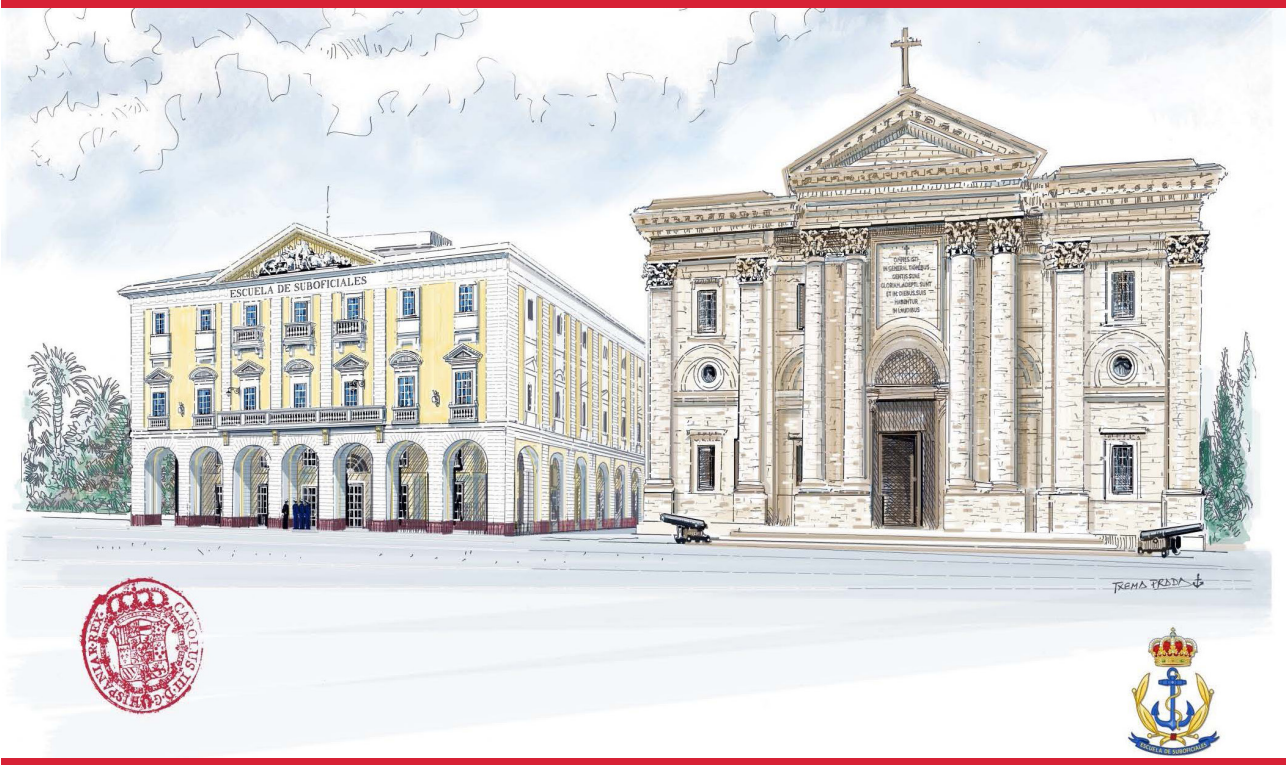
Premios Isdefe I+D+i
Los diez artículos finalistas del DESEi+d 2019

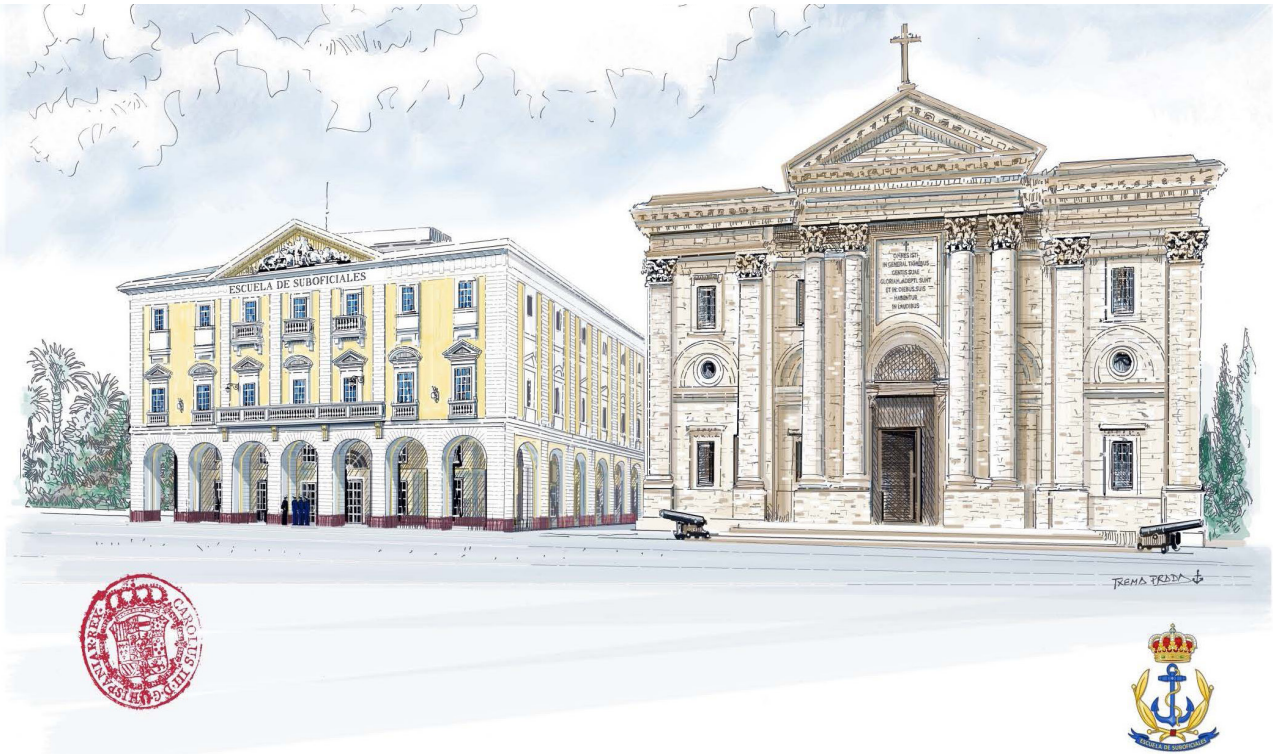
Madrid, marzo de 2020



MINISTERIO DE DEFENSA

Premios Isdefe I+D+i
Los diez artículos finalistas del DESEi+d 2019

Madrid, marzo de 2020



MINISTERIO DE DEFENSA

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

Edita:

MINISTERIO DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

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

© Autores y editor, 2020

NIPO: 083-20-059-1 (edición papel)
ISBN: 978-84-9091-467-0 (edición papel)
Depósito Legal: M-6121-2020

Fecha de edición: marzo 2020
Maqueta e Imprime: Ministerio de Defensa

NIPO: 083-20-060-4 (edición en línea)

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

Prólogo DIGAM

La Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID) constituye la principal referencia pública que facilita el alineamiento de las actividades de I+D+i del Ministerio de Defensa. El alto porcentaje de utilización dual que contienen los nuevos sistemas de armas, aconseja y obliga a que, desde el Ministerio de Defensa, se trabaje en coordinación con otros ministerios, principalmente con el de Industria, Comercio y Turismo y con el de Ciencia, Innovación y Universidades.

La Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación perteneciente a la Dirección de Armamento y Material está trabajando en la elaboración de una nueva versión de la ETID en la que se tendrá en cuenta los nuevos retos y oportunidades que este nuevo y dinámico entorno, supone para el Sector Industrial de la Defensa y para el resto de Sectores Industriales que con él compartan la «alta tecnología» como denominador común.

En el transcurso de la celebración de esta séptima edición del Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad se ha podido hacer una revisión general de los enfoques estratégicos en I+D+i a nivel nacional, teniendo de este modo, la oportunidad de conseguir la implantación de nuevas formas de colaboración entre todas las partes implicadas en el desarrollo de tecnologías de aplicación dual, aplicables a Defensa y Seguridad.

En este libro, como en las ediciones anteriores, se presentan las diez comunicaciones mejor valoradas de las treinta y una propuestas por los evaluadores al «Premio ISDEFE I+D+i ANTONIO TORRES». Entre los ámbitos de estas diez comunicaciones se pueden encontrar el aeroespacial, NRBQ, propulsión y armamento entre otros, lo que refleja en interés del Ministerio de Defensa en la innovación de ámbitos tan dispares.

Para concluir, quisiera agradecer a la organización el gran trabajo realizado, a la Escuela de Suboficiales de la Armada, anfitrión de esta edición, su gran acogida y disponibilidad y a todos los autores de las comunicaciones y asistentes su interés y aportación en dicho Congreso y animarles a seguir contribuyendo en el mismo incentivando de esta manera a la I+D.

Almirante D. Santiago Ramón González Gómez

Director General de Armamento y Material – Ministerio de Defensa

Prólogo Consejero Delegado de Isdefe

El Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, aborda el objetivo de mejorar nuestras capacidades y posicionarnos como país líder en este sector, al poner en común la innovación nacional en defensa y seguridad.

Esta colaboración entre todos los agentes del sector, genera un conocimiento que permite afrontar los nuevos desafíos tecnológicos.

Esta es la rueda del conocimiento; las exposiciones y experiencias compartidas en el DESEi+d 2019, se convierten en materia de estudio y referencia de las futuras ediciones, dando impulso al avance científico y tecnológico.

En este volumen se recogen las diez comunicaciones finalistas, incluyendo la ganadora, del Premio Isdefe I+D+i «Antonio Torres» que, fiel a su filosofía de dar impulso a la cultura de la participación, colaboración y coordinación en el ámbito del I+D+i de la Defensa, son un fiel reflejo del esfuerzo realizado por los más de doscientos autores que han participado en la edición del DESEi+d 2019.

Este Congreso, referente del I+D en Defensa y Seguridad, cuenta con el gran impulso de las Direcciones Generales de Armamento y Material y de Reclutamiento y Enseñanza Militar, los Centros Universitarios de Defensa e Isdefe que, desde sus orígenes, ha apoyado al Ministerio de Defensa en su organización y celebración.

Para Isdefe, colaborar en la organización de este Congreso es un objetivo en sí mismo, ya que nuestro compromiso con la innovación se fundamenta en nuestra misión de conocer y anticipar la repercusión que las tecnologías puedan tener en la Administración y estar en disposición de apoyar su incorporación en el entorno público.

Nuestro objeto social recoge la prestación de servicios de ingeniería, consultoría y asistencia técnica, en especial los destinados a la defensa y seguridad, de ahí la necesidad de implicarnos en compilar conocimiento, para poder prestar nuestros servicios, al Ministerio de Defensa y a la Administración española.

Nuestra felicitación a todos los que hacen posible este Congreso, organizadores, autores y asistentes, y a la Escuela de Suboficiales de la Armada ubicada en San Fernando, sede del DESEi+d 2019, y, por supuesto, nuestra entera disposición al servicio del Ministerio de Defensa, para colaborar en el futuro VIII Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad.

D. Francisco Quereda Rubio

Consejero Delegado de Isdefe

Fallo Jurado 4ª edición
Premio Isdefe I+D+i "Antonio Torres"

En el marco del VII Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad (DESEi+d 2019) a celebrarse en la Escuela de Suboficiales de la Armada ubicada en San Fernando, durante los días 19, 20 y 21 de noviembre de 2019 bajo la coordinación de la Dirección General de Armamento y Material, la Dirección General de Reclutamiento y Enseñanza Militar, junto a los Centros Universitarios de Defensa e Isdefe (Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España), se convocó la Cuarta Edición del Premio Isdefe I+D+i "Antonio Torres".

Los 145 artículos presentados y aceptados en el marco del Congreso se analizaron por los miembros del Comité Científico Permanente y los evaluadores asociados al congreso. Este análisis consistió en valorar:

- Los **resultados** obtenidos por los trabajos presentados.
- El grado de **innovación** de los trabajos presentados.
- La **contribución** de los trabajos al I+D Nacional.
- La **proyección** de los trabajos en el ámbito de Defensa y Seguridad

Tras esta primera evaluación, un total de 31 comunicaciones quedaron nominadas al premio. Para la valoración final se conformó, según lo establecido en las bases del premio, un Jurado Sancionador[1]. Este jurado, revisó y valoró las comunicaciones nominadas en un proceso de dos vueltas que resultó en 10 comunicaciones finalistas[2], de las cuales se propone como ganador del premio a:

D. Antonio J. Conesa Torres, del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), por su artículo:

Actuadores de plasma y su uso en Aeronáutica.

Para que conste, se firma y traslada esta acta al Comité Organizador Permanente del Congreso.

Daniel Mosquera Benitez
Secretario Jurado 4ª edición Premio Isdefe I+D+i "Antonio Torres"

[1] Miembros del Jurado: **Secretario**: D. Daniel Mosquera Benitez – Isdefe; **Vocal 1**: José Serna Serrano – CUD San Javier, CUD-AGA; **Vocal 2**: Dña. Silvia Vicente – CUD de Zaragoza, CUD-AGM; **Vocal 3**: D. Natalio García Honduvilla – CUD de Madrid, CUD-ACD; **Vocal 4**: TCOL (EA) Juan Manuel González Del Campo Martínez – Unidad de Prospectiva y Estrategia Tecnológica, SDGPLATIN; **Vocal 5**: D. Daniel Mosquera Benitez – Isdefe y **Vocal 6**: D. Arturo González Gil – CUD de Marín, CUD-ENM.

[2] Lista de 10 artículos finalistas: #203 Actuadores de plasma y su uso en Aeronáutica **2,54**; #9 nuevas soluciones para la detección de compuestos NRBQE en contenedores (COSMIC) **2,29**; #27 Propulsión Cohete Basada en la Reacción Sodio – Agua. Un nuevo Concepto Propulsivo **2,21**; #81 Optimización de trayectorias de interceptación de drones maliciosos en entornos restringidos **2,04**; #113 Procesado avanzado de la firma multi-influencia submarina generada por buques para aumentar su detectabilidad y clasificación **1,96**; #7 Detección y clasificación de objetos camuflados en el espectro visible utilizando cámaras hiperespectrales embarcadas **1,93**; #114 e-NOSE "Azotic 1.0": Aplicación a las pruebas de estabilidad en pólvoras de base nitrocelulósica **1,93**; #147 Detección de agentes de guerra química en fase gas mediante tecnología SERS **1,93**; #212 Satélites definidos por software, aplicación para defensa y seguridad y resultados en órbita **1,82** y #47 Rendimiento cognitivo en una prueba de toma de decisiones "disparo-no disparo" y su relación con niveles de cortisol en sangre **1,64**.

ÍNDICE

Prólogo DIGAM I

Prólogo Consejero Delegado de Isdefe III

Actuadores de plasma y su uso en Aeronáutica 1

Detección y clasificación de objetos camuflados en el espectro visible utilizando cámaras hiperespectrales embarcadas 11

Nuevas soluciones para la detección de compuestos NRBQe en contenedores (COSMIC) 23

Propulsión Cohete Basada en la Reacción Sodio-Agua. Un nuevo Concepto Propulsivo 33

Rendimiento cognitivo en una prueba de toma de decisiones «disparo-no disparo» y su relación con niveles de cortisol en sangre 43

Optimización de trayectorias de interceptación de drones maliciosos en entornos restringidos 51

Procesado avanzado de la firma Multi-Influencia submarina generada por buques para aumentar su detectabilidad y clasificación 63

e-nose «Azotic 1.0»: pruebas de estabilidad sobre pólvoras de base nitrocelulósica. 73

Detección de agentes de guerra química en fase gas mediante tecnología Raman-SERS 83

Satélites Definidos por Software, aplicación para defensa y seguridad y resultados en órbita 93

Actuadores de plasma y su uso en Aeronáutica

Conesa Torres, Antonio J.[1,*], Cabrera Revuelta, Ángel[1] y Sánchez García, Mario[1]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas», Ctra. de Ajalvir, km. 4,5, 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid).

