - Jornada sobre Defensa NBQ

Tecnologías emergentes en armas submarinas

Edita:

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PUBLICACIONES Y PATRIMONIO CULTURAL

NIPO en línea: 083-15-183-4
NIPO impresión bajo demanda: 083-15-182-9
ISSN edición electrónica: 2444-4839
Autor: Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT), Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDG PLATIN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM). Paseo de la Castellana, 109, 28046 Madrid; teléfonos: 91 395 52 14 (Dirección), 91 395 52 80 (Redacción); observatecno@oc.mde.es.

Director: TCol. Juan Manuel González del Campo Martínez.

Consejo Editorial: Óscar Jiménez Mateo, José Agrelo Llaverol, Cte. Carlos Calderón. Bgda. José María Martínez Benéitez.

Asistencia Técnica de apoyo a la Redacción: Nodo Gestor: David García Dolla, Rosalía Vindel Román; Observatorio de Armamento (OT ARM): Óscar Rubio Gutiérrez; Observatorio de Electrónica (OT ELEC): Yolanda Benzi Rabazas; Observatorio de Energía y Propulsión (OT ENEP): Héctor Criado de Pastors; Observatorio de Materiales (OT MAT): Luis Miguel Requejo Morcillo; Observatorio de Defensa Nuclear, Biológica, Química y Radiológica (OT NBQR): Nuria Aboitiz Cantalapiedra; Observatorio de Óptica, Optrónica y Nanotecnología (OT OPTR): Pedro Carda Barrio; Observatorio de Plataformas Aéreas (OT PAER): Guillermo Carrera López; Observatorio de Plataformas Navales (OT PNAV): Cristina Mateos Fernández de Betoño, Jaime de la Parra Díaz; Observatorio de Plataformas Terrestres (OT PTER): Pablo Monasterio Albuerne; Observatorio de Satélites y Espacio (OT SATE): Ana Belén Lopezosa Ríos; Observatorio de Tecnologías de la Información, Comunicaciones y Simulación (OT TICS): Bernardo Martínez Reif, Isabel Iglesias Pallín.

Portada: Radar búsqueda brillante sobre fondo negro (Fuente: Macrovector - Freepik).

El Boletín de Observación Tecnológica en Defensa es una publicación trimestral en formato electrónico del Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica orientado a divulgar y dar a conocer iniciativas, proyectos y tecnologías de interés en el ámbito de Defensa. El Boletín está abierto a cuantos deseen dar a conocer su trabajo técnico. Los artículos publicados representan el criterio personal de los autores, sin que el Boletín de Observación Tecnológica en Defensa comparta necesariamente las tesis y conceptos expuestos.

Colaboraciones y suscripciones:
observatecno@oc.mde.es

http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/es-es/Presentacion/Paginas/SOPT.aspx

SOPT

DGAM
Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación

CONTENIDOS

Editorial

Actualidad

4 ¿Dónde hemos estado?

7 Preparando la Defensa NBQ para el Entorno Operativo de 2035

Tecnologías Emergentes

8 Tecnologías emergentes en armas submarinas

11 Tecnologías de protección alternativas para las plataformas terrestres

En Profundidad

14 Radares 3D para sistemas C-UAS

20 UPMSat-2: El micro-satélite universitario español de demostración tecnológica en órbita

23 Resultados preliminares de caracterización de ***plumas*** generadas por propulsantes sólidos. Aplicación a proyectiles ***Base-Bleed***

TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN LA NUEVA DIRECTIVA DE DEFENSA NACIONAL

El pasado 11 de junio 2020, el presidente del Gobierno firmó la nueva Directiva de Defensa Nacional 2020, documento que establece las líneas de actuación y objetivos del Ministerio de Defensa para esta legislatura, además de dar inicio al nuevo ciclo planeamiento de la defensa de España.

Si bien son muchos los elementos de interés incluidos en la nueva directiva, desde el punto de vista tecnológico resulta de especial interés la directriz de actuación 14, que pone precisamente el foco en el fortalecimiento de la base tecnológica e industrial de defensa a través del desarrollo tecnológico y la innovación, como medio para mantener a las FAS en la vanguardia tecnológica. Además, apunta a la cooperación con otros departamentos con responsabilidades en tecnología e innovación a nivel nacional para lograrlo, en particular potenciando la participación de esta base tecnológica en los proyectos tecnológicos clave que se están promoviendo a nivel europeo.

Se trata de una directriz que, además de incidir directamente en los objetivos de la Política de I+D+i de Defensa, resulta plenamente coherente con el camino iniciado por la DGAM en 2016, año en el que la Comisión Europea publicó la comunicación sobre el Plan de Acción Europeo de Defensa (EDAP), dirigido a lograr importantes grados de participación nacional, retorno industrial y alineamiento con las necesidades de defensa de las iniciativas promovidas a nivel europeo. Y es asimismo consistente con los trabajos que desde 2019 se han venido llevando a cabo en el marco del Protocolo General de Actuación entre el Ministerio de Defensa, el Ministerio de Ciencia e Innovación, el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) y la Agencia Estatal de Investigación (AEI), en apoyo y promoción de la tecnología y de la innovación en los ámbitos de defensa y seguridad. En ellos, precisamente se ha incidido en la búsqueda de apoyos para el tejido tecnológico nacional en torno a las iniciativas que se están poniendo en marcha en Europa en apoyo al sector industrial de defensa, así como en la potenciación de las sinergias entre las inversiones de CDTI en proyectos duales y sus posibilidades de utilización futura en defensa.

La cooperación tecnológica a nivel nacional es además uno de los pilares sobre los que se espera sustentar la estrategia tecnológica del Ministerio de Defensa en los próximos años, tal como recoge el borrador de la nueva versión de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID-2020), que se espera vea la luz en los próximos meses.

El desarrollo de esta nueva versión de la ETID coincide en el tiempo con los trabajos de desarrollo de la nueva Estrategia Española de Ciencia, Tecnología y de Innovación (EECTI 2021-2027), en la cual la ETID se enmarca como estrategia sectorial. En la medida que se logre aprovechar las sinergias que existen entre las actuaciones duales promovidas por los planes estatales que se deriven de la EECTI y las necesidades futuras del sector de la defensa, será posible aproximarse a los fines planteados en esta directriz de actuación, todo ello en beneficio del fortalecimiento de la defensa nacional y al desarrollo de la base tecnológica e industrial y de la sociedad en general.

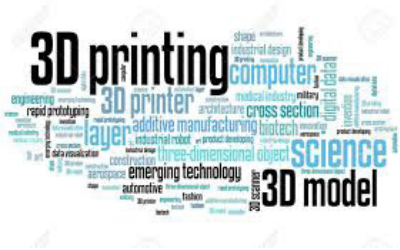
Actualidad

¿Dónde hemos estado?

Abril - mayo

Webinars OT MAT

El OT MAT ha asistido durante los meses de abril y mayo a numerosos *webinars* sobre fabricación aditiva, organizados por empresas del sector como *Sicnova, Comher,* HP o CT *Advance Manufacturing,* en los que se presentaban diferentes técnicas de impresión 3D, equipos y materiales y su aplicación en sectores tan diversos como el industrial, el del transporte o el sanitario.



6 de mayo

Webinar «Tecnología de hidrógeno para aplicaciones navales en Defensa»

Durante el pasado mes de mayo, personal de UPET, junto con otros compañeros de la SDG PLATIN, GESPRO y CDTI, asistieron al seminario virtual organizado por TECNALIA, en el que se dieron a conocer sus distintos ámbitos de investigación relacionados con la generación de hidrógeno para ser este utilizado posteriormente en pilas de combustible de ámbito naval.

Fuente de la imagen: TECNALIA.

12 de mayo

ORWELL 2020. Los riesgos de las sociedades hiperconectadas en un mundo de pandemia

La videoconferencia, moderada por Dª. Marisol Martínez Tirado, directora general de la Fundación Círculo de Tecnologías para la Defensa y la Seguridad, y con la participación del Col. EA D. Ángel Gómez de Ágreda, autor del libro «MUNDO ORWELL, Manual de supervivencia para un mundo interconectado» y de D. Gonzalo León Serrano, catedrático de la ETSIT de la UPM, llevó a cabo un análisis sobre las implicaciones del futuro mundo interconectado, así como la estrategia tecnológica y medidas específicas que son necesarias desarrollar en el ámbito de las comunicaciones, la electrónica y la computación.

FUNDACIÓN CÍRCULO DE TECNOLOGÍAS PARA LA DEFENSA Y LA SEGURIDAD

Toda la información sobre estos y otros eventos puede consultarse en el Portal de Tecnología e Innovación del Ministerio de Defensa: www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es

Actualidad

¿Dónde hemos estado?

14 de mayo

***Webinar* «Como implementar y utilizar la IA en los procesos y metodologías de la Ingeniería Naval»**

La Dirección de Adquisiciones (DIAD) del Mando de Apoyo Logístico del Ejército (MALE), junto con la Subdirección General de Planificación Tecnología e Innovación (SDG PLATIN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM), organizaron el "Taller "8" Fuerza 2035 - Jornada sobre Operaciones Especiales" en las instalaciones del Acuartelamiento "Alférez Rojas Navarrete" de Alicante, donde se trataron las siguientes temáticas, todas ellas en el ámbito de operaciones especiales: mando y control, maniobra, inteligencia, fuegos, protección, robótica y preparación de operaciones especiales.

14 de mayo

***Webinar* «Nuevas perspectivas digitales en el mantenimiento predictivo para equipos críticos lubricados»**

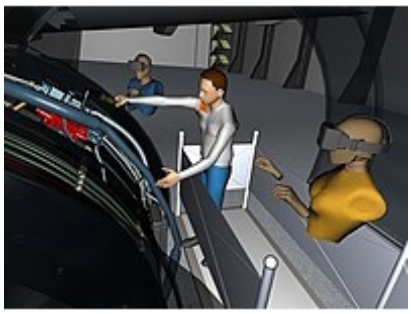
El OT MAT asistió al *webinar* «Nuevas perspectivas digitales en el mantenimiento predictivo para equipos críticos lubricados», que las empresas Grupo Alava y ATTEN2 organizaron el pasado 14 de mayo. El seminario online presentó una nueva tecnología utilizada para la monitorización del funcionamiento de equipos lubricados.

25 de mayo

Webinar «Aplicación de la Realidad Virtual para aliviar la barrera de colaboración entre los equipos de trabajo»

La SDG PLATIN, a través de su personal de Observatorios Tecnológicos, asistió al seminario online organizado por la delegación española de ESI-GROUP en el que se presentó el software IC-IDO. El evento sirvió para conocer las funcionalidades de la herramienta que, mediante tecnologías de Realidad Virtual, permite colaborar con equipos de trabajo de distintos ámbitos industriales en ingeniería de diseño, fabricación y ensamblaje, validar procedimientos de reparación y mantenimiento, así como realización de pruebas de seguridad y ergonomía de los diseños.

Fuente de la imagen: ©ESI-GROUP



Toda la información sobre estos y otros eventos puede consultarse en el Portal de Tecnología e Innovación del Ministerio de Defensa: www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es

Actualidad

¿Dónde hemos estado?

3 de junio

- ***Webinar* «Oportunidades de apoyo a la I+D para la industria aeroespacial de uso dual, civil y defensa, en Andalucía»**

La Consejería de Economía, Conocimiento, Empresas y Universidad, la DGAM y el clúster *Andalucia Aerospace* organizaron el seminario virtual sobre la industria aeroespacial de la defensa, destacando el entorno de oportunidades para las empresas aeroespaciales andaluzas.

Por parte de la DGAM se presentó el programa Sistema de Combate Aéreo de Siguiente Generación (NGWS), explicando los acuerdos de implementación entre las diferentes naciones, la estructura del proyecto, los pilares tecnológicos y se debatió sobre las entidades nacionales participantes y su ubicación geográfica.

Además, se explicaron las diferentes convocatorias de I+D+i correspondientes a Andalucía y que forman parte del Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la Unión Europea.

9 de junio

- ***Webinar* «COINCIDENTE – Ayudas CDTI»**

La DGAM y el Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) celebraron un *webinar* en colaboración en relación al Programa COINCIDENTE 2020 y posibles ayudas y subvenciones.

Por parte de la DGAM se expusieron los objetivos de la convocatoria y se informó del proceso administrativo de la misma, del procedimiento de contratación de las propuestas seleccionadas y en particular sobre los criterios de evaluación sobre los que se basa la selección de las propuestas ganadoras.

24 y 25 junio

- **Taller «9» Fuerza 2035 - Jornada sobre Defensa NBQ**

La Dirección de Adquisiciones (DIAD) del Mando de Apoyo Logístico del Ejército (MALE), junto con la Subdirección General de Planificación Tecnología e Innovación (SDG PLATIN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) y con la colaboración del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), han organizado el "Taller "9" Fuerza 2035 - Jornada sobre Defensa NBQ, dedicado a materiales y sistemas NBQ, aprovechando las diversas lecciones aprendidas en la Operación BALMIS y en la crisis de COVID-19 en cuanto a los requerimientos de los materiales NBQ.

Toda la información sobre estos y otros eventos puede consultarse en el Portal de Tecnología e Innovación del Ministerio de Defensa: www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es

Preparando la Defensa NBQ para el Entorno Operativo de 2035

Autor: Nuria Aboitiz Cantalapiedra, OT NRBQ, SDG PLATIN.

Palabras clave: Fuerza 2035, Defensa NBQ, sensorización, descontaminación, protección, COLPRO, gestión del conocimiento.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 5.2.1.; MT 5.2.2.; MT 5.2.3.; MT 5.2.4.

Introducción

Ante el cambio que se viene observando durante los últimos años en el entorno operativo, el Ejército de Tierra (ET) ha visto necesario realizar un ejercicio de reflexión sobre las características previsibles de dicho entorno en el 2035, los posibles escenarios de actuación y los cambios que deberá afrontar para adaptarse y conseguir una ventaja operativa. Este ejercicio de prospectiva forma parte del concepto Fuerza 2035, que el ET articula bajo la Directiva 03/18 "Estudios Fuerza 2035 y Brigada Experimental".

En este contexto, el Mando de Apoyo Logístico del Ejército (MALE) está llevando a cabo talleres que abordan un tema concreto y permiten el encuentro del ET con la Base Tecnológica Industrial de Defensa (BTID), para intercambiar información sobre los intereses y necesidades de unos y los desarrollos y capacidades tecnológicas de otros. Si bien en un principio el estado de alarma declarado en marzo de 2020 pareció impedir la celebración de nuevos talleres, la propia crisis sanitaria producida por SARS-CoV-2 suscitó el interés de retomarlos con uno dedicado a materiales y sistemas NBQ, que aprovechara las diversas lecciones aprendidas en la Operación BALMIS.

Así pues, el Taller "9" sobre Defensa NBQ ha tenido lugar los días 24 y 25 de junio mediante videoconferencia. Su organización se ha llevado a cabo con la colaboración de SDG PLATIN, dada el alto componente tecnológico del contenido, y de CDTI, por las posibilidades que ofrece para el desarrollo de proyectos de I+D+i de interés dual.

Primera Jornada

El primer día del Taller se inició con una introducción del MALE sobre el concepto Fuerza 2035 y la Brigada Experimental (BRIEX) para enmarcar la iniciativa del evento.

A continuación, el TCol. Jefe del Rgto. NBQ Valencia "nº 1" Muinelo Pardini expuso la previsión de necesidades y requerimientos de la Fuerza 2035 respecto a medios y tecnologías relacionados con la defensa NBQ, la cual estará articulada a través de la gestión del conocimiento, actividades de detección, identificación y seguimiento, sistemas y equipos de protección física, la gestión de los efectos y el apoyo sanitario. Muinelo remarcó la importancia de la sensorización de combatientes y vehículos, de la conectividad entre el propio sensor, el vehículo y el centro de control NBQ y de la integración de este último en el sistema de mando y control para tener acceso a sensores, sistemas de alerta y predicción y a COLPRO desde los puestos de mando Brigada. Se plantea la necesidad de sistemas COLPRO reactivos (de activación automática), que para los puestos de mando deben contar con una red de vigilancia aérea mediante UAV con sensores químicos y radiológicos como carga de pago. Se habló también de sistemas COLPRO en vehículos blindados y de respiración asistida en vehículos ligeros, de plataformas robóticas micro-UGV o UAV para reconocimiento y evaluación NBQ, de tecnologías avanzadas de sensorización, protección individual y descontaminación independiente de agua.