* Autor principal y responsable del trabajo: conesaaj@inta.es (AJCT).

Resumen: Desde hace unos años, los actuadores de plasma han sido intensamente estudiados y desarrollados, constituyendo una tecnología fascinante y prometedora para el control de flujo aerodinámico, permitiéndonos aumentar los roles y capacidades de los Vehículos aéreos no tripulados tanto para uso militar como civil.

Cuando un vehículo aéreo se enfrena a misiones con condiciones y objetivos dispares, el control de flujo activo se convierte en una poderosa herramienta para adaptar el vehículo de una condición a otra, surgiendo como una estrategia de enorme valor para la mejora del rendimiento aerodinámico y la capacidad de maniobra del mismo.

Los actuadores de plasma presentan una serie de características que los hacen ideales para el control de flujo activo, siendo totalmente eléctricos, ligeros, sin partes mecánicas y con una alta capacidad de respuesta.

Esta comunicación presentará los resultados experimentales obtenidos, en el Túnel Aerodinámico n.º 2 del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, con un modelo de UAV (DIANA) demostrando la eficacia de su uso.

Con posterioridad, se describirán algunas de las actividades llevadas a cabo en el Laboratorio de Plasma en Aeronáutica y se comentarán las enormes posibilidades que ofrecen estos dispositivos.

Palabras clave: Actuadores de plasma, DBD, Control de flujo, UAV.

1. Introducción

La denominación genérica»actuadores de plasma» se utiliza para referirse a un amplio número de dispositivos basados en el uso de descargas eléctricas a presión atmosférica. La actuación de estos elementos va a permitir la modificación de la estructura de un flujo proporcionando la posibilidad de control sobre superficies sustentadoras o sobre otras superficies sometidas a la acción de una corriente fluida.

El actuador de plasma convierte una entrada eléctrica en una salida física deseada para el control del flujo [1]. El mecanismo de actuación más utilizado, por estos dispositivos, es el que hace uso de la cantidad de movimiento y será el empleado en los casos presentados en esta comunicación.

El concepto de plasma fue empleado por primera vez por Irving Langmuir [2], Premio Nobel de Química en 1932, para describir gases parcialmente ionizados. Se puede considerar que un plasma es un conjunto cuasi neutro en el que conviven electrones, iones positivos y negativos, radicales libres y otros elementos, presentando un comportamiento colectivo y que reacciona a campos electromagnéticos.

Los actuadores de plasma forman parte de los dispositivos de control de flujo aerodinámico activo, actuando únicamente cuando existe una necesidad, añadiendo energía o momento al flujo, pudiendo ser regulada o suspendida su actuación, cuando se estime conveniente, aunque ello implica un consumo de energía y cierta complejidad del sistema.

A lo largo de esta comunicación utilizaremos los actuadores de plasma de descarga de barrera dieléctrica superficial (SDBD) debido a sus numerosas ventajas como son su simplicidad, robustez, tiempos de respuesta rápidos, posibilidad de un funcionamiento continuo o discontinuo, no tienen piezas móviles (fiabilidad mecánica), bajo peso (que implica menos problemas de inercia), fácil instalación y aplicación en la superficie permitiendo su reacondicionamiento, capacidad de control en tiempo real a altas frecuencias y bajo consumo de energía. Sin embargo, presentan como inconvenientes la necesidad de usar altas tensiones, problemas asociados con la interferencia electromagnética y la baja eficiencia en la conversión de energía.

Un actuador de plasma SDBD, en su configuración más simple, consta de dos electrodos metálicos colocados a ambos lados de un medio dieléctrico y dispuestos de forma asimétrica. Las características del actuador vienen determinadas por el material del que están fabricados los electrodos, por sus dimensiones: longitud x ancho x altura (L x W x h), la distancia o gap de separación entre los mismos (g) y por la naturaleza y ancho del material dieléctrico empleado (d). Un esquema del actuador se puede ver en la figura 1.

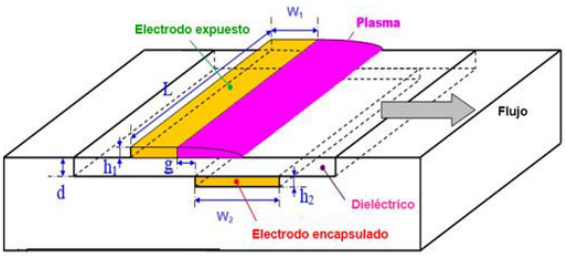


Figura 1. Esquema y caracterización geométrica de un SDBD.

Cuando se aplica a los electrodos una señal de corriente alterna de alta tensión, que excede el umbral de ruptura, el aire a ambos lados del material dieléctrico se ionizará. El electrodo conectado a tierra se recubre con un material aislante evitando la formación de plasma, recibiendo el nombre de electrodo encapsulado, mientras que el otro recibe el nombre de electrodo expuesto.

El aire débilmente ionizado, que se encuentra sobre el dieléctrico que cubre el electrodo encapsulado, está sometido a un gradiente del campo eléctrico producido por la configuración del electrodo, dando como resultado una fuerza en la dirección de la disminución del potencial de campo eléctrico que actuará sobre las moléculas neutras del fluido de trabajo. La velocidad del flujo del chorro tangencial, o viento eléctrico, producido por un actuador de plasma aumenta con la tensión y frecuencia aplicadas. Su velocidad máxima está muy cerca de la superficie, aproximadamente 0,5–1,0 mm por encima de ella. Este viento eléctrico inducido por un SDBD puede modificar las propiedades de la capa límite y, por lo tanto, la estructura del campo fluido. Más información de los mecanismos de interacción de las fuerzas electrohidrodinámicas pueden consultarse en la literatura [3, 4].

2. Configuración experimental

En esta sección se describirán las características generales de la instalación y del modelo de ensayo. La descripción de los actuadores de plasma SDBD, fabricados de forma manual, se realizará en los correspondientes apartados de la sección tercera.

2.1. Descripción del túnel de viento

Los ensayos del modelo de UAV se realizaron en el Túnel de Viento Nº 2, del Área de Aerodinámica Experimental del INTA. La instalación es de circuito cerrado con una cámara de ensayos abierta de medidas 2,8 x 1,9 m^2 por 4,9 m de largo, y de forma octogonal.

El modelo se sujetó mediante un dardo o sting, pudiéndose variar tanto el ángulo de ataque como el de resbalamiento. La velocidad máxima del viento es de 50 m/s con números Reynolds de $3{,}8 \times 10^6$/m.

Con el fin de obtener una buena calidad de la corriente fluida, la cámara de tranquilización del túnel de viento tiene una rejilla de honeycomb de aluminio de 18 cm de espesor y tres pantallas reductoras de turbulencia, obteniendo un nivel de turbulencia de 0,27%.

2.2. Modelo

El modelo utilizado, para la aplicación experimental del concepto de control de flujo mediante actuadores de plasma, es una réplica a escala, de un 52%, de un UAV desarro-

llado en el INTA y fabricado en aluminio que ha sido previamente utilizado para la caracterización de otro tipo de parámetros.

Se trata de un modelo del proyecto DIANA UAV, consistente en un blanco aéreo versátil para simular amenazas reales y futuras de proyectiles, constituyendo, además, una plataforma ideal para la investigación sobre tecnologías UAV de alta velocidad.

Para la medida de fuerzas y momentos aerodinámicos se instaló, dentro del modelo UAV, una balanza interna compuesta de seis puentes de Wheastone cada uno de ellos con cuatro bandas extensiométricas, dando sus resultados en ejes balanza, por lo que el sistema de coordenadas se mueve con el modelo. Estos puentes de Wheastone pueden estar sujetos a interferencias electromagnéticas y corrientes parásitas, comprobándose durante los ensayos que esta influencia fue despreciable.

La Figura 2 muestra el túnel nº 2 con el modelo de UAV instalado en la sección de ensayo y los ejes de referencia utilizados y la Figura 3 un esquema del modelo a escala real.

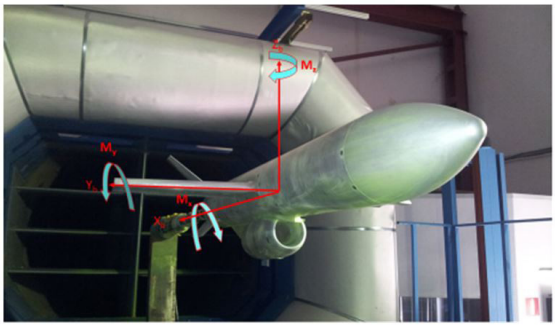


Figura 2. Modelo de UAV en la cámara de ensayos del túnel con los ejes de referencia.

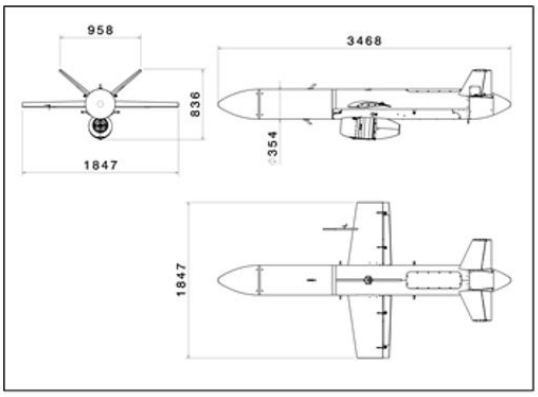


Figura 3. Dimensiones generales del UAV.

Aunque el modelo tiene buena rigidez, sin embargo presenta algunos inconvenientes. Uno de ellos se debe a que el aluminio no es el material más adecuado para la realización de los ensayos en túnel con actuadores de plasma, ya que se espera la existencia de interferencias electromagnéticas. Además es necesario usar alta tensión siendo el aluminio un material conductor. Pese a estas dificultades es una buena oportunidad para comprobar algunas de las afirmaciones hechas anteriormente, relativas a su fácil instalación y aplicación en superficies existentes sin cambios o sólo con ligeras modificaciones, así como comprobar la eficiencia del actuador cuando se aplican potencias reducidas para evitar interferencias.

3. Resultados y análisis

El objetivo de la presente investigación es demostrar que la actuación del plasma puede manipular el flujo sobre las superficies de sustentación (planos de ala y cola en V) de un vehículo aéreo no tripulado con el fin de mejorar sus actuaciones y controlar su vuelo. Específicamente, aumentar el ángulo de ataque de entrada en pérdida, al retrasar la separación del flujo, y la posibilidad de controlar los momentos de control mediante su accionamiento cuando están instalados en los bordes de salida de las superficies sustentadoras.

3.1. Efectos del actuador de plasma situado en el borde de ataque del ala

Los actuadores se montaron sobre la envergadura de cada una de las semialas. La longitud del electrodo encapsulado fue de 350 mm, con una anchura de 10 mm, mientras que la del electrodo expuesto era de 350 mm de longitud y 5 mm de ancho. El dieléctrico entre los electrodos estaba compuesto por tres capas de Kapton® con un espesor total de 200 µm. Los electrodos, hechos de cinta adhesiva de cobre, tenían una ligera superposición y el electrodo encapsulado estaba aguas abajo del electrodo expuesto. La línea de intersección se encontraba en la ubicación de cuerda x/c=0,05 en la superficie de succión. Los extremos de los electrodos se redondearon para evitar puntos de descarga y se les aplicó una señal de alta tensión con una forma de onda sinusoidal, caracterizada por su frecuencia y voltaje pico a pico.

En la figura 4 se muestran algunos de los resultados más relevantes obtenidos. Cuando el plasma no está actuando, el ángulo de entrada en pérdida es de unos 16º. Si continuamos aumentando el ángulo de ataque la sustentación disminuye debido al desprendimiento de la corriente. Si en estas condiciones disminuimos el ángulo de ataque el flujo comienza a readherirse, pero a un ángulo inferior al que se produjo la entrada en pérdida, creándose un ciclo de histéresis.

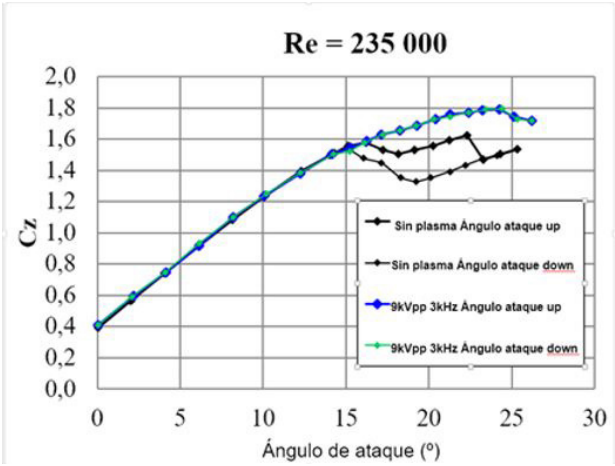


Figura 4. Curva de sustentación con relación al ángulo de ataque.

Sin embargo, con el accionamiento del plasma, el flujo se mantiene adherido retrasándose el ángulo de entrada en pérdida de 16º a 24º, aumentando la sustentación de 1,6 a 1,8, y desapareciendo el ciclo de histéresis.

3.2. Efectos del actuador de plasma situado en el borde de salida del ala

Se dispuso un actuador DBD en el alerón del ala de babor. El electrodo expuesto estaba fabricado con cinta de cobre de anchura 3 mm. La longitud del actuador fue de 160 mm y comenzaba a 10 mm del borde del ala. El electrodo encapsulado estaba hecho de cinta de aluminio, su borde de ataque se encontraba en la posición de la cuerda x/c=0,96 sobre el extradós continuando hasta el intradós. Como medio dieléctrico se utilizaron cinco capas de Kapton®.

Con el fin de evaluar al actuador de plasma, como dispositivo generador de momento de balance, se llevó a cabo un barrido deflectando el alerón del ala de estribor. Los valores deflectados fueron de 0º, ±5º; ±10º y ±20º midiéndose los correspondientes momentos de balance Cmx. Estos valores se compararon con los resultados obtenidos con el actuador de plasma instalado en el ala de babor. Todos los datos corresponden a un ángulo de ataque cero.

Una deflexión positiva del alerón del ala de estribor genera un momento de alabeo positivo, mientras que el actuador de plasma situado en el ala de babor produce un aumento de sustentación que genera un momento de alabeo negativo. La comparación entre los resultados obtenidos mediante el accionamiento por plasma y el accionamiento mecánico de la superficie móvil se muestra en la Figura 5, para tres velocidades.

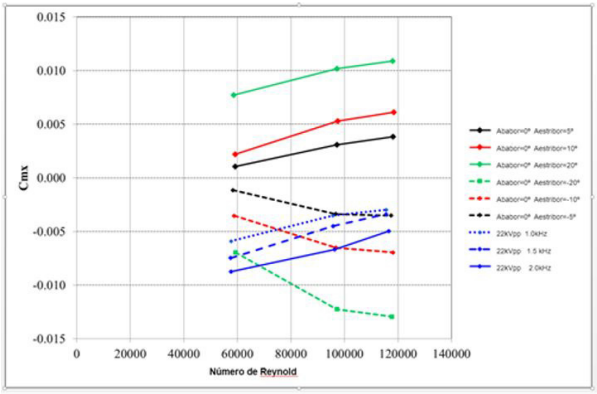


Figura 5. Comparación de momentos de balance con deflexión mecánica y con plasma.

Se observa que a números bajos de Reynolds el actuador de plasma alcanza el mismo coeficiente de momento que una desviación de alerón de -20º.

3.3. Efectos del actuador de plasma situado en el borde de salida del ruddervator

El ruddervator es la superficie de mando situada en el borde da salida de un avión con cola en V que combina las funciones de timón de dirección y timón de profundidad.

Para cada uno de ellos se fabricó un actuador DBD con las siguientes características: el electrodo encapsulado estaba hecho de cinta de aluminio con una longitud de 200 mm y ancho de 10 mm. El electrodo expuesto estaba hecho de cinta de cobre con una anchura de 4 mm, no existiendo gap entre ellos. Como medio dieléctrico se utilizaron cuatro capas de Kapton®.

Las mediciones se realizaron con un ángulo de ataque de cero grados, para un rango de velocidad de 3-5 m/s. Comprobándose que se podían generar los tres momentos de control, Cmx, Cmy y Cmz, y que los coeficientes obtenidos equivalían a una deflexión de entre -7º y -8º para números de Reynolds de 9 x 10^4

4. Otras aplicaciones

En esta sección se van a presentar brevemente distintas actuaciones y posibilidades de los actuadores de plasma. La descripción de los actuadores se omitirá, no obstante la fabricación de los actuadores DBD es similar a la descrita en la sección anterior.

4.1. Control de flujo sobre un modelo de coche

En este caso se empleó como modelo de ensayo una maqueta de coche, disponible en el Área de Aerodinámica Experimental. En la parte posterior del vehículo se dispuso

un actuador de plasma con el objeto de suprimir o mitigar el desprendimiento en esta zona, reduciendo de esta manera la resistencia de base. La figura 6 muestra el flujo sin y con actuación de plasma, demostrando la efectividad del actuador.

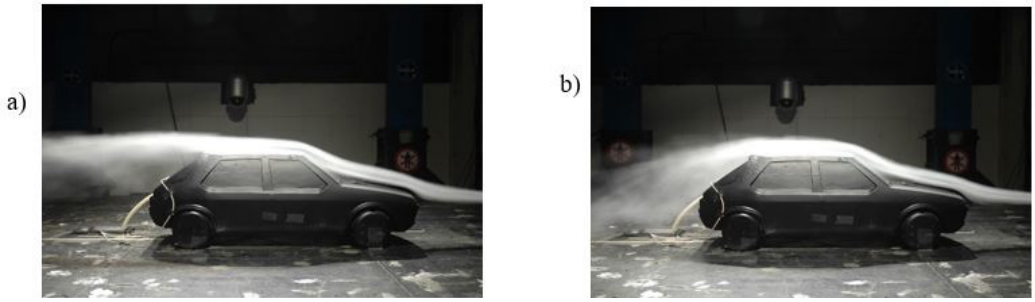


Figura 6. Actuación de un actuador de plasma sobre un coche. a) No plasma b) Plasma.

4.2. Propulsión en el espacio cercano

El actuador de plasma utilizado para este caso está basado en una descarga en corona, la descripción de su montaje y funcionamiento puede ser consultado en [5]. La descarga en corona ha sido empleada en multitud de aplicaciones, tales como precipitadores electrostáticos, mejora del enfriamiento en equipos electrónicos, producción de ozono, entre otras muchas.

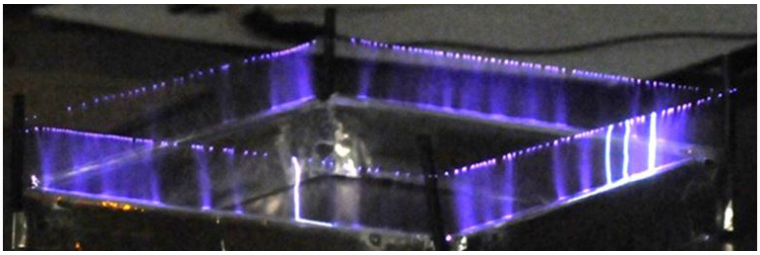


Figura 7. Dispositivo propulsado por el viento iónico generado por una descarga en corona.

La investigación como elemento propulsivo, aunque es conocida desde hace mucho tiempo, ha aumentado desde la publicación de un estudio elaborado en NASA [6]. Este estudio sugiere que si se pudieran conseguir, de forma simultánea, los ratios de empuje/potencia de 20N/kW y de empuje/área de 20N/m2, el uso de la descarga en corona sería adecuado para la propulsión espacial y el vuelo estratosférico. La figura 7 muestra el vuelo de un pequeño levitador propulsado por esta tecnología.

4.3. Control de temperatura

Los actuadores de plasma, tanto los basados en descarga en corona como los basados en DBD, tienen otro campo de aplicación en la mejora de la transferencia de calor en condiciones atmosféricas. Con respecto a los DBD se ha investigado su uso para optimizar la película de refrigerante en el enfriamiento en alabes de turbina [7]. Otra posible línea de investigación, de una gran importancia, es su uso como dispositivo generador de calor para producir deshielo y para la prevención de la formación de hielo [8].

5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos con un UAV ha quedado demostrado que los actuadores de plasma DBD tienen el potencial de reemplazar, a bajos números de Reynolds, las superficies de control accionadas por medios mecánicos. Esto conduciría a una reducción de peso, una reducción de costos de fabricación, mayor fiabilidad y tiempos de respuesta más rápidos, entre otros beneficios.

Los resultados han demostrado que el accionamiento por plasma en el borde delantero de un UAV puede retrasar la separación del flujo, suprimir el ciclo de histéresis y mejorar la sustentación del modelo. Las pruebas realizadas con actuadores situados en el borde de salida han demostrado su capacidad para generar momentos de control en los tres ejes con el suficiente potencial para controlar la actitud de un UAV.

Los actuadores de plasma no solo tienen su campo de aplicación en el control de flujo, por lo que se han mostrado algunas de las múltiples aplicaciones en las que pueden mejorar o sustituir a los sistemas existentes.

Referencias

1. Cattafesta III LN, Sheplak M. Actuators for active flow control. *Annual Review of Fluid Mechanics*. **2011**;43: 247-272.
2. Langmuir I. Oscillations in ionized gases. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* **1928**; 14(8): 627-637.
3. Enloe CL, MacLaughlin TE, Van Dyken RD, Kachner KD, Jumper EJ, Corke TC. Mechanisms and response of a single-dielectric barrier plasma actuator: plasma morphology. *AIAA Journal*. **2004**. 42: 589-594.
4. Enloe CL, MacLaughlin TE, Van Dyken RD, Kachner KD, Jumper EJ, Corke TC. Mechanisms and response of a single-dielectric barrier plasma actuator: geometric effects. *AIAA Journal*. **2004**. 42: 595-604.
5. Conesa, A, Sánchez M, León M, Cabrera Á. Some geometrical and electrical aspects on the wire-to-cylinder corona discharge. *Journal of Electrostatics*. **2019**; 100.

6. Wilson J, Perkins HD, Thompson WK. An investigation of ionic wind propulsion. *Tech. Rep. NASA/TM 2009-215822*. **2009**.
7. Audier P, Fénot M, Bernard N, Moreau E. Film cooling effectiveness enhancement using surface dielectric barrier discharge plasma actuator. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. **2016**; 1:11.
8. Meng X, Cai J, Tian Y, Han D, Hu H. Experimental study of deicing and anti-icing on a cylinder by DBD plasma actuation. *47Th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. AIAA 2016-4019*. **2016**: 1:14.

Detección y clasificación de objetos camuflados en el espectro visible utilizando cámaras hiperespectrales embarcadas

Delgado Fernández, Alba[1], Blázquez García, Rodrigo[1] y Burgos García, Mateo[1,*]

[1] Observatorio Horizontes en Defensa y Seguridad ISDEFE-UPM. Av. Complutense, 30. 28040 Madrid. Correos electrónicos: alba.delgado.fernandez@alumnos.upm.es (ADF), rodrigo.blazquez@upm.es (RBG), mateo@gmr.ssr.upm.es (MBG).

* Autor Principal y responsable del trabajo: mateo@gmr.ssr.upm.es (MBG).

Resumen: Entre las líneas de trabajo del Observatorio Horizonte en Defensa y Seguridad ISDEFE-UPM se encuentra el análisis de tecnologías de sensores embarcados con aplicaciones emergentes en sistemas ISTAR (Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance). En esta comunicación, se realiza un estudio de la viabilidad técnica de los sensores hiperespectrales embarcados en plataformas aéreas o satelitales para la detección y clasificación de objetos camuflados. Las imágenes hiperespectrales contienen la respuesta espectral de cada píxel para múltiples bandas del rango visible e infrarrojo. De esta forma, su procesado permite potencialmente la detección y clasificación de objetos camuflados al ojo humano gracias a las diferentes respuestas espectrales que presentan los materiales al considerar también múltiples bandas en el infrarrojo. Para evaluar dichas capacidades, se ha propuesto una cadena de procesado con una carga computacional asumible basada en: (1) algoritmo PCA (*Principal Component Analysis*) para reducir la dimensionalidad de los datos; (2) segmentación mediante el algoritmo *Mean-shift*; (3) detección de las anomalías utilizando el algoritmo *Reed-Xiaoli* (RX), y (4) clasificación mediante *sparse regression*. Se ha analizado el desempeño de esta cadena de procesado utilizando imágenes hiperespectrales sintéticas generadas a partir de firmas espectrales de bases de datos, incluyendo efectos que degradan la calidad de la imagen como: ruido de adquisición, mezcla de firmas espectrales o variaciones aleatorias de las firmas de cada material. Además, se han procesado imágenes hiperespectrales reales de los sensores AVIRIS y HYDICE y multiespectrales del satélite Sentinel-2. Los resultados ponen de manifiesto la necesidad de mejorar la robustez del algoritmo de clasificación frente a mezclas de firmas y a variaciones respecto de la base de datos, pero muestran el potencial de esta tecnología en aplicaciones de teledetección.

Palabras clave: Clasificación, detección de anomalías, firma hiperespectral, Reed-Xiaoli.

1. Introducción

Actualmente existe la necesidad de detectar la presencia de objetos, personas o cualquier tipo de material camuflado, no visible al ojo humano, que pudieran indicar el desarrollo de actividades ilícitas. Las infraestructuras utilizadas en actividades ilegales como el tráfico de drogas o de personas son frecuentemente camufladas utilizando materiales plásticos visualmente similares al entorno, por lo que su detección utilizando cámaras de espectro visible embarcadas en plataformas aéreas o satelitales es poco efectiva. Por este motivo, como el camuflaje óptico suele limitarse al espectro visible, para abordar la detección y clasificación de estos objetos, se propone el uso de la tecnología hiperespectral, que permite medir la reflectividad espectral de los materiales presentes en cada píxel de la imagen para un gran número de bandas contiguas que se extienden en el espectro visible e infrarrojo [1]. De esta forma, al presentar cada material una curva de reflectividad característica, denominada firma espectral, se puede clasificar cada objeto y determinar si se trata de un posible indicio de actividades ilícitas.

Además de sus aplicaciones en el ámbito de la defensa y seguridad, la tecnología hiperespectral presenta también múltiples aplicaciones civiles y de interés científico (agricultura, calidad y seguridad de los alimentos, exámenes forenses de documentos, …) [2]. Por este motivo, dado el elevado potencial de esta tecnología, el objetivo de esta comunicación es evaluar las capacidades de los sensores hiperespectrales embarcados en plataformas aéreas o satelitales en la detección de objetos camuflados.

Para ello, se propone una cadena de procesado de imágenes hiperespectrales que lleva a cabo la detección y clasificación de anomalías (píxeles cuya firma espectral difiere de la del fondo de la imagen), describiendo los diferentes algoritmos empleados para reducir la dimensionalidad de los datos, segmentar las imágenes y realizar dicha detección y clasificación. Posteriormente, para analizar la robustez de los algoritmos, se evalúa su funcionamiento utilizando imágenes hiperespectrales generadas sintéticamente, incluyendo distintos efectos que degradan su calidad (ruido de adquisición, variación aleatoria de las firmas espectrales y mezcla de firmas espectrales). Por último, se comentarán los resultados del procesado de imágenes hiperespectrales y multiespectrales reales.

2. Descripción cadena de procesado evaluada

Como se observa en la Figura 1, el proceso completo incluye una etapa de adquisición de datos utilizando sensores hiperespectrales, en la que se genera la imagen hiperespectral (HSI) (Figura 2) llevando a cabo correcciones atmosféricas y filtrado de ruido, y una etapa de procesamiento, cuyo objetivo es detectar y clasificar los blancos en la imagen. Este artículo se centra en el procesado del cubo hiperespectral, asumiendo que los operadores de los sensores proporcionan la imagen ya corregida y filtrada.

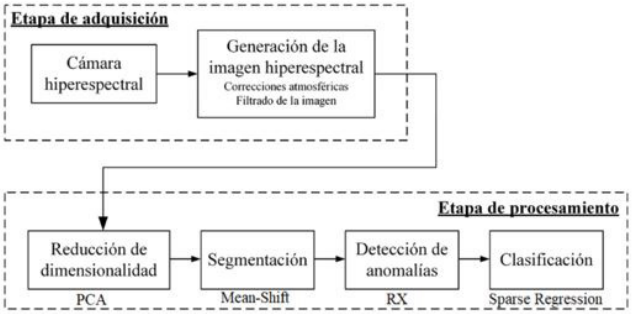


Figura 1. Esquema del proceso de adquisición y procesado de imágenes hiperespectrales.

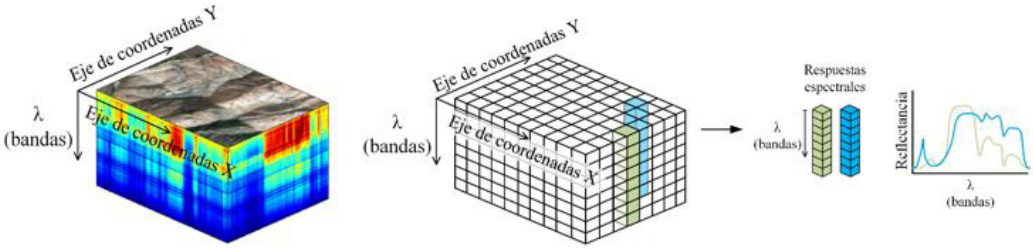


Figura 2. Cubo de datos hiperespectrales en el que cada píxel de la imagen contiene la reflectividad espectral medida.

En base a la cadena de procesada propuesta, se propone llevar a cabo un preprocesamiento de los datos para segmentar la imagen dividiéndola en regiones de características espectrales similares. Para ello se aplicarán algoritmos de selección de características (*Feature Selection* [3]), para reducir la dimensionalidad inicial del problema, y algoritmos de clustering para agrupar los píxeles por zonas [4]. Una vez segmentada la imagen, se lleva a cabo la detección de posibles objetos ocultos o blancos de interés. Por último, tras detectar las posibles anomalías presentes en la imagen, se propone aplicar una última etapa de clasificación, para minimizar las falsas alarmas del sistema al considerar únicamente los materiales de interés que pueden ser indicios del desarrollo de actividades ilícitas.

2.1. Reducción de dimensionalidad y segmentación de la imagen

Para llevar a cabo la reducción de dimensionalidad del cubo hiperespectral se emplea el algoritmo PCA (*Principal Component Analysis*) [5], el cual realiza una transformación ortogonal convirtiendo las observaciones de un conjunto de variables originales en un conjunto de variables linealmente independientes, denominadas componentes principales, y ordenadas de mayor a menor varianza. De esta forma, los datos originales pueden aproximarse mediante la proyección sobre el subespacio de dimensión reducida generado por

los primeros componentes principales (PC). Al aumentar el número de PCs considerados se reduce el error de aproximación a costa de aumentar la dimensionalidad, por este motivo, en la cadena de procesado implementada se han considerado los tres primeros PCs.

A continuación, sobre los datos de dimensión reducida, se aplica el algoritmo de clustering *Mean-Shift* [6] para realizar una agrupación de los datos obtenidos con PCA. Este algoritmo se basa en el uso de ventanas deslizantes que se actualizan y convergen hacia áreas con más densidad de puntos.