Por su parte, el TCol. Quintana, Jefe de Proyectos de la UME, comentó la experiencia de la Unidad en la operación BALMIS, un reto que les ha forzado a adaptarse y ha posibilitado identificar puntos débiles. Además, presentó los proyectos de I+D en los que están trabajando: estación de descontaminación automatizada mediante IA, UAV con carga de pago para gestión de incidente químico o terremoto, cañón para nebulización con carga electrostática positiva para desinfección de espacios cerrados, entre otros.

Finalmente, INTA y PLATIN presentaron sus funciones, capacidades y proyectos.

Segunda Jornada

La presentación de capacidades y proyectos de I+D de empresas, universidades y centros tecnológicos ocupó el segundo día del Taller, en el que destacó una amplia variedad de tecnologías punteras para sensorización, descontaminación, funcionalización de los trajes de protección e incluso farmacología, por parte de entidades como CTTC, TECNALIA, SDLE, COUNTERFOG, AITEX y las Universidades de Santiago de Compostela y Autónoma de Madrid.

Igualmente, INDRA, IBATECH, HISPANOVEMA e I-4S presentaron un gran número de desarrollos de ingeniería en el ámbito de la gestión de conocimiento, descontaminación, sistemas COLPRO y detección, identificación y seguimiento NBQ.

Conclusiones

Se está llevando a cabo un notable esfuerzo de previsión y preparación para que el Ejército pueda hacer frente a las amenazas de los futuros escenarios operacionales. A pesar de no poder celebrarse de forma presencial, el Taller "9" sobre Defensa NBQ alcanzó con éxito su objetivo de acercar las capacidades de la BTID a los usuarios finales de Defensa.

Tecnologías emergentes en armas submarinas

OT ARM, SDG PLATIN.

Palabras clave: armas submarinas, torpedos, supercavitación, misiles, velocidad hipersónica.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 1.1.2; MT 3.4.2; MT 3.5.4..

Figura 1. Las plataformas submarinas seguirán jugando un importante papel en el futuro como sistemas de armas estratégicas. Fuente Armada Española

Introducción

En general, un submarino suele utilizar tres tipos de armas tácticas: misiles anti-superficie tácticos y balísticos, torpedos y minas, que pueden llevar cabezas de combate con carga explosiva convencional o nuclear.

En cuanto al modo de operación, mientras el arma aún se encuentra en los tubos lanzadores, antes del lanzamiento, el sistema de combate programa la configuración de misiles y torpedos con los parámetros específicos de la misión. Ello requiere de alimentación eléctrica y enlace de datos con los dispositivos de control del arma.

El arma, una vez es lanzada, sigue la trayectoria configurada durante la programación y, en los casos en que el arma incorpora sistema de guiado, el subsistema de actuación y control podrá someter a correcciones dicha trayectoria a partir de las coordenadas obtenidas de los dispositivos de detección y seguimiento embarcados, que de igual manera han sido preprogramados para adquirir, seguir e interceptar al blanco.

En casos en que el arma incorpora un enlace de control, se mantiene una comunicación permanente durante la trayectoria al blanco, de manera que pueden continuar recibiendo actualizaciones en la programación desde el sistema de combate y, además, aporta funciones de observación avanzada, e incluso la operación remota para, por ejemplo, el aborto de la misión. En el caso de los torpedos filoguiados, el enlace físico se establece mediante fibra óptica.

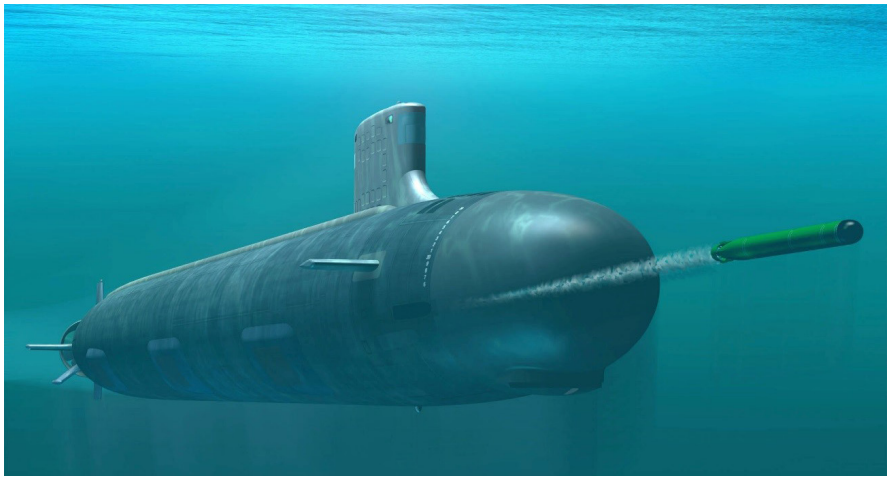


Figura 2. Lanzamiento de un torpedo desde submarino de la clase Virginia. Fuente US Navy

En el caso de las minas, la programación se realizar antes de ser introducidas en el tubo de lanzamiento, mediante un sistema de programación específico que permite su configuración desde el sistema de combate.

Tecnologías de los torpedos submarinos

Los sistemas de propulsión habituales de los torpedos se basan en propulsión eléctrica o propulsión térmica.

La propulsión eléctrica precisa de la instalación de baterías típicamente en variantes de óxido de aluminio-plata (Al-Ag), utilizada en torpedos como el F21 o el *Black Shark*, u óxido de cinc-plata (Zn-Ag), utilizada en torpedos *TIGERFISH* y DM2A4, que suministran la energía necesaria a los motores eléctricos para alcanzar velocidades de aproximadamente 50 nudos durante 50 kilómetros.

La propulsión térmica utiliza la energía generada por un sistema de combustión, como es el caso de los torpedos *Spearfish,* que utilizan un motor de turbina de gas, y MK-48, que utilizan un motor de pistón, ambos con '*Otto Fuel'* como monopropelente líquido.

Los torpedos suelen incluir una carga bélica basada en alto explosivo y generalmente buscan la detonación bajo la quilla del buque objetivo, ya

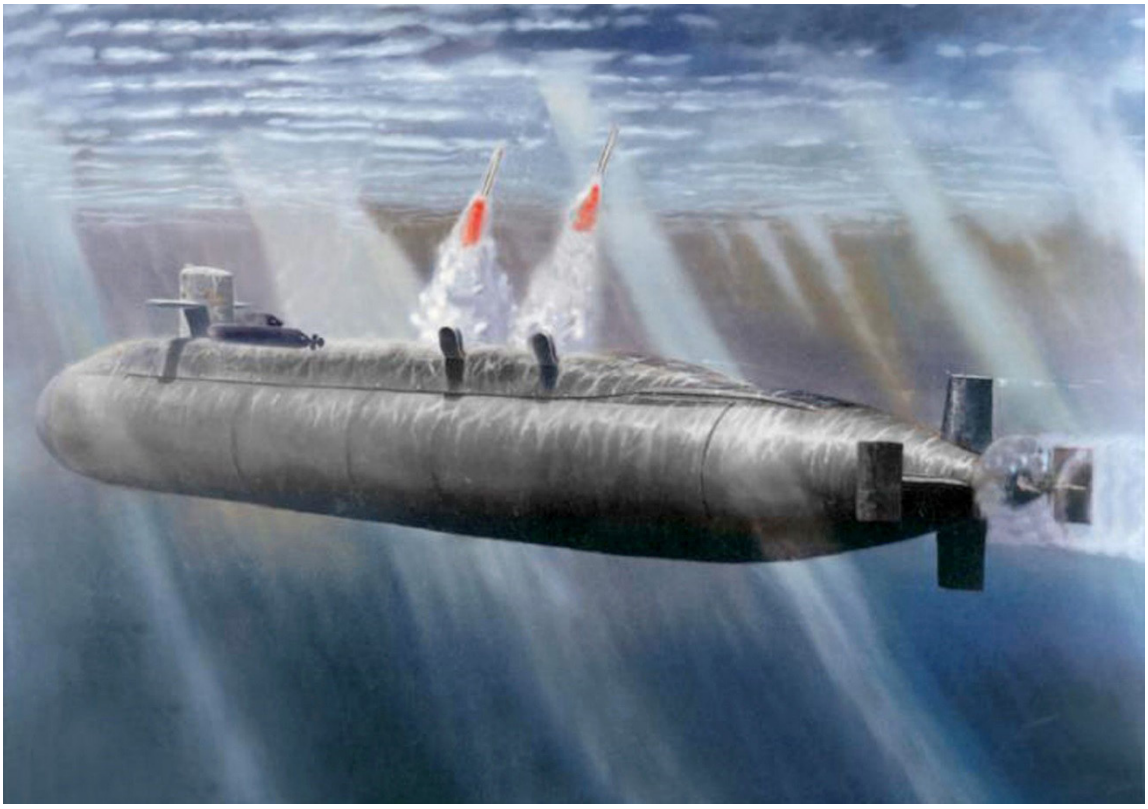


Figura 3. Tomawawk desde submarino clase Ohio. Fuente US Navy

que de, esta manera, generan el mayor daño estructural posible; también hay torpedos que emplean cabezas nucleares para multiplicar los efectos del alto explosivo convencional.

Tecnologías de los misiles antisuperficie lanzados desde submarinos

Los submarinos pueden ir armados con misiles antisuperficie, generalmente misiles antibuque y misiles de ataque a tierra que, a su vez, podrán ser misiles tácticos o balísticos. Los misiles embarcados en submarinos generalmente son lanzados por los tubos lanzatorpedos, a excepción de los misiles balísticos que suelen utilizar lanzadores verticales específicos.

Los sistemas de propulsión de los misiles utilizan habitualmente combustible sólido en su primera fase de aceleración y combustible sólido o líquido para las fases de aproximación y ataque.

Los misiles antibuque vuelan en régimen subsónico a muy baja altitud (3-4 m), de ahí su denominación de misiles 'rozaolas', con el fin de evitar ser detectado por los sistemas de defensa antimisil del buque objetivo. Generalmente están equipados con espoletas retardadas de contacto, diseñadas para penetrar en el blanco antes de hacer detonar la carga bélica que suele ser de, aproximadamente, 250 kg de alto explosivo alojados en su sección de combate, para de esta forma causar el máximo daño posible, además de incrementar el riesgo de explosiones secundarias.

En cuanto a los misiles tácticos de ataque a tierra, son misiles de crucero que se diseñan para llegar a cientos de kilómetros de distancia con una gran precisión, volando en régimen subsónico o supersónico mediante estatoreactores y a baja cota, para evitar ser detectados por los sistemas radar de defensa antiaérea. La carga bélica puede ser muy variada en función de la misión y se pueden encontrar típicamente cargas de explosivo convencional o cargas con cabezas nucleares.

Evolución de las tecnologías de armas utilizadas en plataformas submarinas

Tradicionalmente, los torpedos han sido el arma principal de los submarinos convencionales, pero cada vez han ido proliferando más el número de plataformas que cuentan con misiles, ya que los submarinos armados únicamente con torpedos no pueden efectuar lanzamientos efectivos a muy larga distancia y, a veces, se ven obligados a hacerlo a cortas distancias en condiciones adversas para el submarino.

Pero las nuevas tecnologías utilizadas en propulsión de torpedos están rompiendo este paradigma y, hoy en día, ya existen plataformas armadas con torpedos de supercavitación que alcanzan grandes distancias y velocidades.

Los torpedos basados en el efecto de la supercavitación emplean un motor cohete y un diseño específico del cono en la punta del torpedo, que desvía el escape del cohete vaporizando el agua líquida en un gas y creando una burbuja de gas alrededor de la superficie del arma. De este modo, se evita prácticamente el rozamiento del casco con el agua lo que permite alcanzar los 200 nudos. Aunque esta tecnología no es nueva, el primer torpedo ruso supercavitante *Shkval* ya fue diseñado en la década de los 60, ha planteado varios inconvenientes como el de la difícil maniobrabilidad, ya que las maniobras de cambio de rumbo complican mantener al torpedo confinado dentro de la burbuja de gas.

Además, plantean cierta complejidad en el empleo de los sistemas de guiado utilizados en los torpedos con

sistemas de propulsión convencional, debido al cambio de medio y a que la firma acústica de la supercavitación es muy significativa, lo que también dificulta su discreción. Sin embargo, todos estos problemas tecnológicos se están solventando en los últimos tiempos y se espera una proliferación de torpedos basados en esta tecnología de propulsión sobre la que varios países, especialmente Rusia, EEUU y China, mantienen una importante inversión en I+D, aunque también otros países trabajan en ello, como Alemania, que está desarrollando un torpedo supercavitante denominado *Superkavitierender Unterwasserlaufkörper.*

Por otra parte, se empiezan a incorporar a los torpedos sistemas de propulsión nuclear, lo que les confiere un alcance prácticamente ilimitado como armas estratégicas de alcance intercontinental, lo que estaba restringido exclusivamente a los misiles balísticos.

Las cargas bélicas de los torpedos han ido evolucionando y hay una tendencia a los efectos cinéticos, que empieza a cobrar interés debido al aumento de la velocidad de navegación y a otros tipos de efectos más sofisticados, como es el caso de los torpedos que incluyen cargas nucleares específicas, que pueden utilizarse para provocar tsunamis devastadores.

En general, se puede percibir que, debido al aumento progresivo de complejidad y funcionalidad, existe una inclinación a la fusión de conceptos clásicos de torpedo/misil con los vehículos no tripulados. Es decir, los torpedos evolucionan de simples proyectiles submarinos autopropulsados a plataformas submarinas no tripuladas (UUV). Este es el caso del Poseidón, con el nombre técnico *Status*-6, una plataforma no tripulada embarcada en el submarino nuclear ruso *Belgorod*, que puede recorrer hasta 10.000 kilómetros a una profundidad de hasta 1.000 metros con tecnología de supercavitación, alcanzando una velocidad de más de 100 nudos, transportando una carga termonuclear de alta potencia y que ha sido bautizado como el "torpedo del apocalipsis".

Figura 4. Lanzamiento de misil balístico intercontinental Trident II D5 desde submarino. Fuente US Navy

Algo similar ocurre con los misiles y las plataformas aéreas no tripuladas, que también están evolucionando a sistemas cada vez más complejos y más veloces y que tienden a la comunalidad (multimisión), como es el caso del misil "*Brahmos*" desarrollado por Rusia e India, que en su versión de lanzamiento desde submarino alcanza una velocidad supersónica de 2,8 a 3,0 *Mach* y que se puede emplear como misil antibuque o para alcanzar objetivos en tierra.

Además, los nuevos desarrollos tecnológicos en sistemas de propulsión para vuelo en régimen hipersónico están permitiendo que empiecen a surgir nuevos misiles como armas de tipo estratégica, que vuelan a una velocidad de al menos 5 *Mach,* o cinco veces la velocidad del sonido. Con estas tecnologías, estas armas pueden eludir o evitar los radares de alerta temprana y alcanzar rápidamente objetivos militares estratégicos a través de largas distancias algo que, tradicionalmente, sólo era posible empleando misiles balísticos. Pero a la vez, y a diferencia de éstos, no utilizan trayectorias balísticas, lo que significa que los sistemas de defensa antimisiles convencionales no tienen capacidad de interceptarlos.