2.2. Detección de anomalías

Cuando se emplean imágenes hiperespectrales para la detección de blancos, generalmente, no se dispone de información a priori de las características espectrales de los objetos de interés. En estos casos, los algoritmos de detección utilizados deben identificar las anomalías presentes en la imagen, determinando si los píxeles presentan una diferencia significativa respecto de los píxeles del fondo. El algoritmo Reed-Xiaoli (RX) [7,8] es un detector de anomalías adaptativo con características CFAR (*Constant False Alarm Rate*) que se basa en el GLRT (*Generalized- Likelihood Radio Test*). Este algoritmo determina la distancia de Mahalanobis entre la observación y el conjunto de datos del fondo determinado por la media y la matriz de covarianza, y declara la detección de una anomalía si dicha distancia supera un determinado umbral η que fija la probabilidad de falsa alarma del algoritmo:

$$RX(x) = (x-\hat{\mu})^T \left(\frac{N}{N+1}\hat{\Gamma}_x + \frac{1}{N+1}(x-\hat{\mu})(x-\hat{\mu})^T\right)^{-1} (x-\hat{\mu}) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \eta \tag{1}$$

donde la matriz de covarianza ($\hat{\Gamma}_x$) y firma especial media ($\hat{\mu}$) se estiman considerando todos los píxeles agrupados en cada conjunto obtenido mediante el algoritmo *mean-shift*, y N es el número de píxeles de referencia.

2.3. Clasificación

Esta última etapa se realiza mediante algoritmos basados en *sparse regresión* [9,10] teniendo en cuenta la limitada resolución espacial de los sensores hiperespectrales, que da lugar, generalmente, a una mezcla de las firmas espectrales de los distintos materiales que componen cada píxel. Este algoritmo se basa en un modelo de mezcla lineal [11], el cual asume que la curva espectral medida para un píxel es una combinación lineal de las firmas espectrales de componentes. A partir de este modelo se puede llevar a cabo un algoritmo de desmezclado (*unmixing*) basado en técnicas sparse regression para encontrar el subconjunto óptimo de firmas espectrales de una base de datos que mejor modela la curva espectral medida de cada píxel.

3. Resultados

3.1. Resultados obtenidos en imágenes sintéticas

Para evaluar el funcionamiento y la robustez de la cadena de procesado implementada sobre imágenes sintéticas, se han generado distintos cubos hiperespectrales con zonas de distintos materiales a partir de firmas espectrales obtenidas de la base de datos USGS [12], que presentan diferentes efectos que degradan la calidad de la imagen y que se dan habitualmente en las imágenes reales (variaciones respecto a las firmas contenidas en la base de datos, mezcla de firmas espectrales y ruido del sensor).

Para generar las imágenes sintéticas, se han seleccionado las firmas espectrales de cinco materiales (hierba, pino, arena, asfalto y plástico) (Figura 3a). La firma espectral del material plástico camuflado, que representa la anomalía que debe ser detectada, se considera igual a la firma de la hierba en el espectro visible. A partir de estas firmas se han generado imágenes espectrales de 100x100 píxeles y 100 bandas espectrales uniformemente distribuidas en el rango de 0.35 µm a 2.4 µm. En la Figura 3b, se presenta la imagen para la banda 50 (1.36 µm) en escala de niveles de reflectividad y la transformación del cubo hiperespectral a RGB (*red*, *green*, *blue*) de la imagen hiperespectral sintética que incluye variación de firmas hiperespectrales, ruido de sensor y mezcla en los bordes de las zonas.

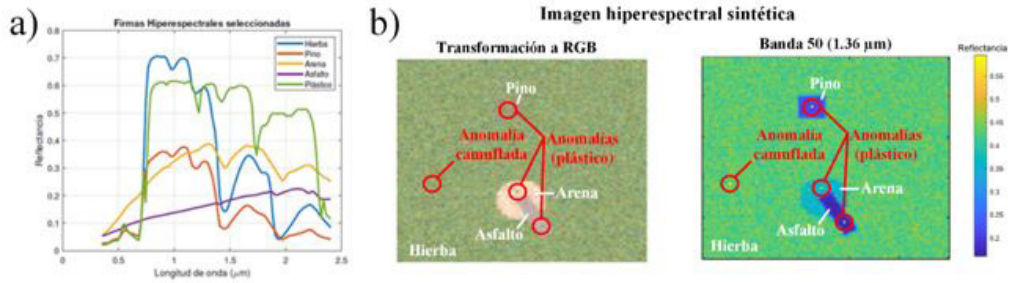


Figura 3. Generación de imágenes hiperespectrales sintéticas: a) Firmas hiperespectrales de los materiales seleccionados; b) Transformación a RGB e imagen de niveles de reflectividad en la banda 50 para el cubo hiperespectral sintético con ruido de sensor (SNR = 25 dB), mezcla de firmas y variaciones respecto a la base de datos.

A continuación, para las imágenes sintéticas con mezcla de firmas espectrales en los bordes de las zonas y ruido de sensor (SNR = 25 dB) (Figura 4a) y con firmas espectrales variadas respecto de la base de datos y ruido de sensor (SNR = 25 dB) (Figura 4b), se representan los resultados obtenidos tras aplicar PCA y la segmentación sobre la nube de puntos realizada con el algoritmo *mean-shift*, observando que la agrupación en cuatro materiales principales se realiza de forma adecuada, y la detección de las anomalías utilizando el algoritmo RX.

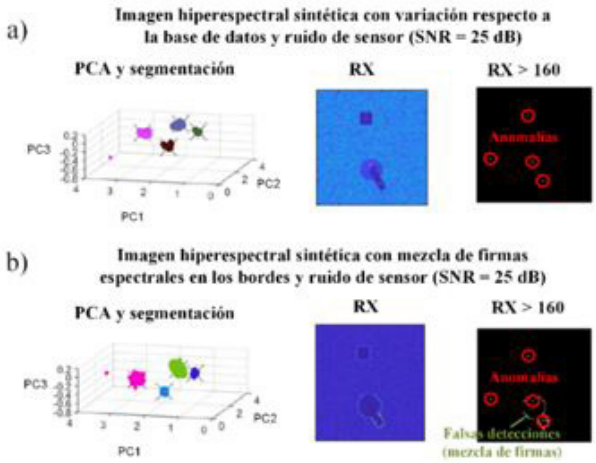


Figura 4. Resultados de PCA, mean-shift (cada color representa un grupo obtenido) y RX para imágenes hiperespectrales con ruido de sensor (SNR = 25 dB) y: a) variación respecto de la base de datos; b) mezcla de firmas.

Analizando los resultados de la Figura 4a, se observa que, para la imagen con variación de firmas y ruido de sensor, se detectan adecuadamente las anomalías. Sin embargo, en la Figura 4b, se observa que la mezcla de firmas espectrales en los bordes de las zonas da lugar a detecciones que constituyen falsas alarmas. Por este motivo, como en las imágenes reales se espera que se produzcan mezclas de firmas espectrales debido a la limitada resolución de los sensores, se ha propuesto realizar un desmezclado en los píxeles con detección para determinar qué materiales componen dichas anomalías y considerar únicamente aquellas que contienen materiales que sean indicios de actividades ilícitas.

Por último, para comprobar la robustez del algoritmo de desmezclado y clasificación basado en *sparse regression*, se ha probado a clasificar firmas hiperespectrales en píxeles puros y con mezcla y se ha medido la variación de la abundancia detectada para un píxel de material «hierba» en función de la SNR de la imagen. Como puede observarse en la Figura 5a, que representa las abundancias obtenidas de distintos materiales en el píxel puro de «plástico», la anomalía compuesta por material «plástico» es clasificada correctamente, aunque no se obtiene una abundancia del 100% debido a la similitud entre las distintas firmas contenidas en la base de datos y al ruido de sensor. A su vez, en la Figura 5b, se observa que en el píxel mezcla se clasifican los dos materiales de la mezcla («arena» y «hierba»), pero que aparecen además otros materiales erróneos con menor abundancia que podrían llevar a confusión. Para determinar la robustez frente a ruido, la Figura 5c representa la abundancia de «hierba» obtenida para un píxel de «hierba» en

función de la SNR de la imagen, comprobando que se requieren SNR altas (superiores a 40 dB). Sin embargo, esta especificación es común en sensores hiperespectrales.

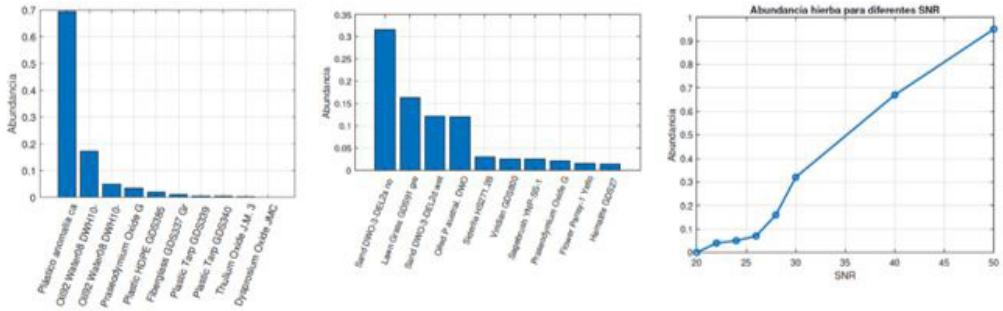


Figura 5. Algoritmo de desmezclado y clasificación de firmas espectrales: a) Desmezclado de un píxel de «plástico» puro; b) Desmezclado de un píxel mezcla de «arena» y «hierba»; c) Variación de la abundancia obtenida de «hierba» en función de la SNR para un píxel de «hierba».

3.2. Resultados obtenidos en imágenes reales

En este apartado, se aplica la cadena de procesado a imágenes hiperespectrales obtenidas de un dataset de imágenes de los sensores AVIRIS y HYDICE [13], y a imágenes multiespectrales obtenidas del satélite Sentinel-2.

a) Procesamiento de imágenes hiperespectrales del sensor AVIRIS y HYDICE

Como se ha descrito anteriormente, en primer lugar, se lleva a cabo la segmentación de las imágenes utilizando *mean-shift* tras haber reducido la dimensionalidad de los datos mediante PCA, ya que las imágenes procesadas presentan, en este caso, más de 200 bandas, mostrando los resultados obtenidos en la Figura 6 para dos conjuntos de datos. Como puede observarse, las imágenes hiperespectrales reales dan lugar a nubes de puntos más difícilmente separables debido a su mayor complejidad. Sin embargo, el algoritmo de segmentación utilizado permite dividir las imágenes en zonas aproximadamente homogéneas. A su vez, también se representan las detecciones obtenidas con el algoritmo RX junto con los umbrales fijados, que permiten detectar bastantes anomalías correspondientes a elementos de la escena que no corresponden con el fondo, como aviones o barcos. Por último, se observa la clasificación del material más abundante presente en cada anomalía, aunque los resultados de esta etapa no son completamente satisfactorios y debe mejorarse la robustez del algoritmo para imágenes reales, posiblemente limitando el número de materiales que componen la base de datos considerando únicamente materiales característicos de distintos tipos (metal, mineral, plantas, agua, plásticos, etc.).

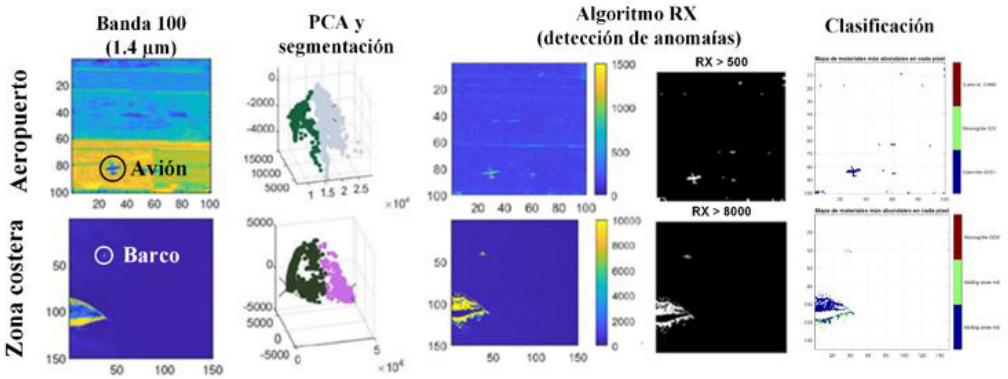


Figura 6. Resultados del procesamiento de imágenes hiperespectrales de los sensores AVIRIS y HYDICE [13], que contienen elementos como barcos o aviones.

b) Procesamiento de imágenes multiespectrales Sentinel-2

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al aplicar el procesamiento a una imagen multiespectral tomada con el satélite Sentinel-2 con 13 bandas espectrales [14]. Se ha escogido una zona que presenta elementos como placas solares que pueden ser considerados anomalías. En la Figura 7, se representan los resultados obtenidos en las distintas etapas del procesado de la imagen. Como puede observarse, la segmentación de la imagen se realiza adecuadamente en cuatro zonas con propiedades espectrales similares (zona amarilla correspondiente a lagos, zona roja correspondiente a áreas boscosas o con vegetación verde, zona azul correspondiente a cultivos de secano y zona

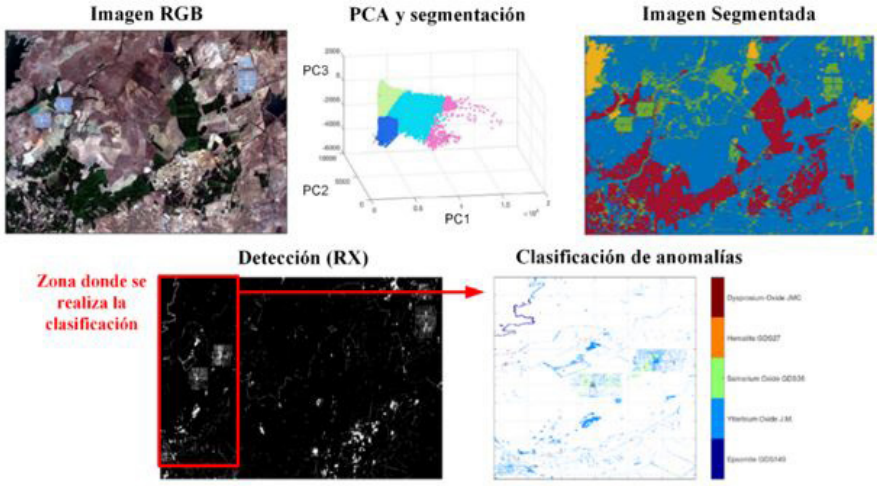


Figura 7. Resultados del procesamiento de una imagen multiespectral del satélite Sentinel-2 [14].

verde correspondiente principalmente a infraestructuras como placas solares o carreteras). A su vez, el algoritmo de detección da lugar a anomalías principalmente correspondientes con elementos relacionados con dichas infraestructuras (placas solares, edificios y carreteras), cuya detección puede resultar de interés, aunque, además, se observan algunas anomalías no deseadas, especialmente en los bordes de las algunas zonas como los lagos o las zonas de cultivo. Aunque los resultados de la clasificación no son del todo satisfactorios, ya que no se obtiene correctamente el material que compone cada anomalía, pueden dar una idea del tipo de material (mineral, vegetación, agua, etc.).

Lógicamente, el menor número de bandas de los sensores multiespectrales da lugar a un menor desempeño de los algoritmos de detección y clasificación de anomalías, aunque superior a los sensores que cubren únicamente el espectro visible. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran el potencial de estos sensores embarcados en plataformas satelitales en aplicaciones de inteligencia, al presentar una cobertura global (generalmente con órbita heliosíncrona), pudiendo aplicar algoritmos de detección de cambios (*change detection*) considerando las imágenes capturadas en múltiples pasadas.

4. Conclusiones

Las imágenes hiperespectrales permiten obtener curvas muy detalladas del comportamiento espectral de objetos, gracias al número de bandas que recoge el sensor. Se trata de una tecnología emergente en las áreas de seguridad y defensa, con cada vez un mayor número de aplicaciones. Entre estas aplicaciones, dentro del campo de la teledetección, destaca la posibilidad de detectar objetos camuflados ópticamente al ojo humano utilizando imágenes hiperespectrales. En esta comunicación, se ha propuesto una cadena de procesamiento de imágenes hiperespectrales para la detección y clasificación de anomalías.

Para ello, la cadena propuesta realiza en primer lugar una reducción de la dimensionalidad de los datos utilizando el algoritmo PCA, con el objetivo de reducir la carga computacional al observar que los tres primeros componentes principales contienen la mayor parte de la información y permiten separar materiales con distintas respuestas espectrales. Posteriormente, se realiza una segmentación de la imagen hiperespectral mediante el algoritmo *mean-shift* aplicado a los datos transformados sobre los tres primeros componentes principales. En esta etapa, se ha observado que no siempre es adecuado segmentar la imagen en un mayor número de clústers, ya que la sobresegmentación puede afectar a la detección posterior de las anomalías en la imagen y producir su ocultamiento.

Tras realizar la segmentación, se lleva a cabo la detección y posterior clasificación de las anomalías. Para ello se ha utilizado el algoritmo RX empleando los conjuntos ob-

tenidos en la etapa de segmentación para calcular una media y matriz de covarianza de cada conjunto. Por último, la clasificación de las anomalías detectadas se lleva a cabo mediante un algoritmo basado en *sparse regression*. Se observó que, en imágenes con poco ruido, el clasificador funciona correctamente, pero con SNR reducidas, el clasificador no presenta un funcionamiento adecuado, poniendo de manifiesto la dificultad de la clasificación de los materiales, especialmente en situaciones con ruido, mezcla de firmas espectrales o variaciones de las firmas espectrales respecto de las contenidas en la base de datos.

Por tanto, se concluye que los algoritmos implementados (PCA, Mean-shift y RX) permiten la detección de anomalías, pero que los algoritmos de clasificación deben mejorarse para realizar una clasificación adecuada de los materiales que permita reducir el número de falsas alarmas del algoritmo producidas por ruido o por mezcla de firmas espectrales, al eliminar aquellas detecciones que no correspondan con los materiales de interés.

Aunque, los resultados obtenidos muestran el potencial de la tecnología hiperespectral, existen actualmente limitaciones que deben ser estudiadas para obtener sistemas operativos, especialmente relacionadas con la carga computacional y la adquisición y procesado de la imagen en tiempo real, y de coste asumible.

Referencias

1. Manolakis D, Marden D, Shaw G: Hyperspectral image processing for automatic target detection applications. *Lincoln Lab. J.* **2013**;14(1): 79-116.
2. Khan MJ, Khan HS, Yousaf A, Khurshid K, Abbas A: Modern Trends in Hyperspectral Image Analysis: A Review. *IEEE Access*. **2018**;6:14118-14129.
3. Jia X, Kuo BC, Crawford MM: Feature mining for hyperspectral image classification. *Proc. IEEE*. **2013**;101(3):676-697.
4. Cisz A, Schott J: Performance comparison of hyperspectral target detection algorithms. *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery*. **2006**:839-849.
5. Ng A: Principal Component Analysis (CS229 Lecture Notes), 2017 [En línea]. Disponible en: http://cs229.stanford.edu/notes/cs229-notes10.pdf [Accedido: 05/09/2019].
6. Cheng Y: Mean shift, mode seeking, and clustering. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **1995**;17(8):790-799.
7. Matteoli S, Diani M, Corsini G: A tutorial overview of anomaly detection in hyperspectral images. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* **2010**;25(2):5-27.
8. Stein DWJ, Beaven SG, Hoff LE, Winter EM, Schaum AP, Stocker AD: Anomaly detection from hyperspectral imagery. *IEEE Signal Process. Mag.* **2002**;19(1):58-69.

9. Bioucas-Dias JM et al.: Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression-based approaches. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2012**;5(2):354-379.
10. Li F, Zhang P, Lu H: An Improved Unsupervised Band Selection of Hyperspectral Images Based on Sparse Representation. *Stud. Comput. Intell.* **2018**;810:135-145.
11. Bioucas-Dias JM, Plaza A, Camps-Valls G, Scheunders P, Nasrabadi NM, Chanussot J: Hyperspectral remote sensing data analysis and future challenges. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* **2013**;1(2):6-36.
12. Spectral Lab, USGS [En línea]. Disponible en: https://www.usgs.gov/labs/spec-lab [Accedido: 05/09/2019].
13. Kang X: Hyperspectral Data Sets [En línea]. Disponible en: http://xudongkang.weebly.com/data-sets.html [Accedido: 05/09/2019].
14. ESA, Sentinel Data [En línea]. Disponible en: https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home [Accedido: 05/09/2019].

Nuevas soluciones para la detección de compuestos NRBQe en contenedores (COSMIC)

Zamora Pérez, Daoíz‡*, Piñero González, María Ysabel‡, Pérez Velasco, Sergio‡, Delgado Ballesteros, Rafael‡ y Amo-González, Mario‡

‡ SEADM S.L., Parque tecnológico de Boecillo.

* Autor principal y responsable del trabajo: daoiz.zamora@seadm.com (DZP).

Resumen: SEADM, empresa española desarrolladora de instrumentación analítica en el campo de la seguridad, está inmersa en un proyecto de investigación denominado COSMIC, con el objeto de desarrollar tecnología para la detección de amenazas NRBQe en contenedores marítimos. Los desarrollos cubren diversas tecnologías:

1) **Tecnología GC-DMA-F-DMA**. La combinación de cromatografía de gases multicapilar con espectrometría diferencial de movilidad en tándem con fragmentación intermedia (GC-DMA-F-DMA), proporciona límites de detección de pocos picogramos (<30 pg) en muestras atmosféricas. Pese a estas notables prestaciones, dicha tecnología es asequible, al no requerir de alto vacío a diferencia de la espectrometría de masas. Esto permite una solución con prestaciones revolucionarias a muy bajo coste. El sistema será sometido a ensayos reales en el puerto de Valencia.

2) **Tecnología DMA-MS/MS**. La tecnología basada en DMA (análisis diferencial de movilidad)-MS/MS (espectrometría de masas de triple cuadrupolo), que ha logrado la detección de 0.01 ppq de RDX con tasas de falsas alarmas menores al 1%, se ha aplicado a la detección de agentes químicos (gas sarín y gas mostaza) usando simulantes no tóxicos que serán probados en el Puerto de Rotterdam en 2020. Esta tecnología se utilizará asimismo para la identificación de bacterias, a través del análisis de compuestos característicos de su metabolismo. Ello permitirá la detección de amenazas bacteriológicas a través de sus patrones de olor; el proyecto se ensayará con bacterias reales patógenas en colaboración con el CSIC.

3) **Detección de virus mediante técnicas de movilidad iónica**. Un nuevo sistema de identificación de virus en muestras biológicas se está desarrollando en colaboración con la Universidad de Yale, basado en un equipo de movilidad iónica. Los ensayos iniciales se llevarán a cabo con virus de Hepatitis B sin genoma, que se extrapolarán a virus reales con diámetros nanométricos de hasta 200 nm.

El conjunto de soluciones está en una fase intermedia de desarrollo, con resultados extraordinarios que serán ensayados en contenedores reales a lo largo de 2020.

Palabras clave: Detección, Amenaza, NRBQe, Contenedor, IMS, Movilidad Iónica, Espectrometría de Masas.

1. Introducción

Los materiales CBRNE (Químicos, Biológicos, Radiológicos, Nucleares y Explosivos) utilizados por los terroristas, son una amenaza real y creciente dentro de la Unión Europea y a nivel global. Existe un gran desafío en lo relativo a la inspección eficiente de contenedores para este grupo de amenazas, ya que actualmente no hay una solución para hacer frente al problema. A modo de ejemplo, cabe destacar el caso de estudio de amenazas CBRN de la CE publicado por CSES (2011) [1], el cual indica las principales amenazas CBRNE que podrían utilizarse para atacar a personas o infraestructuras.

1.1. Estado del arte

La UE tiene varios tipos de puntos de cruce fronterizo, los cuales se pueden agrupar en tres tipos principales: fronteras marítimas, aéreas y terrestres, con métodos de inspección totalmente distintos. El proyecto COSMIC se dirige al escenario del análisis de contenedores de carga en fronteras marítimas, donde actualmente se utiliza un enfoque basado en la selección de objetivos para su inspección, en función de la información disponible (país de origen, tipo de carga, historial, etc.). Estas inspecciones están centradas básicamente en mercancías de contrabando como el tabaco, drogas u objetos ilegales, pero existe una importante brecha de seguridad respecto a los materiales CBRNE.

El actual flujo de inspección es por tanto muy limitado en términos de sus capacidades de detección de amenazas CBRNE, así como en los tiempos de inspección. Por ejemplo, en el puerto de Rotterdam (Holanda), el más grande de la UE, tan solo un 0,6% de los contenedores manejados durante el año 2017 pudieron ser escaneados por rayos X. De los 50.000 contenedores analizados, unos 1.500 se enviaron para inspección física. En aproximadamente 500 de los contenedores se identificó una anomalía de algún tipo tras la inspección física (la cual requiere unas 4 horas de 2 agentes). Estos datos alertan de la necesidad de un sistema de análisis eficiente y fiable.

1.2. Descripción del proyecto

El proyecto COSMIC incluye el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de detección basado en tres etapas (primaria, secundaria e inspección manual) utilizando un nuevo conjunto de dispositivos de detección innovadores en cada una de las tres etapas. La función de la primera etapa (primaria) es realizar una inspección rápida

CBRNE, combinada con otras comprobaciones de seguridad. Solo los contenedores sospechosos pasarán a la detección secundaria, donde se hará un análisis más detallado para confirmar la sospecha mediante el uso de un nuevo conjunto de detectores para agentes químicos, biológicos y explosivos con distintas tecnologías, con el fin de mejorar la eficiencia del sistema. Tanto las inspecciones primarias como las secundarias se realizarán en contenedores cerrados. La tercera etapa (inspección manual) se realizará, ya con el contenedor abierto, en aquellos contenedores sospechosos durante la inspección secundaria. COSMIC utilizará nuevos dispositivos de detección con capacidad para proporcionar resultados rápidos en campo, sin necesidad de enviarlo a un laboratorio externo y tener que esperar durante varias horas/días a su análisis.

El consorcio del proyecto COSMIC está formado por tres empresas comerciales (ATOS, Lingacom y SEADM), tres institutos de investigación (CSIC, Technion y Ben-Gurion University) y usuarios finales como la Guardia Civil, la Administración de Aduanas Holandesas y la Policía Nacional Israelí.

1.3. Objetivos del proyecto

El objetivo general del proyecto COSMIC es el de cerrar la brecha de seguridad principal de las aduanas en materiales CBRNE, facilitando la inspección rápida de gran cantidad de contenedores y vehículos en puertos marítimos y en el cruce de fronteras, utilizando para ello un enfoque basado en tres etapas. Como objetivos específicos de cada una de las distintas amenazas CBRNE, desarrollados por SEADM en el proyecto COSMIC, cabría destacar:

1) Desarrollo de nuevos sensores para la **detección de explosivos** basados en Análisis de Vapor (extracción de aire de los contenedores), utilizando Tecnología GC-DMA-F-DMA para la etapa primaria, y Tecnología DMA-MS/MS para la etapa secundaria.

2) Desarrollo de un nuevo sensor para la **detección de agentes químicos y biológicos** en la etapa secundaria, basado en Análisis de Vapor, con Tecnología DMA-MS.

3) Desarrollo de un nuevo sensor para la **detección de virus**, basado en Tecnología ES-CR-DMA.

2. Desarrollo

El desarrollo del proyecto COSMIC, implica, además del desarrollo analítico del detector, llevar a cabo un trabajo experimental donde se están utilizando diversos reactivos químicos, estándares e instrumentación analítica, los cuales se detallan a continuación.

2.1. Reactivos y estándares

Uno de los objetivos del proyecto es el estudio de los agentes de guerra química (en inglés, CWA) gas mostaza y somán, para lo cual se emplearon estándares de alta pureza analítica (>99%) correspondientes a compuestos simulantes: 2-cloroetil etil sulfuro (2-CEES) y malonato de dietilo (DEM) respectivamente [2,3]. En la etapa final del proyecto se utilizarán muestras reales para su posterior estudio y análisis.

2.2. Instrumentación analítica

A continuación, se detallarán las diferentes Tecnologías empleadas para cada uno de los tipos de amenazas a detectar por los sensores desarrollados por SEADM dentro del proyecto COSMIC.

2.2.1. Tecnología GC-DMA-F-DMA

La tecnología GC-DMA-F-DMA, utilizada en la detección primaria de explosivos, combina la separación de volátiles a través de una columna multicapilar, con el análisis diferencial de movilidad en tándem.

La muestra se recoge a través de un muestreador que fuerza a pasar 600 L de aire del contenedor a través de un filtro con un adsorbente químico donde parte de los vapores son capturados. Posteriormente el filtro se traslada al analizador y se introduce en el desorber térmico, donde los vapores previamente retenidos son liberados en una corriente de nitrógeno. Tras ello los vapores son retenidos en una trampa fría. A continuación, la trampa fría se desorbe a gran velocidad y los vapores se inyectan en la columna capilar. En función de la distinta interacción con la fase estacionaria, cada vapor tiene un tiempo de retención en la columna distinto, produciéndose, por tanto, una separación en el tiempo de los vapores analizados. A la salida de la columna, los vapores son ionizados en una fuente de electrospray secundario (D-LFSESI [4]) e introducidos en el primer DMA [5] (DMA1) que sólo deja pasar la banda estrecha de movilidad de interés. Los iones seleccionados entran en el fragmentador térmico, donde son sometidos a elevadas temperaturas a presión atmosférica y se dividen en varios fragmentos. Los fragmentos entran en el segundo DMA (DMA2), que solo permite pasar la banda estrecha de movilidad del fragmento de interés. Los iones seleccionados por el DMA2 se envían finalmente a un electrómetro [6] de muy bajo ruido desarrollado por SEADM para su cuantificación.

2.2.2. Tecnología DMA-MS/MS

Tanto para la detección de los simulantes de CWA (2-CEES y DEM), como para la de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) del metabolismo bacteriano, se utilizó un DMA plano modelo P5 [7] (Figura 1) acoplado a un espectrómetro de masas de triple cuadrupolo (AB Sciex API 5000 [8]).

El DMA permite realizar un primer filtrado de iones a presión atmosférica en régimen lineal de movilidad. Este analizador tiene la particularidad de combinar un flujo laminar de gas de arrastre con un campo eléctrico perpendicular entre dos electrodos paralelos, de manera que los iones que penetran a través de la ranura del electrodo superior se abren en forma de abanico a medida que viajan hacia el electrodo inferior, originando que sólo un estrecho rango de movilidades sea muestreado a través de una segunda ranura ubicada en el electrodo inferior. Por su parte, el espectrómetro de masas aporta una segunda discriminación de los iones en función de su relación masa/carga (m/z) tanto del ión molecular (modo Q1), como de los fragmentos derivados de éste (MS/MS), siendo la primera configuración el modo utilizado para el análisis de VOCs, donde se obtiene una huella espectral completa de la muestra, mientras que la configuración MS/MS permitió definir un método analítico con una elevada selectividad y especificidad para la caracterización de los dos simulantes de CWA seleccionados.