Figura 5. Cabeza del torpedo ruso supercavitante VA-111 Shkval. Fuente Wikimedia

Conclusiones

A modo de conclusión, se puede prever que los esfuerzos en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de armas en misiles y torpedos permitirán a las plataformas submarinas su consolidación como sistemas de armas estratégicos. La tendencia es que el arma submarina siga jugando un papel relevante en el futuro.

Tecnologías de protección alternativas para las plataformas terrestres

Autor: Pablo Monasterio Albuerne, OT PTER, SDG PLATIN.

Palabras clave:
blindaje, protección pasiva, protección reactiva, protección activa, ERA, NERA, *soft kill, hard kill.*

Metas Tecnológicas relacionadas:
MT 1.1.2; MT 6.3.2.

Introducción

En cualquier operación militar el requisito imperante es siempre la seguridad del personal que participa en la misma, lo que también incluye las misiones realizadas con vehículos terrestres. Así, en estas misiones se busca, ante todo, la supervivencia de la tripulación, para lo cual resulta clave conseguir un adecuado nivel de protección de la plataforma.

Hasta hace poco, la forma de lograr ese grado de protección necesario para mantener a salvo a las tripulaciones de los vehículos era a base de añadir más capas de blindaje sobre la estructura, lo cual incrementaba considerablemente su peso.

El problema es que este aumento de peso repercute directamente en la capacidad de movimiento que posee el vehículo, socavándola en buena medida. Es por ello que, en los últimos años, se ha emprendido la búsqueda de soluciones innovadoras que confieran una protección balística adecuada sin llegar a incurrir en aumentos de peso significativos.

De esta manera, se ha intensificado la investigación en el campo de los materiales ligeros, obteniendo desarrollos basados en aleaciones ligeras, cerámicas, composites e incluso en la mezcla de todos ellos (multimateriales), los cuales han demostrado sus buenas aptitudes contra explosiones e impactos de proyectil.

No obstante, este tipo de desarrollos, si bien consiguen reducir notablemente el peso de los blindajes respecto a sus equivalentes metálicos, no son completamente invulnerables a algunas clases de armas y municiones, siendo conveniente contar con medios de protección complementarios que supongan una defensa añadida a la protección pasiva.

Es por esta razón que se ha abordado, paralelamente, el desarrollo de nuevas tecnologías de protección independientes de los blindajes pasivos tradicionales, entre las cuales destacan los blindajes reactivos y los sistemas de protección activa.

Protección reactiva

La protección reactiva, si bien comparte ciertas analogías con la protección pasiva convencional, tiene su peculiaridad en la capacidad de "reacción" del material una vez se ha producido el impacto.

De esta forma, el material empleado como blindaje es capaz de modificar su comportamiento para hacer frente al proyectil, contrarrestándolo o mitigando el daño producido.

Existen dos tipos fundamentales de tecnologías de protección reactiva: los blindajes ERA (*Explosive Reactive Armour*) y NERA (*Non-Energetic Reactive Armour*).

Figura 1. Tanque norteamericano con blindaje ERA

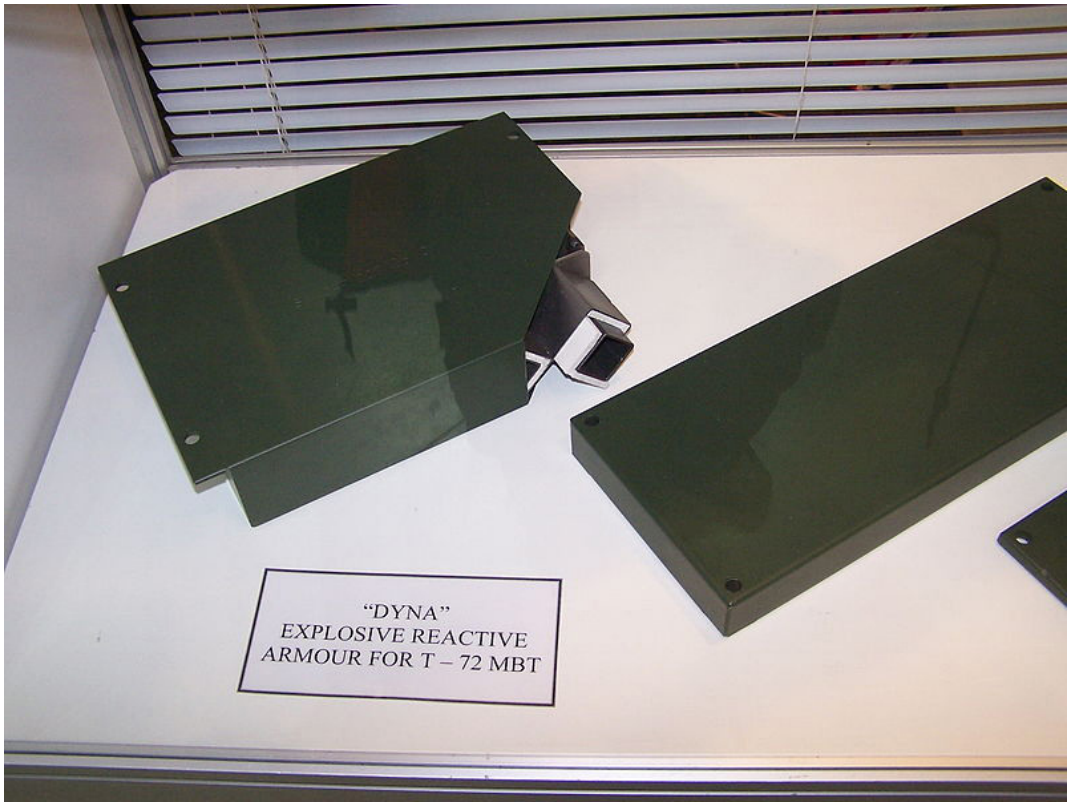


Figura 2. Ejemplo de ladrillo de blindaje reactivo

ERA: en este primer caso, se emplea material altamente explosivo que se confina entre placas de acero, conformando módulos que son dispuestos sobre la estructura del vehículo. Así pues, cuando se produce el impacto del proyectil sobre el módulo ERA, el material explosivo detona, proyectando la placa de acero hacia afuera, que perturba o daña al proyectil. Esta perturbación del proyectil mediante la placa metálica que se proyecta contra él se traduce en una mayor longitud efectiva de material a penetrar, lo que incrementa la protección.

NERA: en este segundo caso, se trata de materiales elásticos (como el caucho) que se combinan con metales (normalmente acero, aluminio o titanio) en forma de láminas. De este modo, se tiene una capa intermedia de material elástico confinada entre dos placas metálicas, creando una especie de sándwich. El mecanismo de funcionamiento de este sistema es parecido al anterior, aunque se origina por un principio físico diferente: cuando tiene lugar el impacto sobre el blindaje, el caucho se comprime hasta el punto de máxima compresión, para expandirse de nuevo y rebotar. Esto produce el desplazamiento de más material hacia la trayectoria de penetración del proyectil y el consiguiente abultamiento del blindaje en esa zona, lo que provoca la destrucción de proyectiles finos y frágiles, tales como las boquillas en forma de carga de cabezas antitanque altamente explosivas, que son usadas comúnmente en misiles guiados antitanque (ATGM) y granadas propulsadas por cohete (RPG). Básicamente, NERA funciona como un blindaje reactivo explosivo pero con mucho menos movimiento de placas, dado que únicamente reutiliza la energía del proyectil que impacta en lugar de emplear una fuente de energía externa (como la detonación de una capa explosiva) para mover las placas de metal. El resultado de esto es que los NERA son más indicados que los ERA si lo que se busca es prevenir que la reacción del blindaje pueda causar daños en la estructura del vehículo.

Así pues, la clave para detener penetradores de varilla larga es fracturarlos al impacto, aunque en algunos casos el penetrador cinético puede desviarse o incrustarse en el blindaje, si bien esto es raro. Como consecuencia de ello, la inmensa mayoría de los módulos de blindaje modernos emplean una fina lámina de un material muy duro en la cara de impacto del blindaje para destruir el penetrador al impacto. Este material puede ser tungsteno, acero de alta dureza, acero nanométrico, entre otros.

Tanto los sistemas ERA como los NERA llevan ya algunas décadas en servicio en diferentes ejércitos del mundo, por lo que están bastante consolidados, a lo cual ha contribuido en buena parte la simplicidad de las tecnologías de las que hacen uso.

Las protecciones reactivas tienen el inconveniente de que, por lo general, solo son capaces de neutralizar un único proyectil lanzado sobre un mismo punto del blindaje, pudiendo fallar si se produce más de un impacto sobre ese punto. Otro de los inconvenientes asociados a esta tecnología es el daño que la explosión del material puede ocasionar en la plataforma e incluso en unidades aliadas situadas junto a ella. En este respecto, los NERA son menos dañinos que los ERA y ofrecen una capacidad multiimpacto superior, si bien brindan una menor protección.

Existen otras tecnologías de protección reactiva, las cuales son menos comunes o se encuentran aún en fase de desarrollo. Entre ellas se puede citar el blindaje reactivo eléctrico, que está actualmente en desarrollo y se basa en aplicar una descarga eléctrica de gran voltaje sobre el proyectil entrante, o el blindaje reactivo de energía dirigida, el cual es similar al ERA, pero proyectando directamente la energía de la explosión sobre el proyectil.

Protección activa

Los sistemas de protección activa son radicalmente diferentes de los blindajes pasivos y reactivos, desde la perspectiva de que no "esperan" a que el proyectil impacte sobre la

plataforma, sino que lo detectan con antelación y lo contramiden, neutralizándolo antes de que llegue a hacer contacto con la misma.

Así pues, este tipo de sistemas emplea, en primer lugar, un conjunto de tecnologías para la detección, identificación y monitorización de la amenaza, las cuales aprovechan las distintas firmas emitidas por el proyectil (visual, térmica, acústica y radiofrecuencia). Por lo general, se refieren a pequeños radares y sensores EO/IR, que tienen la capacidad de detectar y rastrear proyectiles a cierta distancia, así como a técnicas de procesado de imagen para llevar a cabo la identificación y clasificación del proyectil en cuestión, que determinan si representa o no una amenaza para la plataforma y si es necesario contramedirla (y de qué manera).

Una vez ha tenido lugar la fase de detección e identificación, y en caso de que se concluya que el proyectil detectado supone una amenaza, se da paso a la etapa de neutralización, que puede llevarse a cabo de dos maneras: *soft kill* o *hard kill*.

Sistemas *soft kill*: tienen por objetivo desarmar el proyectil, desactivándolo o desviándolo de su trayectoria, para lo que buscan interferir en su sistema de guiado. Algunos ejemplos de estas tecnologías son los perturbadores infrarrojos, imitadores de mira láser o perturbadores radar (*jammer*), las cuales se centran en vencer a los sistemas electro-ópticos e infrarrojos del proyectil o en inhibir la señal de guiado por radiofrecuencia. No obstante, tienen el inconveniente de que es complicado cubrir el espectro completo de frecuencias y longitudes de onda que les permita ser efectivas ante una amplia gama de amenazas.

Sistemas *hard kill*: pretenden la destrucción del proyectil mediante el uso de potencia de fuego. De esta forma, se dispara munición contra el proyectil a abatir para provocar la detonación a distancia del mismo. Normalmente, la munición empleada consiste en granadas de fragmentación preprogramadas, si bien se contempla el uso de armas de energía dirigida en un futuro próximo.

Los sistemas de protección activa son relativamente recientes y su implantación en los ejércitos de los países ha sido, hasta el momento, limitada. Esto es debido, principalmente, a la elevada complejidad técnica que entraña su desarrollo, derivada en parte de las múltiples tecnologías que intervienen y la necesidad de sincronizarlas para que operen con tiempos de respuesta ínfimos. Como consecuencia de ello, pocos han sido los países que han logrado poner, sobre el campo de batalla, sistemas de protección activa que hayan demostrado un grado de eficacia aceptable. Algunos ejemplos de estos sistemas son el TROPHY de Rafael, el *Iron Fist* de IMI o el sistema ruso *Afghanit*.

Figura 3. Sistema de protección activa Iron Fist

Otro de los inconvenientes que tienen es su potencial de causar daños colaterales a unidades aliadas cercanas como consecuencia de la detonación de los proyectiles.

No obstante, debido al progreso que se está haciendo en este campo y a las múltiples ventajas táctico-operativas que un sistema de estas características puede aportar, cada vez son más los países interesados en adquirirlos e incluso desarrollarlos.

Los sistemas de protección activa son una buena muestra de que es posible proteger una plataforma sin necesidad de incrementar excesivamente el peso de la misma. En este sentido se espera que, en un futuro, esta tecnología permita prescindir de parte de los blindajes pasivos sin que ello repercuta negativamente en el nivel de protección global del vehículo, haciendo a la plataforma mucho más ligera.

Conclusiones

La rápida evolución del armamento empleado contra las plataformas terrestres ha obligado a mirar más allá de los blindajes pasivos tradicionales, buscando nuevas tecnologías de autoprotección basadas en principios físicos diferentes con el fin de cubrir un espectro de amenaza más amplio.

Así surgieron los sistemas de protección reactiva, en primer lugar, y los de protección activa, más recientemente. "En el futuro, se espera que continúen apareciendo nuevas tecnologías de protección para dar respuesta a los sistemas de armas que surjan, habiendo de dedicar esfuerzos a investigar en medios capaces de neutralizar a las nuevas tecnologías de ataque."

Radares 3D para sistemas C-UAS

Autores: Javier Carretero Moya, Jordi Riera Sanz, José María Peña Espartero, *Advanced Radar Technologies* S.A.

Palabras clave: radar de vigilancia aérea, radares 3D, sistemas C-UAS, sistemas anti-dron.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 2.2.3; MT 2.2.5; MT 3.2.1.

Introducción

En septiembre de 2019 los graves ataques contra las instalaciones de procesamiento de petróleo de Saudi Aramco en Abqaiq y Khurais (Arabia Saudí) supusieron la materialización definitiva del grave riesgo para la seguridad que representa la utilización hostil de aeronaves tripuladas remotamente. Incidentes posteriores, como la suspensión de vuelos en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid Barajas en febrero de 2020, fueron una nueva confirmación de la necesidad crítica de desplegar medios de protección efectivos ante este tipo de amenazas.

Estos ejemplos ponen ya de manifiesto dos aspectos clave de este problema: la muy diferente naturaleza de los emplazamientos a proteger, junto con la gran diversidad de las posibles amenazas como desde la utilización negligente de pequeños cuadricópteros hasta el uso hostil de grandes aeronaves no-tripuladas. Además, el campo de las aeronaves no tripuladas está en una fase de muy rápido desarrollo, lo que da lugar a una rápida evolución de la amenaza según se producen nuevos avances en las tecnologías de base como, por ejemplo, las baterías de altas prestaciones.

Para hacer frente a este riesgo es necesario desplegar soluciones integradas C-UAS que, mediante la combinación de diferentes tecnologías, puedan proporcionar una solución de nivel de sistema capaz de satisfacer las necesidades operacionales clave (figura 1):

- **Alerta temprana:** la detección y seguimiento de las posibles amenazas desde mucho más allá del perímetro de la instalación o activo a proteger**.**
- **Conciencia situacional:** proporcionar una visión conjunta unificada de la situación que permita agilizar y hacer eficiente la toma de decisiones.
- **Capacidad de reacción:** maximizar el tiempo disponible para poder efectuar las tareas de neutralización de la amenaza.

Los radares activos son elementos imprescindibles en los sistemas integrados C-UAS. Si bien desde hace años existen en el mercado radares capaces de detectar y realizar el seguimiento de amenazas aéreas de baja sección radar, muchos de los sistemas disponibles tienen carencias derivadas de ser adaptaciones de sensores desarrollados inicialmente para otras aplicaciones. Este es el caso, por ejemplo, de algunos sensores C-UAS comercializados actualmente y que están basados en radares tácticos de infantería con coberturas limitadas tanto en acimut como en elevación.

El objetivo de este artículo es presentar las capacidades de los radares C-UAS de última generación, destacando especialmente las grandes

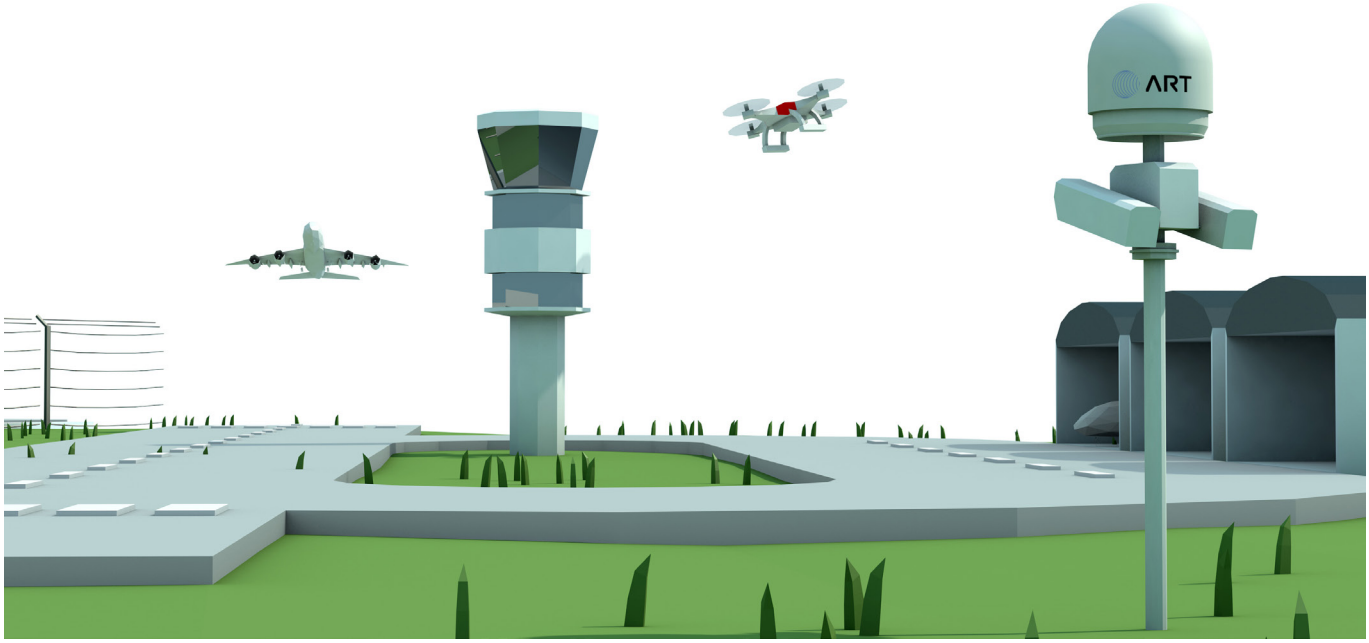


Figura 1. Concepto de sistema C-UAS

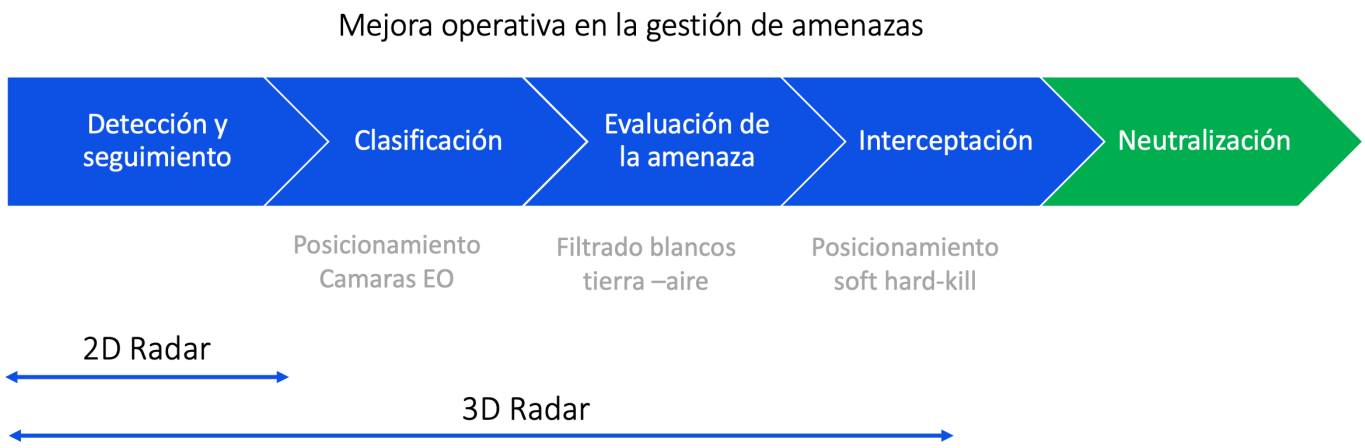


Figura 2. Flujo de gestión de la amenaza y contribución de los radares 2D/3D

ventajas operacionales que proporcionan los radares 3D diseñados específicamente para esta aplicación.

Radares 3D en sistemas integrados C-UAS

La figura 2 muestra el flujo de gestión de una posible amenaza en un sistema integrado C-UAS. El proceso arranca con la detección y seguimiento de la amenaza, función llevada a cabo fundamentalmente por un radar activo pero, en algunos casos, apoyado por otros sensores, como los detectores de radiofrecuencia. Tras esta primera alerta temprana es necesario abordar tanto la clasificación del blanco detectado como la evaluación de su peligrosidad / criticidad como amenaza. En estos pasos intervienen típicamente elementos como los sistemas electroópticos o los analizadores de protocolos C-UAS, así como otras fuentes de información disponibles, incluso externas al propio sistema (inteligencia). El proceso culmina con la activación de algún dispositivo de interceptación que tiene como objetivo último neutralizar la amenaza.

Los radares 3D, al ser capaces de proporcionar una medida directa de la altura de vuelo de los blancos, contribuyen a simplificar y a hacer más eficientes todos los pasos anteriormente mencionados:

Clasificación: contar con una medida directa y precisa de la altura de vuelo hace mucho más rápido y eficaz el apuntamiento de un sistema electroóptico de altas prestaciones y, por tanto, de campo de visión estrecho. En las soluciones C-UAS que no integran un radar 3D, los sistemas electrópticos tienen que realizar una búsqueda en elevación del blanco, proceso lento y sujeto a errores que dificulta el conseguir una clasificación en un tiempo suficientemente corto. Además, la dinámica tridimensional de la posible amenaza es un elemento más a tener en cuenta en los algoritmos de clasificación automática. La evolución con el tiempo de la altura de vuelo es muy diferente entre, por ejemplo, un cuadricóptero y un ave, y esta propiedad puede ser explotada en algoritmos de clasificación basados en aprendizaje automático.

Evaluación de la amenaza: los radares 3D hacen posible la discriminación inmediata entre blancos en tierra y en el aire. Esto es especialmente importante debido a que muchas de las amenazas aéreas emergentes son de tipo LSS (*low – slow – small*), lo que obliga a iluminar el horizonte con el sistema radiante del radar y tiene por consecuencia la detección de los blancos en tierra. Por otro lado, en

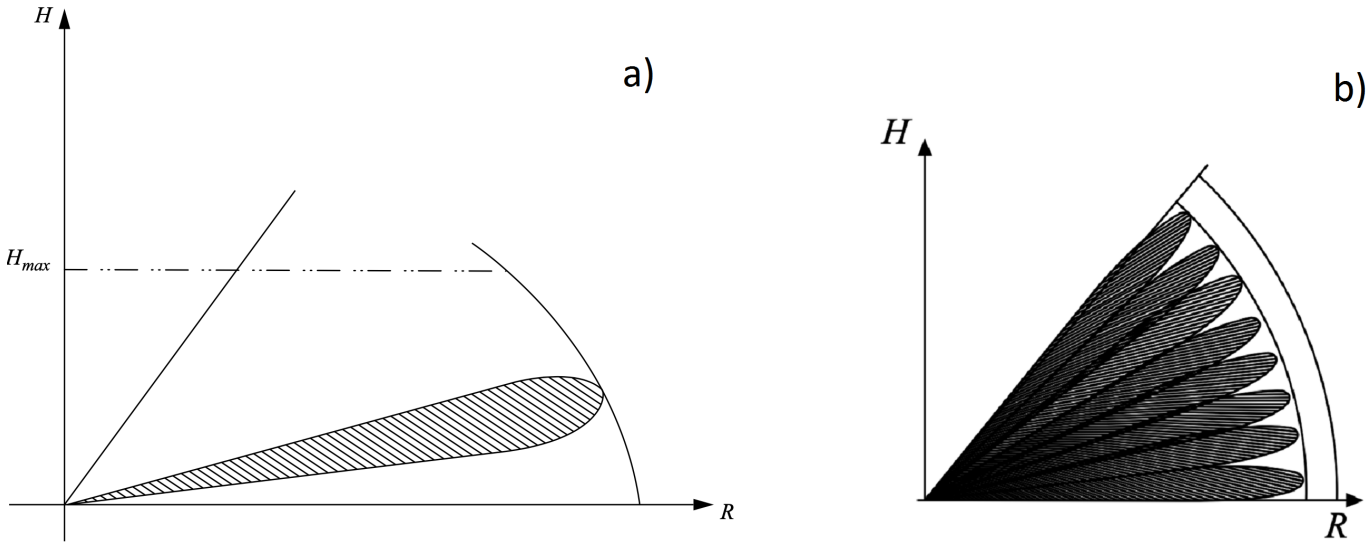


Figura 3. Obtención del ángulo de incidencia en elevación. Escaneo secuencial en elevación (3a) y multi-haz (3b)

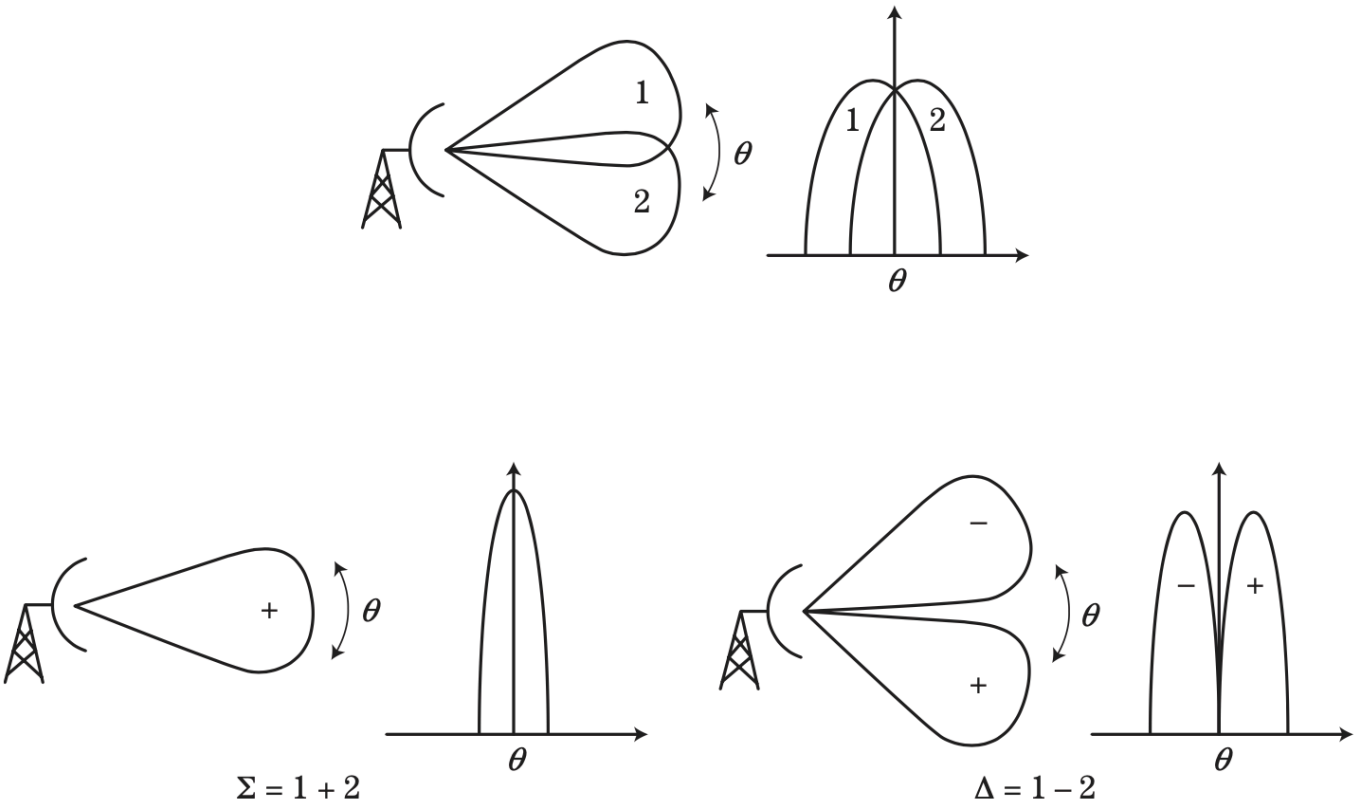


Figura 4. Diagramas suma y diferencia

determinados contextos, como el aeroportuario, el grado de criticidad de una amenaza está determinado por su posición tridimensional en las proximidades del activo a proteger. La amenaza que supone un blanco puede ser muy diferente en función de la altura a la que esté situado en relación con las operaciones del entorno.

Interceptación: muchos de los sistemas de interceptación que se están utilizando en sistemas C-UAS son directivos y por tanto requieren ser posicionados en elevación. Este es el caso, por ejemplo, de los sistemas de energía dirigida. La información de la altura de vuelo es por tanto fundamental para garantizar el éxito de la fase de interceptación.

Las consideraciones anteriores demuestran claramente que la disponibilidad de información 3D permite ahorrar tiempo y ejecutar de forma eficiente todos los pasos que conducen a la neutralización de la amenaza. Esto es especialmente importante teniendo en cuenta la rápida evolución de hasta los UAS más básicos, que consiguen altas velocidades y gran autonomía con dimensiones muy reducidas. Por tanto, es fundamental ejecutar todos los pasos en el flujo de gestión de las potenciales amenazas de la manera más óptima y eficiente posible para hacer factible su neutralización a tiempo.

Tecnología radar 3D C-UAS

Los radares 3D obtienen una estimación de la altura de vuelo de los blancos a partir de la medida del ángulo de incidencia en la antena de los retornos radar procedentes de los mismos. Para ello se recurre a diversas técnicas, siendo los enfoques más frecuentes los siguientes:

Escaneo secuencial de la región de elevación de interés con un único haz de tipo pincel. En estos

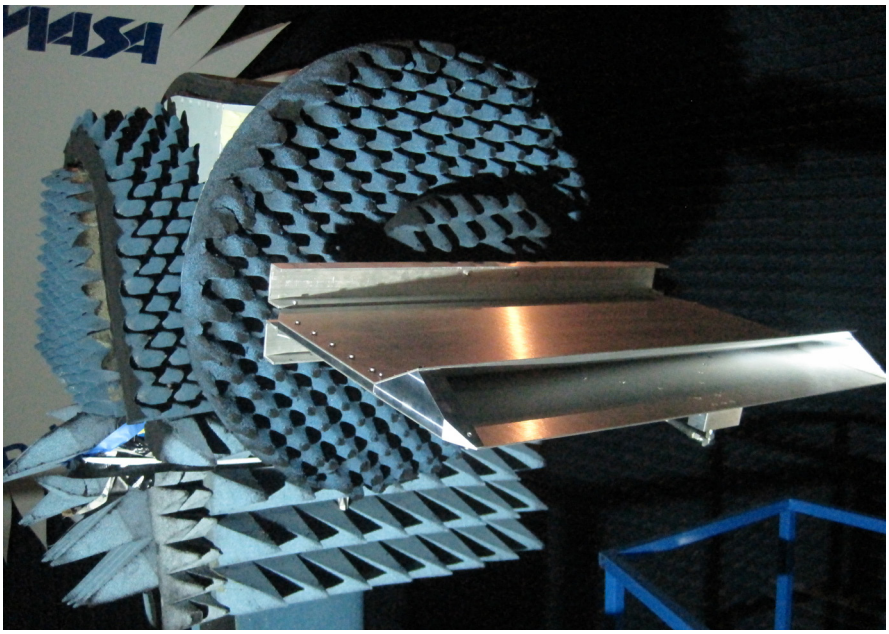


Figura 5. Caracterización de un elemento radiante de un radar 3D en cámara anecoica

Figura 6. ART Midrange 3D

sistemas un haz estrecho es dirigido a través de un patrón de escaneo para construir una imagen tridimensional (figura 3a).