En el caso de los análisis de VOC, se ha diseñado un nuevo sistema de emisión de vapores, para extraer los vapores de una determinada cepa de bacterias con el fin de analizar sus componentes volátiles en el DMA-MS (Figura 2a). El sistema de emisión de vapores (Figura 2b) consta de tres partes: una zona inferior de generación de vapores, una zona superior de acumulación de estos vapores, y una zona intermedia entre ambas. En la parte inferior será en la cual se introduzca la placa Petri con las bacterias. Esta zona deberá estar a 37 °C, temperatura a la cual las bacterias emitirán los vapores que queremos analizar. Dichos vapores ascenderán a la zona superior, que tendrá un volumen de 0.5 litros y se encontrará a una temperatura de hasta 200 °C, para evitar que los vapores se adhieran a las paredes. Entre estas dos partes es necesario mantener una gran diferencia de temperatura, y para ello se ubicará una zona intermedia entre ambas consistente en un aislante térmico para evitar que la zona inferior se caliente a una temperatura más alta de lo debido y pueda dañar el cultivo de bacterias. Para ello se utilizará un aislante PEEK.

2.2.3. Detección de virus mediante técnicas de movilidad iónica ES-CR-DMA (inspección manual de virus)

El proceso que se utilizará para la detección de virus mediante técnicas de movilidad iónica es el siguiente. En una primera etapa se electrosprayan (ES) [9] las partículas virales disueltas, en una segunda etapa se reduce la carga de los iones (CR) y por último se separan las partículas por tamaños mediante el uso de un analizador diferencial de movilidad (DMA) específicamente diseñado para este campo, el cual permite cubrir un rango de tamaños entre los 30 y 200 nm. Esta técnica ofrece un análisis de tamaños bastante flexible para pequeñas partículas en una disolución.

En la primera etapa (ES) se confiere carga a las partículas virales. Al tratarse de partículas de gran tamaño (entre los 30nm. en el caso del virus de la Hepatitis B (HBV), hasta los 110nm. en el caso del coronavirus de la Gastroenteritis Trasmisible (TGEV)) acaban obteniendo múltiples cargas, lo que daría una medida errónea del tamaño si se las considerara de carga unitaria, y no se puede saber el número de cargas que tienen. Esto resalta la necesidad de la segunda etapa (CR) en la que se reduce la carga de las partículas hasta obtener partículas de carga unitaria, de modo que sean perfectamente clasificables en tamaño por la última etapa (DMA).

El objetivo del desarrollo de este instrumento es asegurar la detección de partículas virales, que estuvieran en ese rango de tamaños, en muestras reales.

3. Listas, figuras y tablas

Tabla 1. Caracterización de los métodos de detección para simulantes de agentes de guerra química.

CWA activo	Simulante del CWA	m/z (M+1)	MS/MS	Pérdidas en MS/MS
Gas mostaza	2-CEES	125	75	$^{\bullet}CH_2Cl$
Somán	DEM	161	133, 115	C_2H_4,(C_2H_4,H_2O)

Tabla 2. Caracterización de los métodos de detección para VOCs del metabolismo bacteriano.

VOCs	Da	m/z (M+1)	MS/MS	Pérdidas en MS/MS
2-Heptenal	112.17	113	95	H_2O
2-Etil-1-hexanol	130.23	131	113, 85	H_2O, (C_2H_4, H_2O)
3-Metil-1-butanol	88.15	89	57	CH_2, H_2O

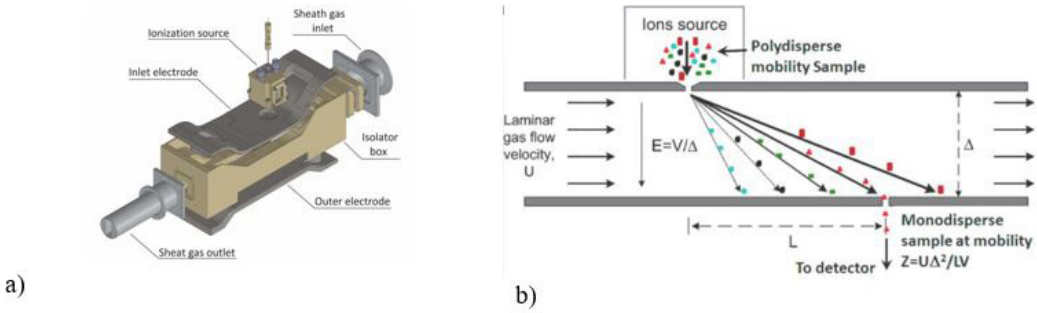


Figura 1. Esquema de un DMA (a) y principio de funcionamiento (b).

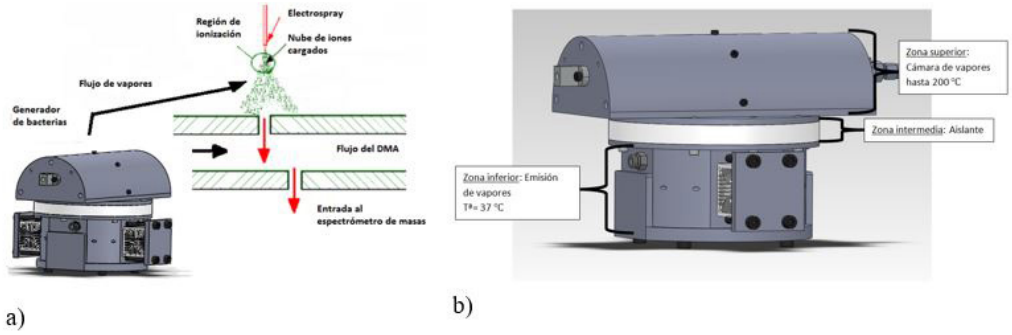


Figura 2. Esquema del sistema de emisión de vapores conectado a un DMA-MS (a) y Partes del sistema de emisión de vapores (b).

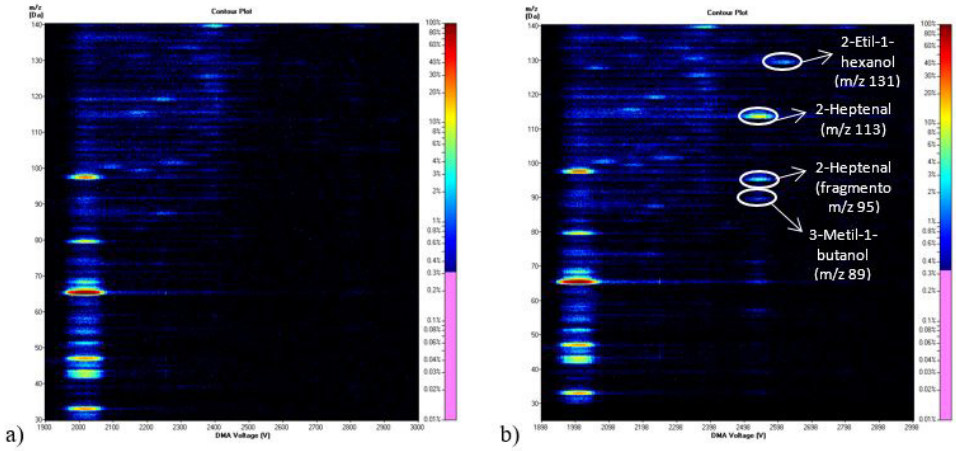


Figura 3. Mapas topográficos de un blanco (a) y una mezcla de VOCs (b) característicos del metabolismo bacteriano.

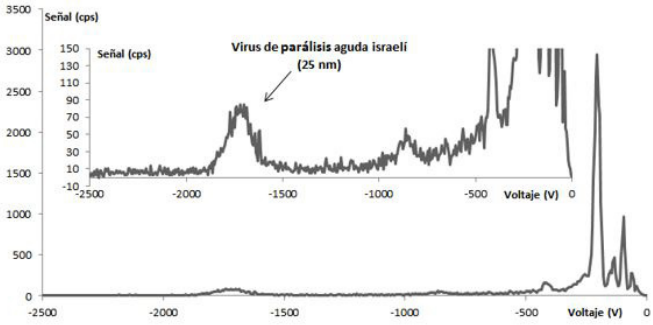


Figura 4. Espectro de muestra con virus de parálisis aguda israelí de abeja.

4. Resultados y discusión

4.1. Detección de explosivos con tecnología GC-DMA-F-DMA

En el marco del proyecto EffeX fase II (2018-2019), financiado por el programa FASS del reino Unido, con el objetivo de desarrollar la técnica DMA-F-DMA para la detección de explosivos, se han realizado pruebas para evaluar el fondo del instrumento al analizar muestras de 500 litros de aire. Los resultados han sido los siguientes:2.5 pg de TNT (5 ppq), 6.3 pg de PETN (9 ppq), 9.4 pg de NG (19 ppq), 23 pg de EGDN (67 ppq) y 33 pg de RDX (67 ppq).

Además se han realizado pruebas con muestras explosivos comerciales (varios gramos) ocultos en palés de carga, para evaluar la capacidad de detección del analizador GC-DMA-F-DMA en colaboración de INTA. Los palés estaban formados por 27 cajas de 40x40 cm, situándose el explosivo (50 g) en la caja central. El muestreo se realizaba introduciendo el tubo de aspiración por la parte superior del palé, a través de una pequeña apertura sobre el film con el que el palé estaba recubierto. La detección fue directa para los explosivos EGDN, NG y TNT, e indirecta para la PETN, que fue detectada a través de trazas contaminantes de otros explosivos. El RDX no se detectó, ni directamente ni a través de trazas de otros explosivos (las muestras de RDX fueron compradas específicamente para estas pruebas, siendo almacenadas lejos del resto de explosivos).

4.2. Detección de simulantes de agentes químicos

Para la caracterización del método analítico que permitió la detección de los simulantes de CWA (2-CEES y DEM), se realizó un primer análisis que consistió en combinar un barrido amplio del DMA (entre 1.700 y 3.200 V) con el modo *full scan* (Q1) del MS, para valorar la presencia del analito de interés tanto en polaridad positiva como negativa. Los resultados obtenidos indican que las moléculas estudiadas se ionizan más eficientemente bajo el modo de polaridad positivo, hecho que coincide con estudios anteriores [2,3]. Posteriormente se realizó la fragmentación del ion correspondiente a cada simulante y se estudiaron, tanto el patrón obtenido, como la estructura química de las moléculas que se pierden en la fragmentación. Finalmente, con esta información se procedió a completar la caracterización del método MRM (MS/MS) para cada compuesto (Tabla 1).

4.3. Análisis de VOCs provenientes del metabolismo bacteriano

El sistema de emisión de vapores, junto con la tecnología DMA-MS/MS (Figura 2a), también ha permitido la caracterización de VOCs asociados al catabolismo bacteriano. De manera preliminar, en este trabajo, se han realizado dos tipos de estudio, un estudio dirigido donde se ha detectado la presencia de diversos biomarcadores que están asociados con la presencia de las especies *Escherichiacoli*, *Bacillussubtilis* y *Staphylo-*

coccusaureus [10], como son el 2-heptenal, 2-etil-1-hexanol y 3-metil-1-butanol. Para cada uno de los analitos mencionados, se definió un método MS/MS como se indica en la Tabla 2. Por otro lado, se ha realizado un estudio no dirigido donde se compara el mapa topográfico (que contiene toda la huella espectral) obtenida para un blanco y para una mezcla de VOCs característicos del metabolismo bacteriano (Figura 3). El barrido de voltaje en el DMA se realizó entre 1.900 y 3.000 V y el rango de m/z monitorizadas estuvo entre 30-140 Da, considerando la masa molecular de los compuestos de interés. De esta manera, el método propuesto podrá ser utilizado para el análisis de toda la huella espectral correspondiente a cultivos de las bacterias mencionadas anteriormente. Los datos obtenidos bajo este tipo de configuración serán tratados quimiométricamente, empleando análisis multivariante, específicamente análisis de componentes principales (PCA) y análisis discriminante ortogonal parcial de mínimos cuadrados (OPLS-DA), lo que permitirá determinar la probabilidad de que alguno de los microorganismos estudiados se encuentre en un contenedor en concentraciones que puedan representar una amenaza biológica.

4.4. Validación del sistema ES-CR-DMA para la detección de virus

El sistema ES-CR-DMA fue montado y probado en las instalaciones de la Universidad de Yale (New Haven, Connecticut). Para el análisis se utilizó una muestra que contenía el virus de parálisis aguda israelí de abeja, de tamaño 25 nm, proporcionando un espectro claro de detección de esta partícula que se puede observar en la Figura 4. El resto de señal, presente a bajos voltajes, se asocia a estados de carga doble, triple, etc. y a partículas de menor tamaño presentes en la muestra, ya que esta no es una muestra pura del virus sino que se ha obtenido a partir de abejas reales.

También se puede observar cómo, en la zona de detección de partículas virales, no existe fondo o contaminación de otras partículas, lo que de momento parece anunciar una baja probabilidad de falsos positivos en la detección.

5. Conclusiones

La tecnología GC-DMA-F-DMA ha demostrado niveles de pocos picogramos en análisis atmosféricos. Además, ha demostrado la capacidad de detección de vapores de explosivo ocultos en palés de carga, detectando de manera satisfactoria cuatro de los 5 explosivos estudiados en condiciones reales.

En lo relativo al análisis de explosivos, agentes químicos y VOCs bacterianos, la tecnología DMA-MS/MS representa una novedosa plataforma analítica (en especial en el caso de agentes químicos y bacterianos), que permite en pocos segundos la detección de compuestos simulantes de agentes de guerra química, así como también el estudio

de biomarcadores genéricos o específicos que pudieran indicar la presencia de bacterias en contenedores.

En cuanto a la detección de virus, la aproximación ES-CR-DMA proporciona una solución barata y rápida que arroja una primera identificación de la presencia o ausencia de virus en muestras biológicas, permitiendo abaratar los procesos de control.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad de Yale por el asesoramiento científico y tecnológico de esta investigación, al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) por su colaboración en los ensayos realizados con bacterias y virus y al Programa Horizonte 2020 por la financiación del Proyecto COSMIC.

Referencias

1. Centre for Strategy & Evaluation Services. CBRN Case Study [Internet]. [cited 2019 Jul 31]. Available from: https://ec.europa.eu/home-affairs/sites/homeaffairs/files/e-library/documents/policies/security/pdf/cbrn_case_study_cses_en.pdf
2. Smith J, Noll R, Cooks G. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* **2011**;25:1437-1444.
3. Cordell R, Willis K, Wyche K, Blake R, Ellis A, Monks P. *Anal. Chem.* **2007**;79(21):8359-8366.
4. SEADM. LFSESI [Internet]. [cited 2019 Jul 31]. Available from: https://www.seadm.com/products/vapour-analysisdetection/low-flow-secondary-electrospray-ionizer/
5. SEADM. Differential Mobility Analyzer [Internet]. [cited 2019 Jul 31]. Available from: https://www.seadm.com/products/nano-particle-and-molecule-classifiers/ultra-high-resolution-differential-mobility-analyzer/
6. SEADM. Electrometer Lynx E12 [Internet]. [cited 2019 Jul 31]. Available from: https://www.seadm.com/products/technological-modules/electrometer/
7. SEADM. Planar DMA [Internet]. [cited 2019 Jul 31]. Available from: https://www.seadm.com/products/technological-modules/separation/planar-dma-cell/
8. AB SCIEX. API 5000 LC/MS/MS System [Internet]. [cited 2019 Jul 31]. Available from: https://sciex.com/Documents/Downloads/Literature/5000-site-planning-guide-en.pdf
9. Fernandez de la Mora J, Barrios-Collado C. *Aerosol Sci Technol*. **2017**;51(6):778-86.
10. Ratiu I, Bocos-Bintintan V, Patrut A, Moll H, Turner M, Paul Thomas C. *Anal. Chim. Acta* **2017;**982:209-217.

Propulsión Cohete Basada en la Reacción Sodio-Agua. Un nuevo Concepto Propulsivo

Guerrero Padrón Juan[1], Sánchez García Jesús[2]

[1] Ingeniero de Armamento, Departamento de Optoelectrónica y Misilística INTA Campus La Marañosa, 28330 San Martín de la Vega (MADRID), jguerrero@isdefe.es.