Multi-haz en transmisión y/o recepción. En estos sistemas se utilizan un número variable de haces simultáneos orientados hacia distintos ángulos de elevación. El ángulo de incidencia se puede obtener mediante la comparación de los retornos recibidos en cada uno de los haces (figura 3b).

Las diferencias en prestaciones entre ambas técnicas se hacen relevantes en entornos de operación limitados por *clutter* en los que el tiempo de iluminación sobre los blancos afecta directamente a la eficiencia del procesado *Doppler*. Los sistemas multi-haz permiten periodos más largos de iluminación sobre los blancos y por tanto proporcionan mejores prestaciones que los sistemas con exploración en elevación. No obstante, esta mejora de prestaciones implica una mayor complejidad derivada de la necesidad de implementar varios canales de recepción simultáneos y una potencial pérdida de eficiencia consecuencia de estar iluminando constantemente la misma región en elevación y no una sección concreta configurable en función de la situación. En el contexto de las amenazas aéreas emergentes, los sistemas multi-haz resultan de especial interés al no tener que repartir el tiempo del sensor entre las distintas elevaciones y por tanto proporcionar velocidades de renovación de la información mucho más rápidas.

El concepto actual de radar C-UAS es similar al de un radar 3D de vigilancia aérea en los que se realiza un escaneo en acimut (mecánico o electrónico) y varios haces adyacentes y simultáneos en elevación permiten la implementación de técnicas de procesado para obtener el ángulo de incidencia de la señal recibida de los blancos. Tras una serie de etapas de procesado en las que se realiza el acondicionamiento de las múltiples medidas obtenidas del ángulo de incidencia, es finalmente la algorítmica de seguimiento la que realiza tanto el filtrado de las medidas obtenidas como la conversión de ángulo de incidencia a altura de vuelo. Debido a las características de esta aplicación, este proceso tiene que ser efectuado en tiempo real y para todos los blancos detectados por el radar.

Obtención de la altura de vuelo del blanco

El primer paso para la obtención de la altura de vuelo es la medida del ángulo de incidencia del retorno radar procedente del blanco. Existen varias técnicas, algunas aplicables a sensores con exploración y otras para los basados en múltiples haces simultáneos. En general, todas las técnicas de procesado tienen por objetivo proporcionar prestaciones mejores que las de la estimación angular trivial cuya precisión es del orden del ancho de haz a 3 dB de los haces empleados. Ejemplos típicos de estos algoritmos de extracción en radares de exploración son la técnica de ventana deslizante o la determinación de centroides [1].

En los sistemas basados en múltiples haces en elevación, y a partir de un conocimiento muy preciso del diagrama de radiación completo del sistema de antenas, es posible obtener la posición angular relativa del blanco comparando la señal recibida en dos haces adyacentes. Más concretamente, es frecuente sintetizar dos diagramas a partir de la señal de dos haces: el conocido como diagrama suma y el diagrama diferencia (figura 4). La ratio entre la señal recibida procedente del blanco en cada uno de los dos diagramas sintetizados permite obtener la posición angular relativa del mismo con gran precisión, al menos un orden de magnitud mejor que el ancho a 3 dB de los haces de partida.

La distancia angular respecto del máximo de apuntamiento de cada par de haces se obtiene a través de la ratio entre el diagrama diferencia y el diagrama suma. Al emplear valores relativos, el valor obtenido es independiente de la amplitud y la fase de la señal de entrada. De esta forma y gracias a requerir únicamente un pulso para la medida del ángulo de llegada, es posible evitar los errores debidos a la variación pulso a pulso de la posición de los blancos o modulaciones de amplitud.

Asimismo, la precisión de la medida está determinada por la relación señal a ruido según la siguiente expresión [1]:

$$\Delta\theta \cong \frac{\theta_b}{k_m\sqrt{2SNR}}$$

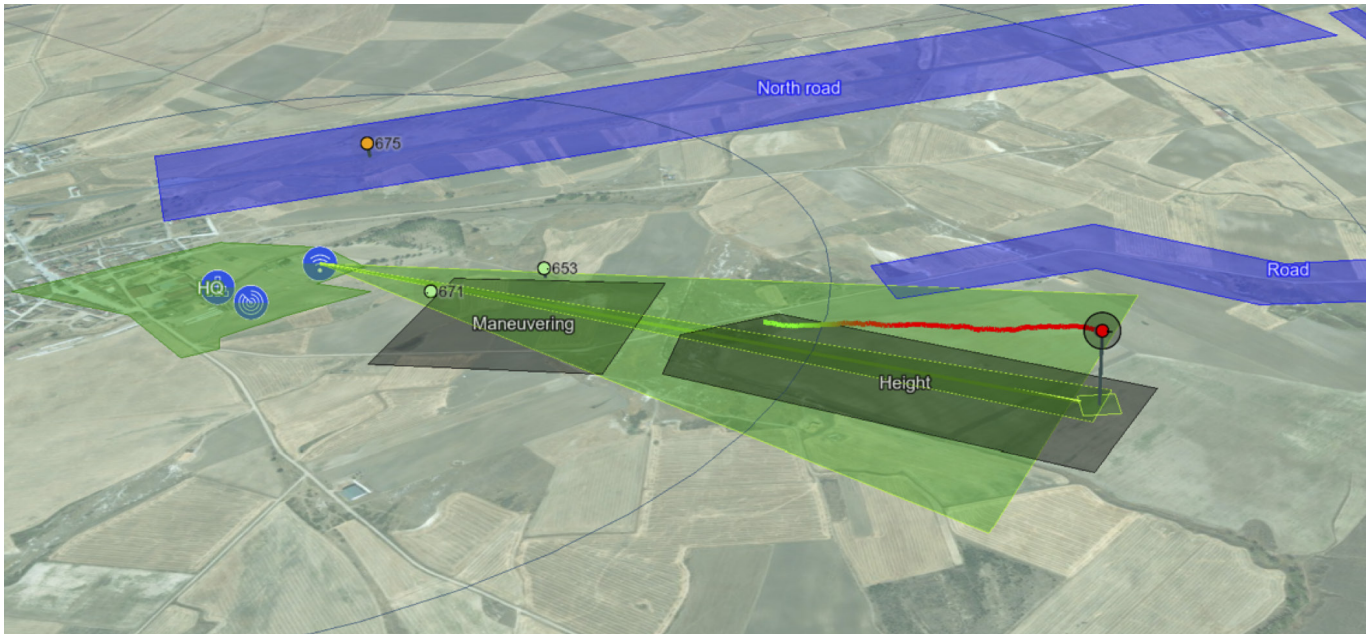


Figura 7. Trayectoria 3D correspondiente a un vuelo real de un DJI Phantom IV mostrada en el software de mando y control multi-sensor ART HMI

que relaciona la precisión en la medida del ángulo de incidencia $\Delta\theta$ con el ancho de haz θ_b, y la relación señal a ruido SNR. k_m es una constante que depende fundamentalmente de la pendiente de la curva que relaciona la ratio entre diagramas y el ángulo de incidencia.

Existen dos variantes de esta técnica en función de si la medida del ángulo de incidencia está basada en la comparación de la fase o de la amplitud de las señales recibidas. En el primer caso, se apuntan los haces en la misma dirección presentando cada uno un centro de fase independiente e infiriendo la distancia angular a partir de la diferencia de fase entre los diagramas. En el segundo caso los haces apuntan equidistantes con respecto del máximo de apuntamiento obteniéndose la información angular a partir de la diferencia de amplitud de los diagramas.

La implementación de estas técnicas de estimación angular conlleva el cálculo de la ratio entre diagramas para todas las detecciones del radar. Tras el cálculo de la ratio se asigna a cada detección el ángulo correspondiente a ese valor mediante la aplicación de una tabla de calibración almacenada en el sensor.

La tabla de calibración se puede obtener a partir de los diagramas de radiación del sistema radiante del radar medidos en una cámara anecoica (figura 5). Además, son necesarias compensaciones adicionales, para tener en cuenta el efecto del resto de componentes pasivos y activos que se incluyen entre las antenas y el detector radar como son las cadenas de recepción, el cableado y dispositivos de adaptación previos a la conversión analógico-digital.

Radares 3D C-UAS de última generación

Las amenazas aéreas más relevantes son blancos de pequeño tamaño y, por tanto, presentan secciones radar muy reducidas. Esto hace necesaria la utilización de sensores radar de altas prestaciones que hagan posible su detección a distancias que den lugar al tiempo de reacción necesario. Muchos cuadricópteros comerciales pueden alcanzar actualmente velocidades de casi 100 km/h. Es preciso, por tanto, llevar a cabo su detección a varios kilómetros de distancia para conseguir algunos minutos de tiempo de reacción. Además, son blancos que generalmente vuelan a baja altura y a relativa baja velocidad. Estas tres características, baja sección radar, baja velocidad y baja altura de vuelo los convierten en virtualmente invisibles para los radares de defensa aérea actualmente en operación. Esto quedó demostrado con el incidente en Arabia Saudí anteriormente mencionado en el que los sistemas Patriot de la zona fueron incapaces de detectar las aeronaves utilizadas. Es preciso por tanto emplear sensores radar específicamente diseñados para este tipo de amenazas.

Con el fin de demostrar si el posicionamiento 3D de las amenazas proporcionado por un sensor radar basado en un sistema de antenas multi-haz en elevación es válido para dar soporte a las tareas presentadas en la Sección 2, se han llevado a cabo múltiples ensayos de campo con blancos representativos. Para ello se ha empleado el radar 3D comercial ART *Midrange* 3D (figura 6) y dos blancos especialmente relevantes por su pequeño tamaño.

Resultados en pruebas reales durante operación

En primer lugar, se van a presentar los resultados obtenidos con el ART *Midrange* 3D en la determinación de la altura de vuelo de un DJI *Phantom* IV (1380 gramos de peso). Este cuadricóptero se está utilizando como el blanco de referencia para la caracterización de las prestaciones de los sistemas C-UAS ya que es un modelo comercial muy extendido. Durante las pruebas de campo realizadas se caracterizan los alcances máximos, las prestaciones ante distintas maniobras y la medida de la altura de vuelo. Las detecciones reportadas por los radares son almacenadas y se analizan posteriormente con la infor-

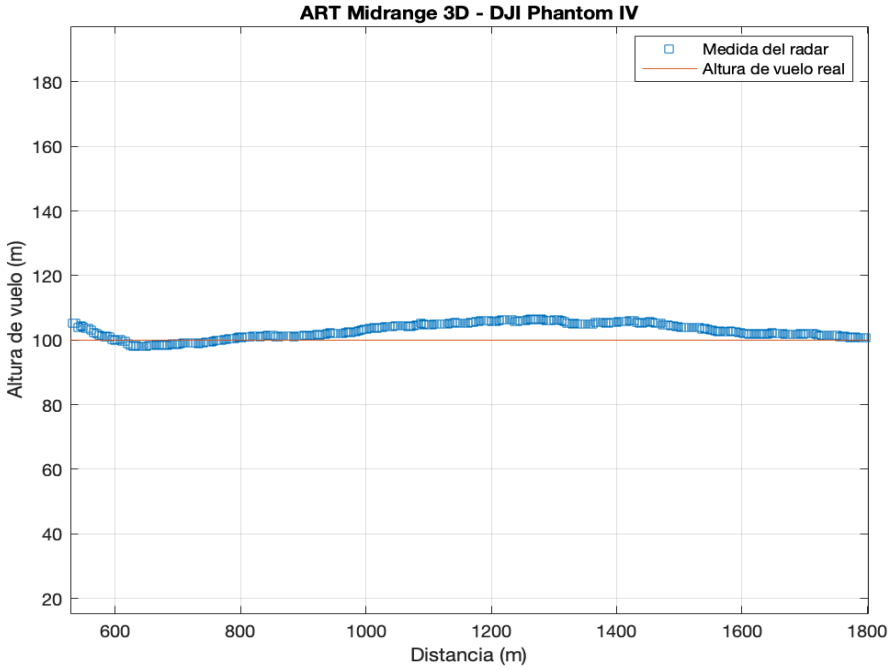


Figura 8. ART Midrange 3D. Resultados de campo para la medida de la altura de vuelo de un DJI Phantom IV

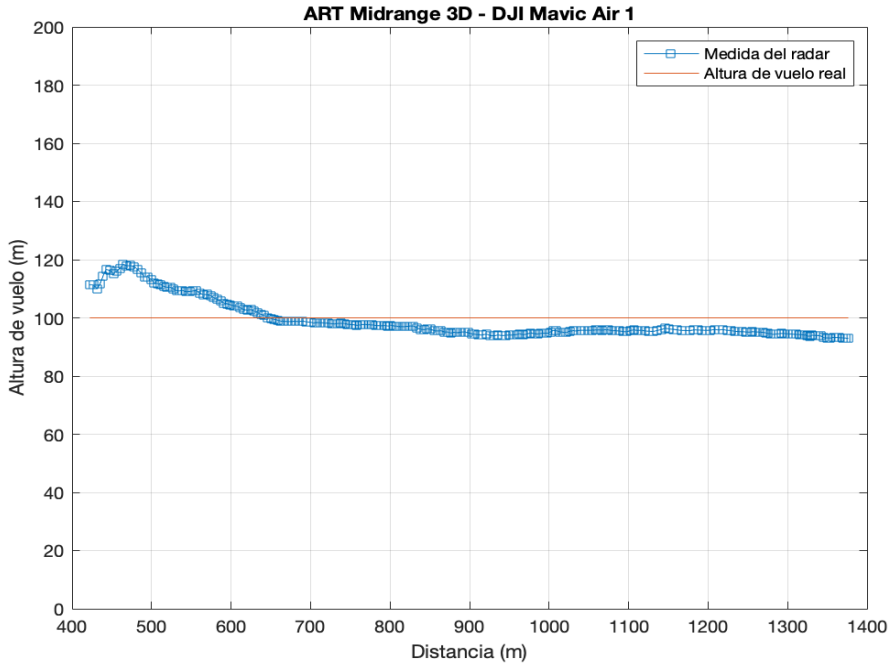


Figura 9. ART Midrange 3D. Resultados de campo de la medida de la altura de vuelo de un DJI Mavic Air 1

mación GPS almacenada por el propio UAS de los vuelos. En la figura 7 se puede observar la información reportada por el radar en el *software* de mando y control ART HMI, donde se identifican también las zonas donde se realizan los distintos ejercicios. En la misma figura se puede observar el rastro histórico de la altura de vuelo del UAS representado con un código de color.

La figura 8 muestra la precisión obtenida en la medida de la altura de vuelo de un DJI *Phantom* IV con el sistema radar ART *Midrange* 3D (cuadrados azules en la figura). La altura real de vuelo durante el ensayo de campo correspondiente a la figura son 100 metros (línea roja en la figura). Se puede observar la gran precisión de las medidas obtenidas que cuantitativamente es de 2.89 metros de desviación típica.

El error en la medida de la altura de vuelo es inversamente proporcional a la relación señal a ruido del blanco. Teniendo en cuenta la baja sección radar del blanco empleado para la prueba mostrada en la figura, es posible considerar los resultados mostrados como un caso peor.