[2] Ingeniero Aeronáutico, Tcol. Cuerpo de Ingenieros Aeronáuticos, Jefe del Departamento de Optoelectrónica y Misilística INTA Campus La Marañosa, 28330 San Martín de la Vega (MADRID), sanchezgje@inta.es.

Autor principal y responsable del trabajo: jguerrero@isdefe.es (JPG).

Resumen: Los propulsantes sólidos para cohete están constituidos por formulaciones de varios elementos químicos que incluyen elementos comburentes y combustibles distribuidos homogéneamente en la masa que constituye el propulsante. Esta coexistencia propicia microreacciones entre ambos elementos que es causa del envejecimiento del propulsante, manifestándose en la aparición de fisuras y grietas en la propia masa. A su vez, estos defectos pueden ser causa de explosiones del propulsor en el momento del lanzamiento, implicando grandes riesgos al personal y los equipos adyacentes.

Se presenta el desarrollo de un nuevo concepto de propulsante constituido por sodio y agua, llevado a cabo en las instalaciones de la SGST – INTA, que no tiene estos problemas de envejecimiento, además de otras notables ventajas en el ámbito operativo.

Palabras clave: propulsantes sólidos, cohete, sodio, agua.

1. Fundamentos Técnicos

Los metales alcalinos (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) reaccionan con el agua generando cantidades muy elevadas de calor, en tiempos muy pequeños (elevada potencia). Estas reacciones son del tipo hipergólico, pues no requieren energías de activación previa, como es el caso de la combustión con el oxígeno ambiental, en el que es necesario un iniciador que propicie las condiciones termodinámicas apropiadas para que se pueda dar esta reacción.

La elevada reactividad que presentan los metales alcalinos se debe a que en su última capa atómica tienen un solo electrón. En consecuencia, tienen una energía de ionización muy baja.

El sodio (Na) y el potasio (K) son muy abundantes en la corteza terrestre; concretamente ocupan respectivamente el 6º y 7º puesto entre los elementos químicos existen-

tes. No obstante, no se encuentran en estado puro metálico, sino combinados por su alta capacidad de reacción con otros elementos o compuestos.

Dada la abundancia del sodio, especialmente en su compuesto más frecuente: la sal común (ClNa), así como la del agua y el carácter extraordinariamente reactivo de ambos al juntarse, se ha intuido la posibilidad de realizar con estos reactivos un propulsor para motores cohete, si se generase la entalpía suficiente para conseguir propulsión con impulsos específicos similares a los motores cohete de propulsante sólido (*solid propellant rocket* – SPR).

La reacción del sodio con el agua (*sodium water reaction* – SWR) genera hidróxido sódico e hidrógeno: $Na + H_2O \rightarrow Na(OH) + ½\ H_2 - \Delta H$

Siendo el calor desprendido, con exceso de agua, $\Delta H = 8.07$ MJ/kg de Na pues la sosa cáustica Na(OH) a su vez desprende calor al disolverse en el agua sobrante. También el H_2 resultante reacciona con el O_2 circundante de forma muy exotérmica, formando agua.

Las pólvoras más energéticas tienen un calor de combustión de hasta 6.00 MJ/kg. En consecuencia, la reacción SWR está muy bien posicionada para ser un posible candidato como propulsante cohete.

En los propulsantes sólidos convencionales (SPR) el calor de combustión generado se invierte en elevar la entalpía de los gases productos de la reacción, de forma que, al eyectarse a través de la tobera, adquieren una elevación de la velocidad de escape a costa de una pérdida de la entalpía, produciendo así la propulsión del cohete en virtud de la ley de conservación de la cantidad de movimiento.

En el caso SWR, producida con exceso de agua, el calor generado se invierte en el aumento de la entalpía del agua que lleva disueltos los productos de reacción Na(OH) y H2. Como antes se apuntó, la disolución del Na(OH) en el agua genera calor y también la mezcla del H_2 con el oxígeno del aire que se encuentra disuelto en el agua, por tanto, la contribución de los productos de la reacción consigue aumentar aún más la entalpía del conjunto.

El agua, con una temperatura elevada en el interior de la cámara, sale a través de la tobera en forma de vapor debido al salto de presiones desde el interior al ambiente. Es decir, tiene lugar un cambio de fase en el agua, que también transporta Na(OH) y H_2. Este efecto es el causante de la propulsión, también debido a la ley de conservación de la cantidad de movimiento.

Los propulsantes sólidos queman por capas paralelas en las superficies expuestas a la combustión. Para conseguir el control de la presión interior de cámara con un bloque de propulsante, también denominado grano, pueden inhibirse determinadas caras mediante productos de aislamiento térmico. Las caras no inhibidas quedan las expuestas a la progresión de la combustión, cuya velocidad de avance depende de una po-

tencia de la presión interior de cámara. El material del grano no quemado permanece sólido y el que recibe la llama sublima generando los gases producto de la combustión.

En el caso SWR la situación es distinta. El sodio en unión con el agua reacciona en la superficie de contacto y la parte de material sodio fuera de este contacto se licúa como consecuencia de la temperatura que va alcanzando su propia masa (punto de fusión 98ºC). Al licuarse el sodio se forman esferas cuyo tamaño depende de su tensión superficial. Estas esferas siguen reaccionando con el agua, que se encuentra en fase vapor en esta zona interface. Por este motivo, no es controlable esta reacción mediante geometrías, como en los propulsantes SPR, donde las partes que no han recibido el frente de llama permanecen en fase sólida.

2. Antecedentes

Actualmente, los propulsantes cohete sólidos son fundamentalmente de dos tipos: doble base (DB) y composite. El primer grupo está constituido por composiciones variables de NC (Nitrocelulosa) y NG (Nitroglicerina), además de otros aditivos en proporciones muy inferiores. Los segundos suelen estar formados por una matriz plástica, normalmente HTPB (Terminal Hidroxilo Polibutadieno), AP (Perclorato Amónico) y Al o Mg (Aluminio o Magnesio).

En los dos casos tiene lugar, con el transcurso del tiempo, un fenómeno de degradación conocido como envejecimiento, que se manifiesta en la aparición de grietas en la masa del propulsante, además de otros fenómenos como pérdida de elasticidad y aparición de zonas frágiles, exudación de NG (en DB), etc.

Este fenómeno hace peligroso el almacenamiento de municiones con estas composiciones de pólvora, de manera que es necesario testear muestras de los lotes desde los cinco primeros años de almacenamiento en los polvorines. La omisión de estas pruebas podría implicar la aparición de detonaciones en el momento del disparo, con un riesgo para el personal y el material más que evidente.

Por otra parte, el envejecimiento hace que las municiones tengan una fecha límite de operación, es decir, una caducidad.

Para evaluar el proceso del envejecimiento en estas municiones y conocer su vida operativa, se hacen las pruebas denominadas de vigilancia para evaluación del estado operativo en centros especializados, que cuentan con la infraestructura necesaria y el personal técnico adecuado. En España se realizan en las instalaciones de la Subdirección General de Sistemas Terrestres del INTA, cuya dirección se lleva a cabo en el Departamento de Optrónica y Misilística, complementado por el Departamento de Sistemas de Defensa NBQ y Materiales.

Las pruebas son de dos tipos: no destructivas y destructivas. Las primeras son inspecciones, comprobaciones y radiografías, en las que no se daña la munición. Las segundas implican la extracción de muestras del propulsante y los encendidos para la realización de análisis de composición, físico químicos, de sensibilidad y de caracterización termo - mecánica, así como las pruebas de funcionamiento completo en banco de ensayos.

Este último tipo de pruebas conlleva la destrucción de las muestras ensayadas y, en consecuencia, una disminución de las existencias de parque y un gasto económico importante, sobretodo si se trata de misiles.

Una tecnología de propulsión basada en SWR evitaría los inconvenientes logísticos apuntados, debido a que tanto el sodio como el agua en sí mismos no tienen procesos de envejecimiento ni degradación. El sodio convenientemente aislado del entorno, de forma que no esté en contacto con la humedad de ambiente, ni expuesto a llama, no sufre alteraciones químicas.

Por consiguiente, un propulsante SWR no llegará a ser causa de caducidad de la munición que lo usase, ni tampoco requerirá la realización de pruebas de vigilancia. En definitiva, la ventaja logística sobre los propulsantes convencionales SPR (DB y composites) en este aspecto es evidente.

Las ventajas potenciales de la propulsión SWR no solo serían las logísticas. Las tecnologías necesarias para producir propulsantes SPR no están a la mano de cualquier país. Hay pocos productores en el mundo y dentro de estos países, son muy pocas las fábricas existentes. La consecuencia es que el coste por kg de propulsante producido puede estar en una horquilla de entre 100 y 200€, para cantidades importantes de fabricación. La calidad requerida es muy exigente, especialmente en la homogeneidad de los componentes constitutivos de los propulsantes.

La tecnología productiva que requiere un propulsante SWR se reduce a la producción de sodio. Esta tecnología está absolutamente conseguida desde hace muchas décadas mediante el proceso electrolítico de la pila Donws, en el cual el ClNa fundido se electroliza. No hay procesos de mezclado ni requisitos de homogenización. Los costes pueden bajar en más de 2 órdenes de magnitud.

Convencidos desde un principio en INTA de estas ventajas, se decidió hacer un proyecto de investigación para conseguir una propulsión SWR que obtuviese unas prestaciones similares a los de los propulsantes convencionales SPR.

En la búsqueda bibliográfica realizada al inicio de proyecto, se descubrió que las investigaciones sobre sodio estaban dirigidas a la formación de compuestos de este metal para aplicaciones industriales y a la tecnología de reactores nucleares refrigerados por sodio como elemento caloportador para la elevación entálpica del circuito de agua que

acciona la turbina del generador eléctrico. Es decir, ni siquiera había investigaciones dirigidas a conocer las capacidades de la reacción SWR como vector energético. Por tanto, se iba a abordar una investigación absolutamente innovadora.

3. Desarrollo del proyecto

Como objetivo general del proyecto se estableció conseguir un motor de vuelo con propulsión SWR para un calibre entre 70 y 100 mm, para una trayectoria en caliente de al menos 10 segundos.

Este objetivo resulta ser muy exigente, dado que los propulsantes SPR para calibres similares tienen trayectorias propulsadas inferiores a 2 segundos, por lo que, para conseguir alcances adecuados a los requerimientos operativos, se necesitan empujes muy elevados y vuelos en esta fase con un número *g* considerable.

La propulsión SWR con un tiempo más elevado de propulsión (10 frente a 2 segundos), permitiría, para el mismo impulso (impulso = empuje · tiempo), un empuje menor en 5 veces, con una reducción del número g en la misma proporción, o también, se conseguiría un impulso mayor si no se reduce tanto el empuje. Ello implicaría un mayor alcance de la munición.

Estas posibilidades, de por sí, justifican sobradamente el desarrollo del proyecto, cuyo alcance no está en conseguir un producto industrial, sino en adquirir una nueva tecnología de propulsión hasta ahora desconocida a nivel mundial, o al menos no documentada.

Se establecieron 4 fases para desarrollar el proyecto. En el momento de la redacción del artículo nos encontramos en la fase 3, qué, según las previsiones, finalizará sobre el tercer trimestre del año 2020. La cuarta fase tendrá una duración de 18 meses según nuestras previsiones.

Fase I. El objetivo de esta fase ha sido desarrollar un demostrador tecnológico que probase la viabilidad propulsiva SWR. La dificultad fundamental estuvo en conseguir juntar el sodio y el agua en el momento adecuado para el inicio de la propulsión dentro de la cámara de reacción.

Desde un primer momento se rechazaron procedimientos mecatrónicos que posibilitaran esto mediante componentes electrónicos, para evitar soluciones complejas y costosas en tiempo y en precio. Se consiguió una solución mecánica simple, sin partes móviles, que consigue el mezclado de los dos componentes estando, al inicio de la reacción, las masas reactivas completas dentro de la cámara.

Con esta solución se hicieron numerosas pruebas con distintos dosados de los reactivos. La figura 1 muestra la prueba de un disparo hecho en condiciones estáticas en un

banco que amarra al microcohete que se ensaya, dentro de una cámara acorazada para ensayos de detónica. La cabeza del microcohete se apoya sobre una célula de carga y la tobera queda en la parte superior.

En esta prueba se muestran imágenes hasta un tiempo de 833 ms (0.833 segundos). La reacción duró 1.3 segundos, aproximadamente. Se observa en los fotogramas 4º y 5º una llamarada que es la producida por el H_2 al reaccionar con O_2 presente en el entorno.

En este tipo de ensayos se registraron empujes en torno a 2000 N, para masas de reactivos de 160 gramos de sodio y 250 gramos de agua.

La fase concluyó cumpliendo el objetivo establecido.

Fase II. Finalizada la fase anterior, se planteó la necesidad de cuantificar la presión que se producía dentro de un volumen conocido, en función de las masas de los reactivos; es decir, era necesario caracterizar la reacción. Esta caracterización daría como resultado una expresión que relacionaría el volumen de la cámara y las masas de los reactivos, posibilitando tener un método de diseño para el dimensionado de la propulsión SWR.

El objetivo de la fase fue caracterizar la reacción SWR en condiciones de vaso cerrado.

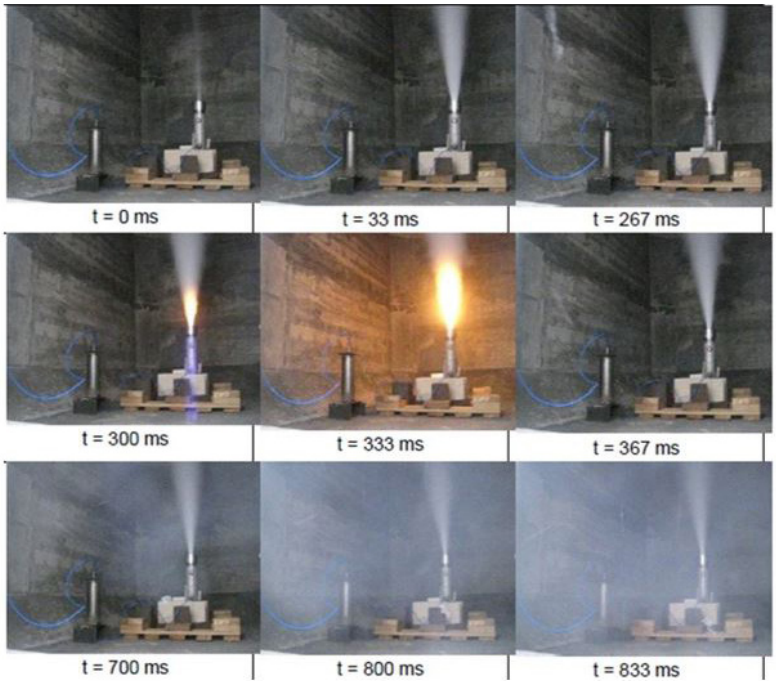


Figura 1. Prueba realizada en banco con un microcohete con propulsión SWR.

Para ello se diseñó y construyó la bomba manométrica indicada en la figura 2 izquierda, donde se realizaron más de 130 ensayos, probando varias combinaciones másicas de reactivos. Procesando los resultados se obtuvo la gráfica de la figura 2 derecha, que refleja la relación entre la presión de relajación en cámara, el volumen y la masa total de reactivos con el porcentaje másico del sodio.

La línea de tendencia de la gráfica dio la expresión buscada para ligar el volumen con las cantidades másicas de los ingredientes y la presión de relajación que producen.

Se alcanzó el objetivo buscado en esta fase.

Fase III. Debido a que el demostrador realizado en la Fase I no alcanzaba tiempos de reacción más allá de 1.5 segundos, se planteó realizar otro tipo de proceso con los reactivos que asegurase un tiempo de reacción superior a 10 segundos.

La causa de un tiempo de reacción tan pequeño en el demostrador era debido a que las cantidades totales de sodio y agua que reaccionaban se encontraban presentes en la cámara desde un principio, consumiendo para ello, muy poco tiempo.