En segundo lugar, se muestran los resultados obtenidos para un DJI *Mavic Air* 1, para mostrar las prestaciones con un cuadricoptero de dimensiones extremadamente reducidas (430 gramos de peso, dimensiones 168×184×64mm, largo x ancho x alto), con una sección radar significativamente menor que 0.01m^2. En este caso la desviación típica obtenida para el error en la medida de la altura de vuelvo sube ligeramente hasta los 6.58 metros siendo aún un resultado muy notable teniendo en cuenta el muy pequeño tamaño del blanco.

Conclusiones

Las prestaciones de los sistemas integrados C-UAS pueden mejorar significativamente si el sensor radar empleado es 3D. La disponibilidad de la altura de vuelo de los blancos permite efectuar de forma más rápida y eficiente todos los pasos en el flujo de gestión de una amenaza. En el artículo se han presentado resultados de campo obtenidos con un radar 3D comercial que demuestran que los sensores equipados con sistemas de antenas multi-haz en elevación pueden proporcionar una muy buena precisión en la medida de la altura de vuelo de blancos no-cooperativos. El error de medida, del orden de algunos metros en un amplio rango de distancias y para dos blancos representativos, hace posible que este dato sea explotado por el resto de los elementos del sistema C-UAS para facilitar la gestión de la amenaza, en tareas como su clasificación o evaluación hasta el objetivo último, su neutralización.

Referencias

[1] Richards, M. A., Scheer, J. A., & Holm, W. A. (2010). *Principles of Modern Radar: Basic principles.* **(Richards, Scheer, & Holm, Eds.).** *Institution of Engineering and Technology.* **https://doi.org/10.1049/SBRA021E**

UPMSat-2: El micro-satélite universitario español de demostración tecnológica en órbita

Autores: Elena Roibás Millán, Javier Pérez-Álvarez, Ángel Sanz-Andrés, Gustavo Alonso, Santiago Pindado, Instituto Universitario de Microgravedad *'Ignacio Da Riva'* (IDR/UPM), Universidad Politécnica de Madrid.

Palabras clave: micro-satélite, tecnología espacial.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 3.5.6.

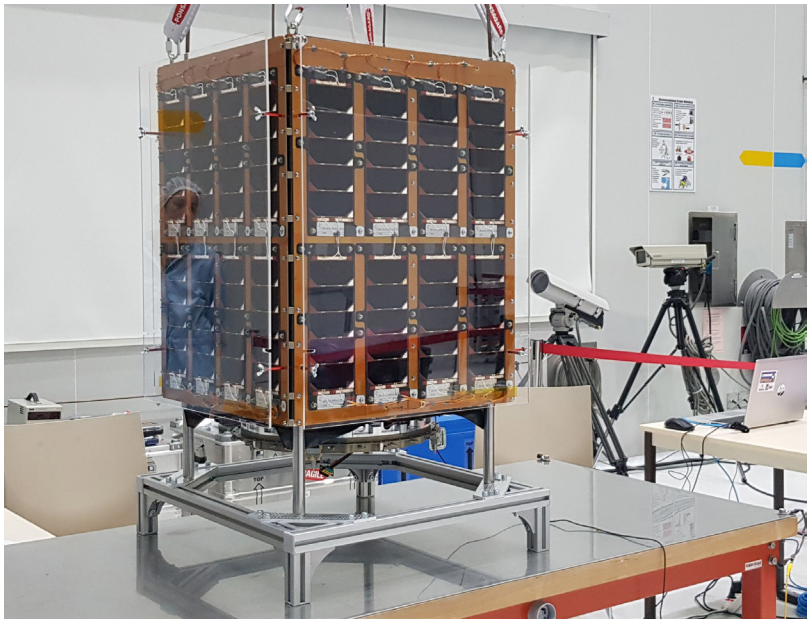


Figura 1. El UPMSat-2 durante su integración en Kourou (Fuente: IDR/UPM)

Introducción

En los próximos meses está previsto el lanzamiento del microsatélite universitario UPMSat-2 con el lanzador VEGA, en el vuelo VV-16 (SSMS-POC), y desde la estación de lanzamiento de *Arianespace* en Kourou (Guayana Francesa). La Figura 1 presenta una imagen del UPMSat-2 durante su integración en Kourou.

El UPMSat-2 es una iniciativa universitaria, llevada a cabo por el Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" (IDR/UPM) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Se da la circunstancia de que este es el único grupo de investigación universitario español que ha sido capaz hasta el momento de desarrollar con éxito un satélite de 50 kg, el UPMSat-1 lanzado en 1995 (históricamente, esta fue la décima misión universitaria a nivel mundial [1]).

El UPMSat-1, fue lanzado como carga de pago secundaria en el vuelo V75 de un lanzador Ariane IV-40, cuyo cliente principal fue el satélite de teledetección militar Helios 1A, y es un ejemplo más de la vocación del Instituto IDR/UPM sirviendo de apoyo y también viéndose apoyados por la industria espacial española mediante la colaboración en programas de ingeniería espacial y con la formación de ingenieros especializados en tecnología espacial.

Además de la gran relevancia que han tomado los satélites pequeños (nanosatélites de hasta 10 kg y microsatélites de hasta 200 kg) para la comunidad científica y universitaria, se puede destacar una creciente importancia de estas plataformas desde el punto de vista militar. Sus posibles usos varían desde labores de reconocimiento a la asistencia en combate, en tierra y operaciones marítimas, pasando por su posible uso en guerra electrónica o previsión meteorológica.

Los satélites pequeños tienen la ventaja de su rápido despliegue a partir de plataformas ya desarrolladas (este es el caso claro de los *Cubesat*, pero también de plataformas algo más grandes como los UPM-SAT), y el uso de constelaciones de satélites que permitan tanto la vigilancia de áreas localizadas sobre la superficie terrestre, como la respuesta rápida ante amenazas.

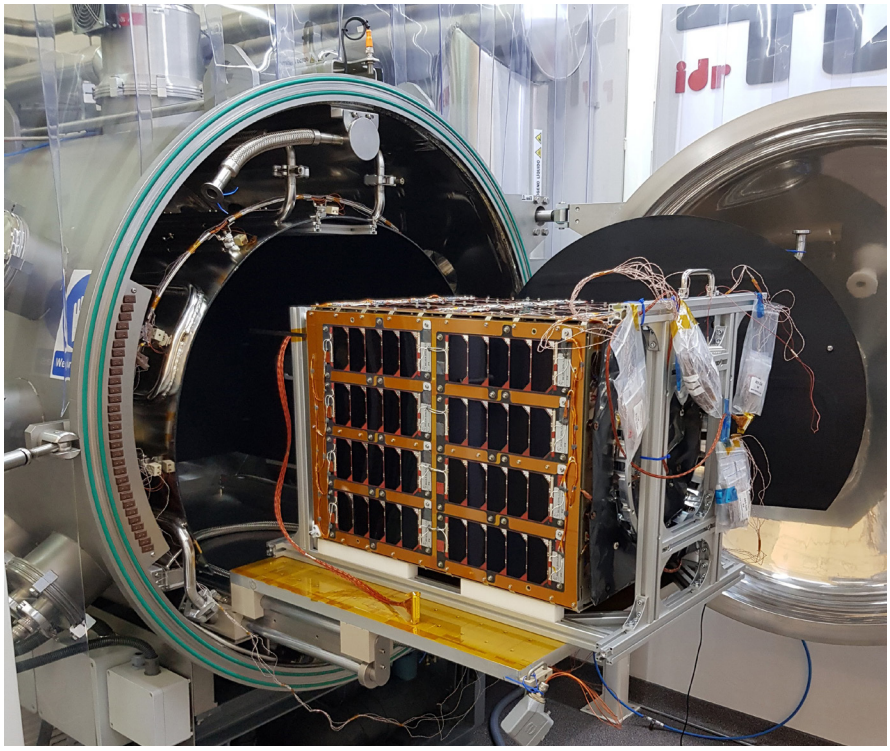


Figura 2. Ensayo térmico del UPMSat-2 en las instalaciones del IDR/UPM en el campus de Montegancedo. Fuente: IDR/UPM)

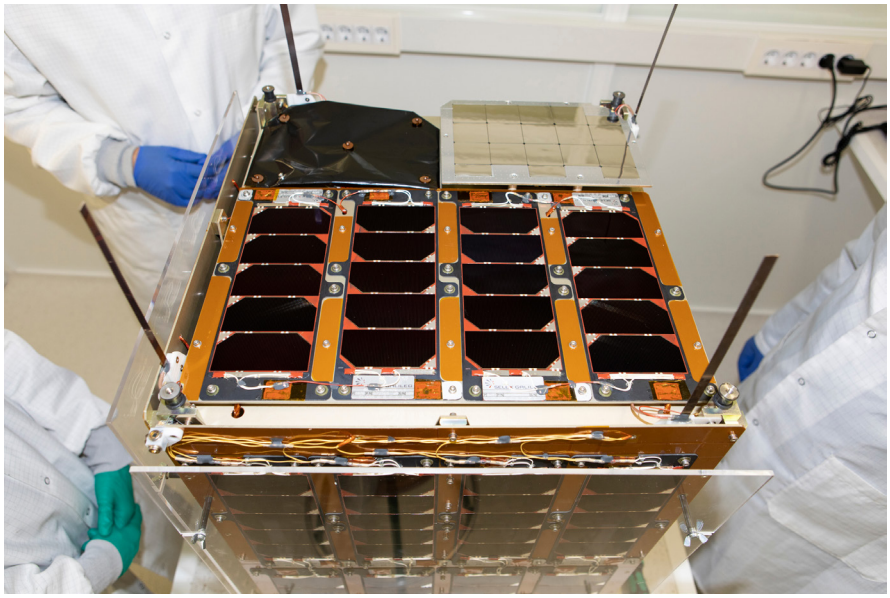


Figura 3. Vista superior del micro-satélite UPMSat-2. Fuente: IDR/UPM

Esto ha sido decisivo para que los ejércitos de diversos países estén apostando por incluir los pequeños satélites en sus planes de defensa. Se puede destacar que entre 2012 y 2019 se han puesto en órbita más de 100 nano y microsatélites desarrollados por programas militares de EE.UU., Rusia y China. De forma más concreta, se pueden mencionar *Gunsmoke-L* y *Polaris* (EE.UU.) o *Buccaneer* (Australia), actualmente en desarrollo.

UPMSat-2: un micro-satélite de demostración tecnológica en órbita

El UPMSat-2, de 50 kg de masa (incluido en la categoría de micro-satélites), describirá una órbita heliosíncrona alrededor de la Tierra de 500 km de altitud y 97° de inclinación.

La estructura del UPMSat-2 es un ortoedro de dimensiones 0.50 m x 0.50 m x 0.60 m, por lo que permite una distribución de subsistemas y equipos similar a la de los satélites convencionales, pero más versátil en términos de coste y masa (ver Figura 4). Además, presenta una estructura multiplataforma que puede ser adaptada a una gran diversidad de instrumentos y cargas de pago, facilitando su futura adaptación a otras misiones y objetivos.

La estación terrena de seguimiento está localizada en el Centro de Control del IDR/UPM, en el parque científico y tecnológico de la UPM situado en Montegancedo (Madrid). El UPMSat-2 realizará 15 órbitas al día alrededor de la Tierra, pasando dos veces por encima de la estación terrena. Las comunicaciones se realizarán en banda UHF a 436 MHz (banda amateur) y 400 MHz (banda científica, para datos codificados).

La misión principal del UPMSat-2 es la demostración tecnológica en órbita, por lo que su objetivo fundamental es evaluar el comportamiento de instrumentos, sistemas o equipos en ambiente espacial. Esto permite la calificación de los equipos embarcados para su uso posterior en nuevas misiones espaciales.

Los sistemas embarcados en el UPMSat-2 están desarrollados por empresas del sector aeroespacial (nacional e internacional), así como por profesores e investigadores de la UPM. Y son los siguientes:

***Micro Thermal Switch*,** desarrollado por Iberespacio: dispositivo de control térmico miniaturizado que funciona como un interruptor térmico (Figura 3), permitiendo la activación/desactivación de instrumentos en función de su temperatura.

Magnetómetro Bartington, desarrollado por *Bartington Instruments Ltd*.: sensor para la medida del campo magnético terrestre que presenta altas prestaciones en cuanto a la precisión de las medidas.

Reaction Wheel, desarrollado por SSBV *Space & Ground Systems*: modelo miniaturizado de rueda de inercia empleado para modificar la actitud del satélite y permitir el apuntamiento en una de las direcciones del espacio.

***Electronic*-BOX (EBOX),** fabricado por TECNOBIT S.L. (grupo Oesia): constituye la electrónica embarcada en el UPMSat-2. Está desarrollado bajo las especificaciones definidas por el instituto.

***Solar Sensors* SS6:** Sistema formado por 6 fotodiodos comerciales adaptados para su uso en espacio. Su objetivo es incluir información sobre la posición del satélite con respecto al Sol en las leyes de control del subsistema de actitud.

Como subsistema de potencia, el UPMSat-2 cuenta con una batería (SAFT) de 18 Ah y cinco paneles solares fijos (formados por módulos comerciales de Selex Galileo), que han sido integrados y ensayados en las instalaciones del Instituto IDR/UPM por personal del centro [2]. El subsistema de control térmico es fundamentalmente de tipo pasivo, empleando mantas térmicas (MLIs, ver Figura 4), y sensores de temperatura de tipo AD590 y NTC. La batería del satélite lleva incluido un sistema propio de control térmico, desarrollado y validado por personal del Instituto IDR/UPM, que está formado por un conjunto de resistencias eléctricas (*heaters*) cuya activación/desactivación se controla mediante un circuito de termostatos.

El control de actitud es de tipo magnético, empleando en su función nominal tres magnetopares (orientados según los tres ejes del espacio) y dos magnetómetros. Este sistema permite controlar la velocidad angular de rotación del satélite y mantener el eje de rotación perpendicular al plano orbital [3].

El sistema de gestión de datos está formado por la electrónica (incluida dentro del equipo EBOX) y el software de vuelo. El ordenador de abordo está basado en una FPGA LEON3, con 4 MB de memoria SRAM y 1 MB de memoria no volátil (EEPROM). Hay disponibles 64 canales analógicos y 112 señales digitales, con interfaces serie de tipos RS-232, RS-422, SPI e I2C. El *software* embarcado ha sido desarrollado por el grupo STRAST (*Real-Time Systems and Architecture of Telematic Services*) de la UPM, y servirá para el control y monitorización de la plataforma. El subsistema de comunicaciones está compuesto por el transceptor y el sistema de antenas, formado por cuatro monopolos en polarización circular, en cuyo diseño y medición ha participado el

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) desde sus instalaciones de Torrejón de Ardoz.

Además de su misión como demostrador tecnológico, el satélite universitario UPMSat-2 ha supuesto una herramienta docente de primer nivel [4]. Más de cien estudiantes han participado en diversas etapas del proyecto, proporcionándoles un enfoque aplicado para la adquisición de los conocimientos y competencias contenidos dentro de los planes de estudio de diversas escuelas de la UPM (ETSI Aeronáutica y del Espacio, ETSI de Telecomunicación y ETSI Informáticos). El trabajo dentro del proyecto UPMSat-2 ha sido de especial relevancia para los estudiantes del Máster Universitario en Sistemas Espaciales (MUSE) de la UPM.

Actualmente, el UPMSat-2 se encuentra en Kourou, en espera de retomar la campaña de lanzamiento. Su integración se llevó a cabo por un equipo del Instituto IDR/UPM (ver Figura 5) durante los meses de febrero a marzo de 2020, viéndose interrumpido por la pandemia de COVID-19. Las tareas están siendo retomadas en este momento, a la espera de su lanzamiento el próximo mes de junio de 2020.

Figura 4. Vista interior del micro-satélite UPMSat-2. Fuente: IDR/UPM

Conclusiones

El proyecto UPMSat-2 ha supuesto un esfuerzo de grandes proporciones para el personal docente, investigador y de administración y servicios de los grupos implicados de la UPM, impulsando su conocimiento y afianzando la colaboración de la universidad con la industria. Además, varias empresas, organizaciones e institutos de investigación han participado de manera directa o indirecta en el desarrollo del proyecto (AIRBUS D.S. o INTA, entre otros), proporcionando soporte durante todo el ciclo de vida del proyecto.

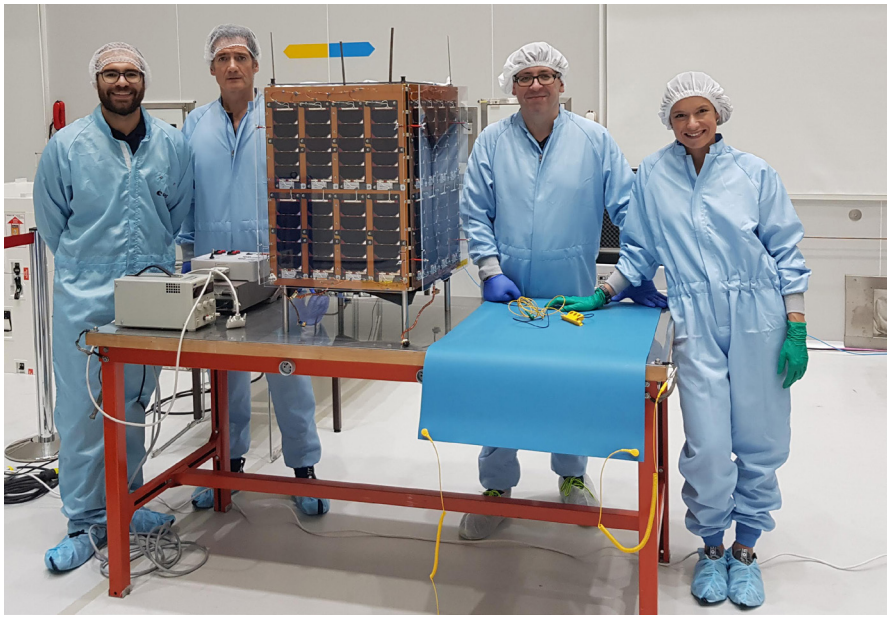


Figura 5. Equipo de IDR/UPM en Kourou para la integración del UPMSat-2 en el lanzador. Fuente: IDR/UPM

Referencias

[1] M. Swartwout. *Reliving 24 Years in the Next 12 Minutes: A Statistical and Personal History of University-Class Satellite. Saint Louis University*.

[2] E. Roibás-Millán, A. Alonso-Moragón, A.G. Jiménez Mateos, S. Pindado. *Testing solar panels for small-size satellites: the UPMSat-2 mission. Measurement Science and Technology,* vol. 28, 115801 (12pp), 2017.

[3] J. Cubas, A. Farrahi, S. Pindado. *Magnetic attitude control for satellites in polar or sun-synchronous orbits. Journal of Guiding, Control and Dynamics*, vol. 38, pp.1947–1958, 2015.

[4] S. Pindado, J. Cubas, E. Roibás-Millán, F. Sorribes-Palmer. *Project Based Learning applied to spacecraft power systems: a long term engineering and educational program at UPM University. CEAS Space Journal*, vol. 10, pp. 307-323, 2018.

Resultados preliminares de caracterización de *plumas* generadas por propulsantes sólidos. Aplicación a proyectiles *Base-Bleed*

Autores: David Fernández Juárez, Pedro Prieto Cano, Juan Manuel Tizón, Gregorio López Juste, Departamento Mecánica de Fluidos y Propulsión Aeroespacial, Universidad Politécnica de Madrid.

Palabras clave: caracterización térmica, emisividad, pluma, *base-bleed*, técnica experimental.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 1.1.2; MT 1.2.1; MT 1.2.2; MT 2.3.1.; MT 2.3.3.

Introducción

En el lanzamiento de proyectiles que utilizan los gases procedentes de la combustión de un propulsante sólido para reducir la resistencia aerodinámica de base y aumentar el alcance, uno de los aspectos que deben ser tenidos en cuenta es la interacción del chorro de gases generado en dicha combustión con la plataforma de lanzamiento, así como las cargas térmicas y de presión, o el impacto de partículas sobre dichas plataformas.

La simulación numérica mediante dinámica de fluidos computacional de este fenómeno requiere ordenadores de alta capacidad y modelos precisos para capturar la física compleja del flujo transitorio durante la ignición y el despegue de estos sistemas. Esta interacción es función de las características geométricas y fluido-dinámicas de la *pluma* (gases de escape eyectados por la combustión), así como su composición y contenido en partículas.

Por este motivo, es necesario tener una caracterización lo más precisa y completa posible de las *plumas* generadas por la combustión de los propulsantes sólidos, formando parte de esta caracterización la medida de la temperatura y la geometría de la *pluma*, así como la emisión de partículas. La determinación experimental de estas variables, es una fuente de información muy relevante, tanto para los diseñadores del motor cohete o el sistema generador de gases, y el proyectil que lo utiliza, como para los responsables de las plataformas de lanzamiento. También es necesaria para la verificación de modelos fluido-dinámicos computacionales, los cuales pueden ser utilizados posteriormente para predecir el comportamiento de la *pluma* en otras condiciones de funcionamiento.

En la literatura se pueden encontrar gran número de estudios dedicados al desarrollo de técnicas experimentales para la medida del campo de temperaturas en flujos con combustión [1-5], sin embargo, su aplicación a *plumas* de motor cohete presentan inconvenientes que dificultan su uso en este tipo de flujos. Estas dificultades están relacionadas con la composición com-

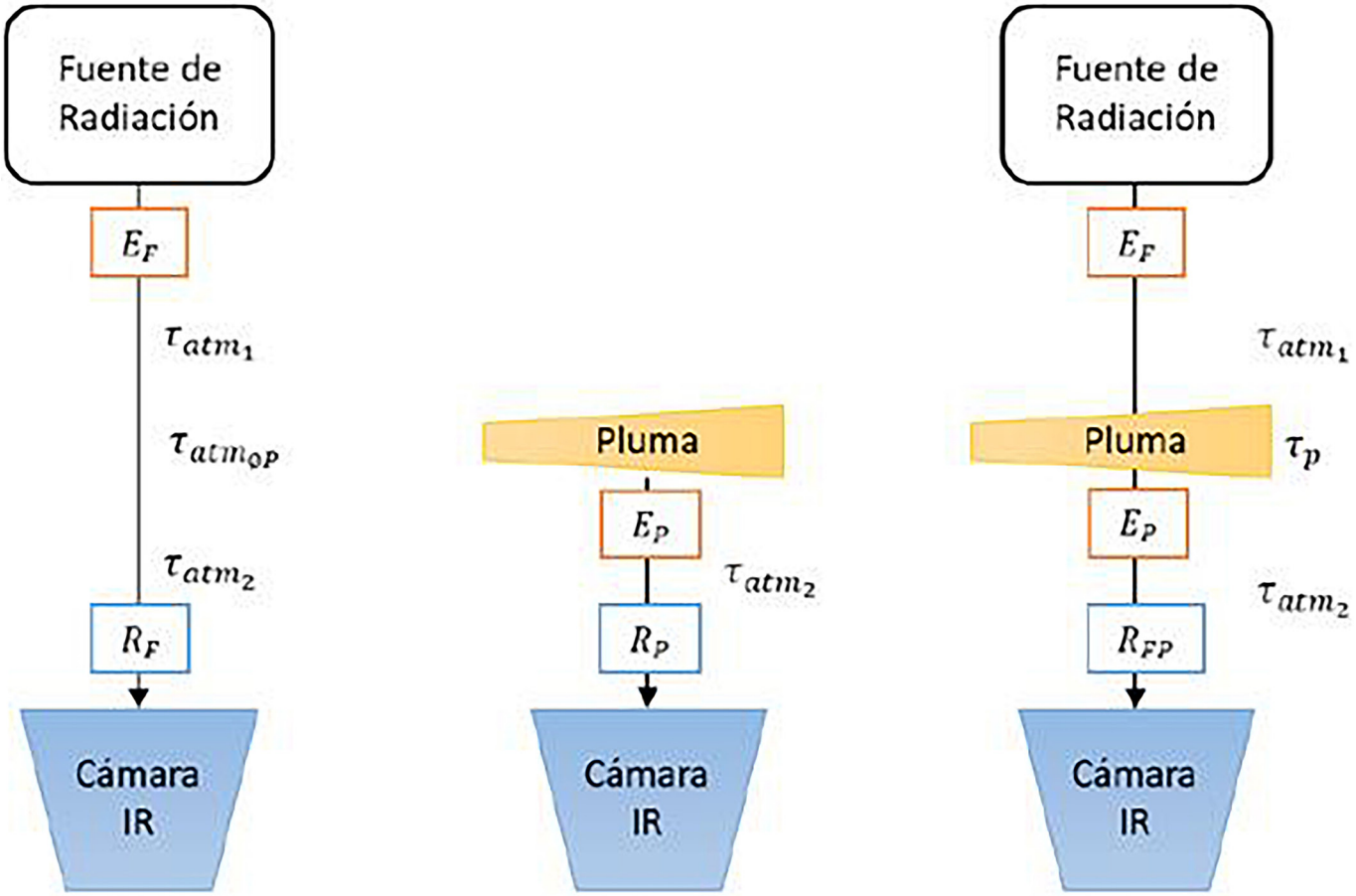


Figura 1. Esquema metodología

Figura2. Cámara de combustión

pleja de gases y partículas de las *plumas* de motor cohete, las cuales son ópticamente activas, radiando en una banda ancha del espectro electromagnético, todo ello asociado con temperaturas y velocidades elevadas, así como entornos de ensayo muy agresivos en motores cohete reales. Por ello, existen pocos estudios sobre estas técnicas que permitan la determinación del campo de temperaturas en este tipo de flujos en modelos reales.

El estudio que presenta en este trabajo, se enmarca en el proyecto PLUMEX (Retos-Colaboración RTC-2017-6137-8), el cual está siendo desarrollado en el consorcio formado por Expal Systems S.A., INTA – Campus La Marañosa y el Departamento de Mecánica de Fluidos y Propulsión Aeroespacial de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Este proyecto tiene como objetivo principal desarrollar nuevas tecnologías de simulación y caracterización de chorros de gases en las plataformas aéreas y terrestres de lanzamiento para su aplicación en vehículos de alta dinámica tanto de uso civil como militar. La consecución de este objetivo general permitirá desarrollar nuevas herramientas y tecnologías de análisis capaces de disminuir los efectos de los chorros sobre la plataforma de lanzamiento, así como, optimizar el proceso de combustión a alta rotación para aumentar el alcance de los proyectiles con tecnología base *bleed* (sistema que emplea alguna artillería para incrementar su alcance mediante la disminución de la resistencia aerodinámica de base que se consigue al rellenar de gases la zona trasera del proyectil).

Dentro de este objetivo general, se encuentra el desarrollo de metodologías fiables de caracterización térmica mediante técnicas ópticas no intrusivas de *plumas* de motor cohete basadas en termografía infrarroja.

El problema de estas técnicas para obtener temperaturas reales, a partir de las temperaturas aparentes obtenidas por los sensores que recogen la radiación infrarroja radica, fundamentalmente, en una determinación espacial precisa de la emisividad de la *pluma*. Dado que la composición de gases y partículas de la *pluma*, y evidentemente la temperatura, son incógnitas y además, función de la posición radial y longitudinal en la *pluma* debido a las capas de mezcla con la atmosfera que rodea el chorro.

En el presente trabajo se propone una metodología que permite obtener el campo de temperaturas reales en la *pluma* a partir de la medida de la radiación infrarroja, así como resultados de los ensayos preliminares obtenidos en las *plumas* generadas en una cámara de combustión de un aerorreactor y por las unidades *base bleed*, desarrollados y suministrados por Expal Systems S.A. para la realización de los ensayos.

Método de estimación de emisividad

Todo cuerpo por encima cero grados Kelvin emite energía en forma de radiación térmica. Idealmente, se define como cuerpo negro aquel objeto capaz de absorber toda la radiación incidente, independientemente de la longitud de onda de dicha radiación. La emisión de radiación de un cuerpo negro queda determinada por la ley de Planck, que es función de la temperatura del cuerpo.

En general, la mayoría de los materiales no se comportan como un cuerpo ne-

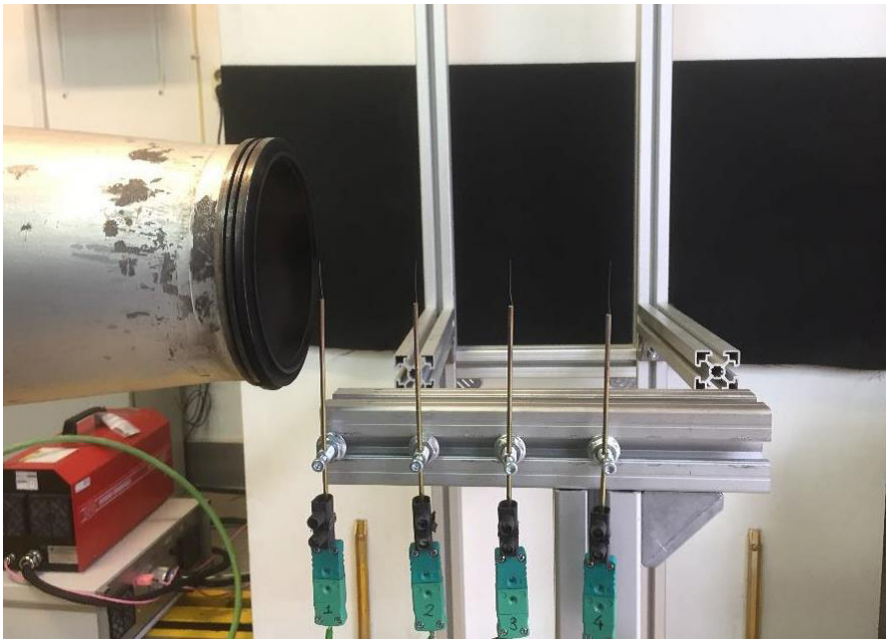


Figura 3. Termopares

gro. La radiación emitida por una fuente es parcialmente absorbida por el material. El resto de la radiación o bien es transmitida a través de dicho material o bien, es reflejada por el mismo. De este comportamiento, aparecen las variables denominadas absortividad, reflectividad y transmisividad que se definen respectivamente como la relación entre la energía radiante absorbida, reflejada o transmitiday la energía radiante recibida por el material.

Todas estas variables son dependientes de la longitud de onda y de la temperatura del cuerpo. La relación entre la energía radiante emitida por el material respecto a la que emitiría si fuera cuerpo negro, se define como la emisividad. Si la emisividad de un material no depende de la longitud de onda se denomina cuerpo gris. En el caso de los gases, éstos emiten, principalmente, en bandas estrechas de longitudes de onda definidas por las moléculas que los conforman. Asumiendo equilibrio térmico, la emisividad de los gases será igual a su absortividad. Además, si no hay una gran presencia de partículas sólidas dentro del flujo, la reflectividad es despreciable y, por tanto, la emisividad quedará definida únicamente por la transmisividad.

Los chorros de gases generados por la combustión de propulsantes sólidos son una fuente importante de radiación térmica. Esta radiación se emite en pequeñas bandas del espectro electromagnético que son

Figura 4. Banco *base bleed*

función de los compuestos presentes. En particular, el CO_2 representa el principal producto dela combustión y emite en una pequeña banda centrada en los 4,45 µm, dentro de lo que se considera el infrarrojo medio (*MWIR*).

En base a esto, la determinación de la temperatura de un chorro de gases se puede hacer a partir de la energía radiativa que emite dicho chorro y la estimación de la emisividad del mismo. Una simple división entre dicha energía y la emisividad, nos permite obtener la energía que emitiría el fluido si fuese un cuerpo negro ideal, y de ahí, a través de la ley de Planck, la temperatura del mismo.

Gracias al uso de cámaras termográficas, la emisión de radiación de un cuerpo se puede medir directamente. Sin embargo, la determinación de la emisividad de chorros de gases, requiere de un conjunto de ensayos siguiendo una metodología determinada.

La metodología propuesta para la determinación de la emisividad emplea una cámara termográfica y una fuente de radiación conocida. Con ambos equipos y realizando las siguientes medidas esquematizadas en la figura 1, se puede determinar empíricamente la emisividad de la *pluma*:

Medida 1: medición de la radiancia de la fuente constante
Medida 2: medición de la radiancia aparente del chorro
Medida 3: medición de la radiancia de la fuente a través del chorro

La medida 3 se puede entender como la suma de la medida 2 más la medida 1 afectada por la transmisividad de la *pluma*. Tras una operación algebraica con estas medidas se obtiene la transmisividad del chorro y, por tanto, su emisividad.

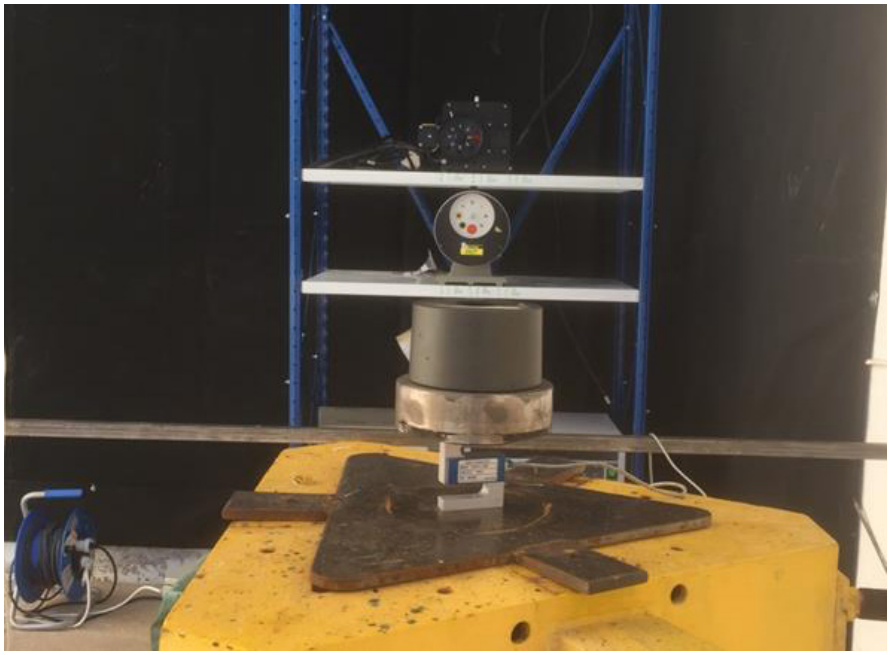


Figura 5. Cuerpos negros

Instalaciones y ensayos

Basados en esta metodología, se realizaron pruebas preliminaresen la cámara de combustión de un aerorreactor de la UPM (ver figura 2). De estos primeros ensayos se alcanzó un grado de madurez de la técnica y los primeros

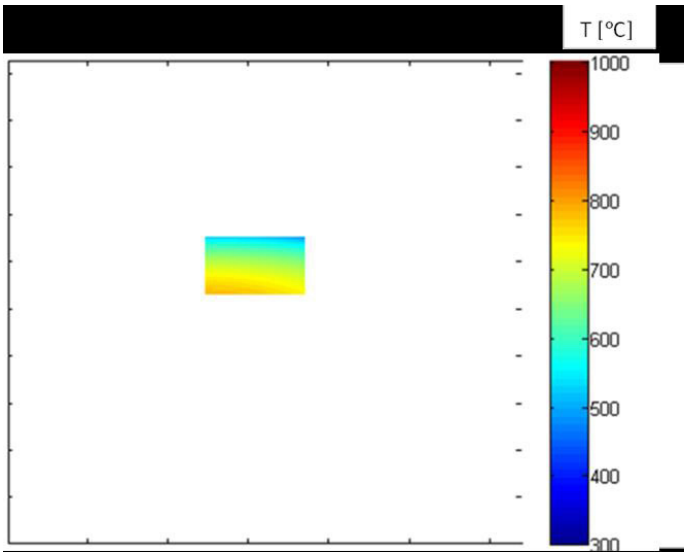


Figura 6. Campo Temperatura cámara de combustion

resultados validados con termopares (ver figura 3), los cuales sirvieron para detectar las posibles fuentes de error y las acciones encaminadas a la reducción de los mismos. Se decidió comenzar la puesta a punto de la técnica en estas instalaciones, por su capacidad de generar un chorro de gases cuasi-estacionario, de caudal, riqueza y por lo tanto composición y distribución de temperatura controlados.

Para la captación de las imágenes termográficas se empleó una cámara infrarroja sensible en el espectro de 3-5 µm. Con la elección de esta banda de captación, se asegura la recepción de la emisión de CO_2, principal emisor de radiación térmica en flujos de combustión.

Con ayuda de un cuerpo negro de cavidad y la repetición de ensayos en la *pluma* de la cámara de combustión, se pudo caracterizar hasta nueve puntos de la *pluma*. Al tratarse de una *pluma* axil-simétrica, todos estos puntos fueron ubicados en la mitad superior del chorro de gases. De estos resultados puntuales se obtuvo, mediante interpolación, el campo de temperatura real de la *pluma*.

Una vez que la metodología fue comprobada en estas instalaciones, se decidió trasladarla al banco de motores cohete de INTA – Campus La Marañosa (ver figura 4).

Los chorros de gases bajo estudio fueron generados por unidades *base bleed* de 105 mm, proporcionados por Expal Systems S.A. Con ayuda de dos fuentes de radiación conocidas y ocho unidades *base bleed* idénticas, se llegaron a caracterizar hasta doce puntos de temperatura real de la *pluma*. Dos unidades fueron empleadas para la Medida 2 (radiancia aparente del chorro), mientras que las otras seis unidades fueron destinadas para la Medida 3 (radiancia de la fuente a través del chorro). Nuevamente, debido a la simetría axial de la *pluma*, se decidió caracterizar únicamente una de sus mitades. Interpolando estos resultados se obtuvo el primer mapa de temperatura real de la *pluma* de un *base bleed*.

Para la captación de las imágenes termográficas se empleó la misma cámara infrarroja que en los ensayos anteriores. Las fuentes de radiación utilizadas fueron dos cuerpos negros de cavidad comandados a su temperatura máxima: 1000 ºC y 1200 ºC (ver figura 5). Estos equipos permiten la emisión continua de una alta radiación térmica, esencial para el éxito de la técnica cuando la radiación de la *pluma* es elevada.

De cara a la comprobación de la efectividad de la técnica, se instrumentó una novena *pluma* con termopares en algunos de los puntos ya caracterizados. Los termopares empleados fueron de tipo C capaces de aguantar altas temperaturas. Aunque estos sensores no están recomendados para atmósferas oxidantes, permiten obtener un orden de magnitud de la temperatura esperada en la *pluma*.

Resultados

En primer lugar, se analizan los resultados obtenidos de los ensayos preliminares en la cámara de combustión. La figura 6 muestra el campo de temperatura obtenido de la *pluma* dicha cámara.

De estos primeros ensayos con la metodología de estimación de la emisividad de la *pluma*, se obtuvieron resultados prometedores. En su comparación con los termopares,la técnica infravaloró entre un 12 y 14 % los valores de temperatura registrados por estos sensores. De ensayos paralelos llevados a cabo en esta campaña, se pudo verificar que el error en la estimación de la temperatura disminuía a medida que aumentaba la temperatura de la fuente seleccionada.

En cuanto a los ensayos con unidades *base bleed* (ver figura 7) el campo de temperatura obtenido representaba únicamente una región de 350 mmx35 mm dentro de la *pluma*. Suponiendo simetría axial, se pudo obtener el campo de temperatura real mostrado en la figura 8.

Las diferencias máximas encontradas en los puntos medidos con termopares fueron del 30 %. Estas diferencias pueden ser debidas a varias razones. La primera de ellas se debe a la incongruencia de lo que se está midiendo, mientras que el termopar ofrece un valor puntual, la metodología arroja valores de temperatura del camino óptico del chorro, es decir, una temperatura media de todo el ancho de la *pluma* observado desde el punto de vista de la cámara infrarroja. Además, como se ha comentado anteriormente, los termopares tipo C, pueden degradarse en atmósferas oxidantes. Esto puede provocar que las medidas realizadas cuenten con un error, el cual no fue acotado durante los ensayos.

En cualquier caso, la técnica propuesta mejora significativamente la estimación de la temperatura real respecto de la captación directa de la temperatura aparente. Esta estimación de la emisividad permite precisar la temperatura máxima del chorro con un 10% de error respecto a los termopares. Mientras la medida directa del chorro ofrece temperaturas máximas en torno a los 800 ºC, la aplicación de la metodología la eleva hasta los 1500 ºC.

Conclusiones, mejoras y propuestas de futuro

La principal aplicación de este estudio en Defensa es la capacidad de caracterizar la firma y las solicitudes térmicas en las plataformas de cualquier pluma

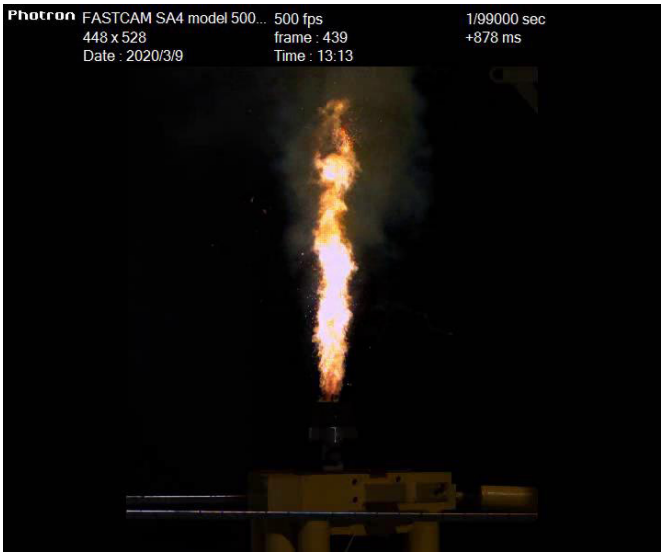


Figura 7. Pluma *base bleed*

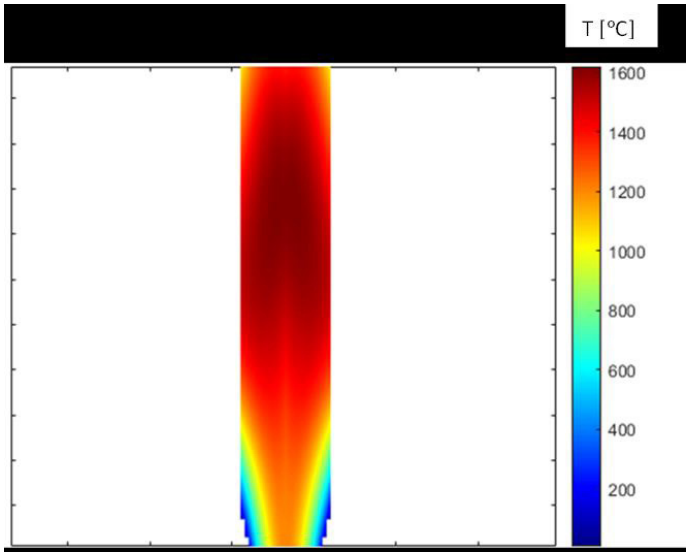


Figura 8. Campo temperatura *base bleed*

generada por un motor cohete de forma barata y relativamente precisa.

Se ha desarrollado una metodología óptica no intrusiva capaz de caracterizar la temperatura de un chorro de gases, proveniente de la combustión de propulsantes sólidos. Además, se ha conseguido generar un campo de temperatura real de la *pluma* de un*base bleed*.

A pesar de que, en el estado actual de la técnica, los errores son todavía importantes en el caso de los *base bleed*, se podrían mejorar aplicando algunas de las siguientes propuestas de mejoras. La primera de ellas, se centraría en la corrección de la temperatura del camino óptico para la obtención de una temperatura puntual comparable con la de los termopares. Para ello, únicamente habría que trasformar la imagen 2D obtenida de la interpolación, en sus valores radiales 3D (métodos similares a la transformación de Abel).

Otra mejora de los ensayos con propulsantes sólidos estaría dirigida hacia la fiabilidad de los resultados captados por los termopares, realizando una acotación del error en la medida de la temperatura realizada, aumentando así la confianza en los resultados obtenidos con la técnica descrita.

Una tercera mejora podría venir de contabilizar la influencia de las partículas en la emisión de radiación de la *pluma*. Hasta ahora no se había considerado, pero en función del contenido de partículas sólidas en la pluma y el tipo de partículas, puede ser una posible causa de la infravaloración en los resultados de la metodología.

En cuanto a las propuestas de futuro, para contrastar la técnica mostrada, en primer lugar, se investigará la generación de un campo de temperatura a partir de la estimación de una emisividad característica media de la *pluma*. De esta manera, con una única captura de la *pluma* aparente, se podría caracterizar el campo completo de temperatura real. Para ello, se pretende simular la combustión del propulsante sólido y determinar la emisividad equivalente a partir de sus productos congelados.

La segunda propuesta de futuro se centraría en evaluar la radiación emitida por la *pluma*. Esta aproximación se nutre de simulaciones CFD (*Computational Fluid Dynamics* o Mecánica de fluidos computacional) acopladas a funciones de radiación que permitan estimar la radiación de la pluma en una determinada posición. Dicha posición deberá ser coincidente con la ubicación de la cámara IR para poder retroalimentar los resultados empíricos de esta variable intermedia. Una vez obtenida la *pluma* de radiación equivalente, el campo de temperatura real de la *pluma* quedaría automáticamente determinado. Es importante destacar que ambas propuestas de futuro presentan cierta dificultad de ejecución en sus simulaciones. No obstante, se podría determinar de un único ensayo el campo completo de temperatura.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, bajo el proyecto PLUMEX (Retos-Colaboración RTC-2017-6137-8).

Agradecemos a Expal Systems S.A. el suministro de unidades base bleed de 105 mm, así como a INTA – La Marañosa por la disponibilidad de sus bancos de ensayos y sus trabajadores para la realización de las pruebas.

Referencias

[1] Benoy T. et al. *Measurement of CO2 Concentration and Temperature in an Aero Engine Exhaust Plume Using Wavelength Modulation Spectroscopy. IEEE Sensors Journal*. 2017. vol. 17, no 19, p. 6409-6417.

[2] Cięszczyk S. *Non-Luminous Flame Temperature Determination Method Based on CO 2 Radiation Intensity. Acta Physica Polonica*, A. 2014, vol. 126, no 6.

[3] Roux J.A. and McCay T.D. *Combustion Diagnostics by Nonintrusive Methods. Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1984.

[4] Schulz C, Sick V. *Tracer-LIF Diagnostics: Quantitative Measurement of Fuel Concentration, Temperature and Fuel/Air Ratio in Practical Combustion Systems. Progress in Energy and Combustion Science*. 2005.

[5] Schulz C., Dreizler A., Ebert V., Wolfrum J. *Combustion Diagnostics,Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Springer Handbooks. Springer, Berlin, Heidelberg* pp. 1241-1315, 2007.

Boletín de Observación Tecnológica en Defensa

Disponible en

http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/es-es/Contenido/Paginas/Publicaciones.aspx?cat=BOLETINES TECNOLÓGICOS

https://publicaciones.defensa.gob.es/catalogsearch/result/?cat=0&q=boletin+de+observaci