Si se aumentaban las masas se producía un incremento de la presión en cámara, pero el tiempo de reacción no aumentaba apenas, debido a la fragmentación del sodio en bolas de fase líquida de tamaños similares durante el tiempo de reacción.

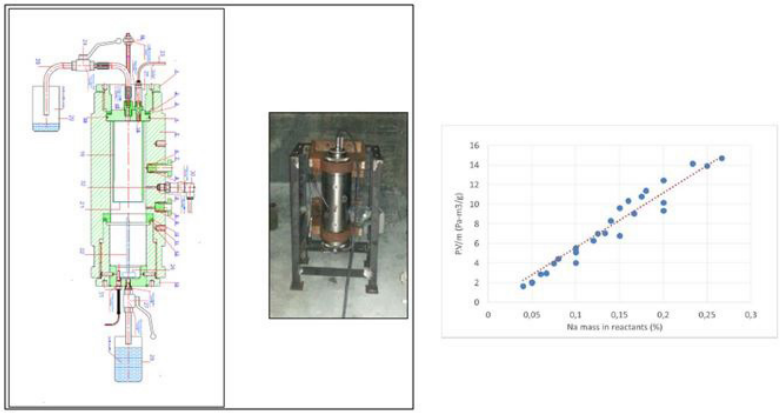


Figura 2. Izquierda, bomba manométrica para caracterizar la reacción SWR. Derecha, gráfica de la caracterización de la reacción SWR.

Se ideó un proceso que evitaría la utilización de válvulas de control y bombas de impulsión. Todo debía transcurrir mediante un sistema pasivo, sin control electrónico. Este proceso ha sido objeto de una solicitud de patente en la que figura INTA, la UPM y otras dos entidades privadas (TECNESIS 3000 y IDACOVERTRUCK, S.L.).

Para materializar el proceso se ha desarrollado una instalación cuyo objetivo es reproducirlo mediante alimentación continuada y en condiciones de laboratorio (estáticas), de forma que se puedan conocer las implicaciones de la reacción y, en consecuencia, caracterizarla. La figura 3 muestra la instalación.

La instalación está formada, básicamente por una cámara de reacción cilíndrica con una tobera en su parte superior, y dos recipientes cilíndricos anejos que contienen los reactivos agua y sodio en fase líquida, respectivamente. Los reactivos se hacen circular con un flujo másico conocido a la cámara donde se realiza la reacción. Hay, además otros elementos auxiliares que sirven para mantener el aporte continuado de los reactivos a la cámara.

La instalación está instrumentada para obtener las curvas de la presión de cámara durante el proceso de la reacción, así como el empuje realizado por la cámara de reacción.

Actualmente se están iniciando las pruebas de verificación del funcionamiento combinado de la instalación. Una vez que se concluyan empezará la campaña de ensayos para la caracterización de proceso.

Fase IV. Esta fase tiene por objetivo integrar el proceso conseguido en la Fase III en un cohete de vuelo de un calibre por determinar que estará en un rango de 70 a 100 mm.

La fase incluirá un periodo de diseño del proceso dentro del cohete, el diseño de la célula aerodinámica, la fabricación, pruebas en banco estático y pruebas de vuelo en un campo de tiro.

Habiendo alcanzado con éxito cada una de las tareas, se dará por concluido el proyecto.

Figura 3. Instalación para generación del proceso SWR mediante aporte de los reactivos en forma continuada.

4. Conclusiones

El proyecto de propulsión SWR, concebido en 2014, está demostrando las capacidades para propulsión cohete mediante unos componentes de los que no se ha tenido noticia sobre su uso en esta tecnología.

Los resultados obtenidos hacen pensar que se igualarán las prestaciones de los propulsantes del tipo DB, o por lo menos se estará muy próximo a ellas.

Si se consigue superar con éxito la Fase III, actualmente en desarrollo, se podrá asegurar conseguir motores cohete con más alcance que sus homólogos SFR, por tener un mayor tiempo de trayectoria caliente, aunque sus velocidades de crucero sean menores.

El alivio logístico y económico que supone este nuevo concepto de propulsión es otra ventaja más sobre las propulsiones SFR, al no ser necesarias las pruebas de vigilancia por no existir envejecimiento de los reactivos.

Finalmente, cabe reseñar que este proyecto puede tener un alcance en el ámbito espacial muy relevante, por existir en Marte grandes cantidades de ClNa y de agua. Esta última disponible a partir de 2 metros de profundidad en determinadas zonas del planeta. Si resultase viable la producción de Na a partir del ClNa en suelo marciano, se harían viables las misiones tripuladas a Marte por la posibilidad de retorno con el propulsante «fabricado» en el planeta, evitándose tener que transportarlo desde la Tierra.

Este es el motivo por el que se ha incluido una nueva línea de investigación asociada al proyecto, cuyo objetivo es realizar un demostrador para producción de sodio, a partir del ClNa en condiciones marcianas. El nombre del proyecto es IGNIS, y se desarrolla en el Departamento de Optoelectrónica y Misilística de SGDGST del INTA.

Rendimiento cognitivo en una prueba de toma de decisiones «disparo-no disparo» y su relación con niveles de cortisol en sangre

Aceña Medina, Javier[1,*], Villacampa Gutiérrez, Raquel[1], Ruiz López, Carlos[1], Palop Asunción, Jorge[2], Maroto Mayoral, Montserrat[2] y Suárez Portal, Lucía[3]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090, Zaragoza, España; jacename@unizar.es: (JAM), raquelvg@unizar.es: (RVG), cruizl@unizar.es: (CRL).

[2] Escuela Militar de Montaña y Operaciones Especiales. C/ San Bernardo, s/n, 22700 Jaca, España. jpalasu@mde.es: (JPA), mmarmay@et.mde.es: (MMM).

[3] USBA «San Jorge» de la Brigada Aragón I, Acuartelamiento General Palafox, Ctra. de Huesca Km 8,8, 50110, Zaragoza, España. luciasportal@gmail.com: (LSP).

* Autor principal y responsable del trabajo: jacename@unizar.es (JAM).

Resumen: El estrés es uno de los factores con mayor influencia en el rendimiento cognitivo cerebral. Un estrés leve o moderado puede ejercer un efecto potenciador mejorando dicho rendimiento, pero cuando el estrés es muy intenso, su efecto es más bien reductor, pudiendo afectar de manera negativa nuestra capacidad de toma de decisiones. La presente investigación pretende mostrar los efectos que tienen elevados niveles de estrés en la capacidad de toma de decisiones de los combatientes. La muestra está compuesta por 32 alumnos del curso 2018/2019 de Operaciones Especiales (Jaca). Se ha utilizado un diseño cuasi-experimental pretest-postest con grupo de control no equivalente, contando con un grupo experimental al que se le exponía a una situación potencialmente estresante y un grupo de control no expuesto. El nivel de estrés experimentado por los participantes se midió mediante la concentración hormonal de cortisol en sangre (nmol/l). Para la evaluación del rendimiento cognitivo se diseñó una prueba de toma de decisiones «disparo-no disparo» que consistía en la proyección de una serie de imágenes en la que los participantes tenían que decidir si disparar o no (de manera simulada), según unos criterios de decisión que variaban cada cierto número de imágenes. Los resultados muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) intergrupos en el rendimiento de dicha prueba. En este sentido, el grupo experimental tardó más tiempo en realizar la prueba de toma de decisiones (tiempo de ejecución) y cometió mayor número de errores (precisión). Los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos por el presente equipo investigador con los alumnos de Operaciones Especiales del curso anterior. Las conclusiones de ambos estudios son importantes de cara al diseño e implemen-

tación de futuros programas de entrenamiento psicológico con el fin de minimizar los efectos negativos del estrés en la capacidad de toma de decisiones de los combatientes.

Palabras clave: Estrés, rendimiento cognitivo, toma de decisiones, cortisol.

1. Introducción

Determinados colectivos y fuerzas de élite, como las unidades de Operaciones Especiales, han de estar preparados para actuar y tomar decisiones bajo el efecto de elevados niveles de estrés. La toma de decisiones es uno de los procesos más complejos a los que se enfrenta el ser humano y se puede definir como un procesamiento de carácter cognitivo cuando éste se encuentra en una situación en la que debe evaluar una o más características para establecer cuál de las alternativas cumple con sus expectativas, metas o intereses, de las cuales se debe derivar un proceso reflexivo o una conducta que se va a seguir [1].

Cuando el organismo experimenta episodios de estrés, las glándulas suprarrenales secretan una serie de glucocorticoides (principalmente el cortisol) los cuales pueden influir notablemente en nuestra capacidad de decidir [2,3,4,5].

La presente investigación pretende constatar si la exposición a elevados niveles de estrés puede causar un empeoramiento en el rendimiento cognitivo en una prueba de toma de decisiones «disparo-no disparo». Se pretende igualmente, comparar los resultados observados con los obtenidos en la investigación realizada el curso 2017/2018 con los alumnos del Curso de Operaciones Especiales (Jaca) y cuyos resultados se comunicaron en el VI Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad (Valladolid).

La investigación que se presenta está incluida en el proyecto «Evaluación de la influencia del estrés en las funciones ejecutivas cerebrales y en la toma de decisiones II», financiado por el Centro Universitario de la Defensa en Zaragoza

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Muestra

Para el estudio se ha contado con la participación voluntaria de los alumnos del Curso de Operaciones Especiales 2018-2019 de la Escuela Militar de Montaña y Operaciones Especiales (EMMOE) de Jaca (Huesca). Número de participantes: 32; edad media 26,4 años. Se contó para el estudio con un grupo experimental GE (n=16) y un grupo de control GC (n=16). La asignación de los sujetos a ambos grupos se ha realizado aleatoriamente, realizando una estratificación previa al objeto de que existan en ambos grupos la misma proporción de oficiales y suboficiales (ya que poseen distintos niveles de estudio).

Se significa que, tras informar sobre los aspectos relevantes del estudio, todos los alumnos firmaron su consentimiento para participar en el mismo, el cual cuenta con la aprobación del Comité Ético de Investigación Clínica (Inspección General de Sanidad de la Defensa, Acta 08/18 de 27/09/2017) que certifica que la investigación respeta y proporciona los derechos, seguridad y bienestar de los participantes, siguiendo las normas deontológicas reconocidas por los principios de la Declaración de Helsinki y las Normas de Buena Práctica Clínica.

2.2. Metodología

Se utilizó un diseño cuasi-experimental con GC no equivalente, dado que la muestra con la que se trabaja no ha sido extraída al azar de una población general hipotética a la que se pretenden generalizar los resultados. Se trata, por tanto, de una muestra incidental, constituida previamente (alumnos que superaron las pruebas de selección para la realización del curso).

2.3. Instrumentos

La medición del nivel de estrés de los participantes se evaluó utilizando como biomarcador la concentración hormonal de cortisol en sangre (mmol/l). La extracción de sangre a los participantes se realizó por parte del servicio médico de la EMMOE (médico y enfermera). Dichas muestras se analizaron en el Hospital General de la Defensa en Zaragoza.

La medición del rendimiento cognitivo se realizó a través de una prueba de Toma de Decisiones diseñada específicamente por los autores de la presente investigación. Se trata de una prueba «disparo-no disparo» en la que se le proyectaba a los sujetos una serie de diapositivas sobre una pantalla con imágenes relacionadas con armamento, material y equipo militar y en la que tenían que decidir si disparar o no disparar en función de unos criterios que iban variando cada serie de cuatro diapositivas. La prueba requiere de los participantes ciertas exigencias cognitivas tales como capacidad de atención sostenida, velocidad de procesamiento perceptivo, memoria de trabajo, flexibilidad mental, y fluidez de la respuesta motora. El rendimiento en la prueba se determina en función del tiempo empleado en su realización (tiempo de ejecución) y la precisión en la misma (aciertos y errores cometidos).

2.4. Procedimiento

En un primer momento de observación, al inicio del curso (septiembre, 2018), y con anterioridad al inicio de las actividades de instrucción de dicho curso, se tomaron muestras de sangre a todos los participantes para medir su nivel de estrés y tener una medición basal de todos ellos.

Transcurridos tres meses (diciembre, 2018) se realizó una segunda observación del nivel de estrés de los participantes, con la salvedad de que el GE se vio expuesto con anterioridad a la extracción de sangre a un estresor previo (generado por los propios instructores del curso y relacionado con las actividades del mismo). El GC no se vio expuesto a dicho estresor. Tras registrar el nivel de estrés experimentado por los participantes, ambos grupos realizaron una prueba de Toma de Decisiones tipo «disparo-no disparo» para valorar el rendimiento cognitivo en dicha prueba.

Para el análisis de datos se utilizó el software estadístico SPSS v. 19.0.

Figura 1. A la izquierda: extracción de sangre a un miembro del GE tras ser expuesto a un estresor previo. A la derecha, realización de la prueba de toma de decisiones.

3. Resultados y Discusión

Para el análisis estadístico de los datos, y tras comprobar el supuesto de normalidad, hemos utilizado la prueba T de student, utilizando para la investigación un nivel de significación de 0.05 ($p<0.05$).

En el primer momento de observación (medición basal) los resultados respecto al nivel de estrés, no mostraron diferencias estadísticas significativas entre ambos grupos ($p=0.74$). Sin embargo, en el segundo momento de observación (previo a la realización de la prueba de TD), sí se observaron diferencias significativas intergrupos ($p=0.022$) en el sentido de que el GE (expuesto a un estresor previo) mostró tasas significativamente mayores de cortisol en sangre que el GC (no expuesto a un estresor previo). La tabla 1 refleja las concentraciones de cortisol en sangre (nmol/l) de ambos grupos en los dos momentos de observación. La tabla 2 muestra que no existen diferencias sigificativas de estrés GC-GE en una primera medición basal. Sin embargo, sí se constatan diferencias

significativas GC-GE en el momento 2 de la investigación (en la que el GE se vio expuesto a un estresor previo).

Tabla 1. Niveles de cortisol en sangre (nmol/l)

	Grupo	N	Media	Desviación típica	Error típico de la media
Cortisol momento 1	Grupo control Grupo experimental	16 16	191,51 182,33	63,63 90.77	15,90 22,69
Cortisol momento 2	Grupo control Grupo experimental	16 16	292,10 390,95	82,68 141,18	20,67 35,29

Tabla 2. Prueba T de muestras independientes (nivel de cortisol en sangre)

	T student	gl	Sig (bilateral)
Cortisol momento 1	0.331	30	0.743
Cortisol momento 2	-2.417	30	0.022

La figura 2 muestra gráficamente los niveles de cortisol de ambos grupos, en los dos momentos de observación.

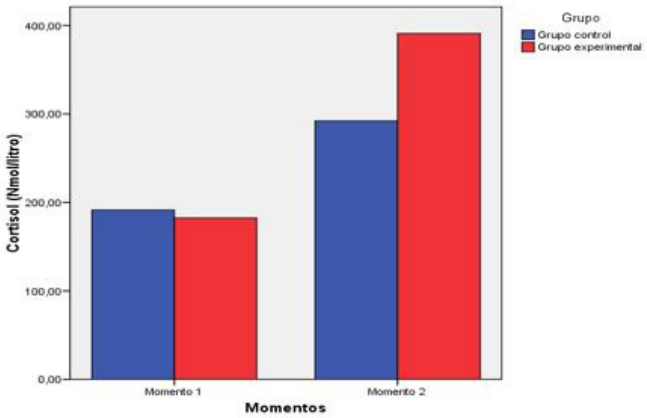


Figura 2. Niveles de cortisol (nmol/l) GC-GE en momentos de observación.

En el momento 2 de nuestra investigación, ambos grupos realizaron una prueba de Toma de Decisiones «disparo-no disparo», estando únicamente el GE expuesto bajo la influencia de un estresor. Los resultados mostraron que el GE empleó más tiempo en la ejecución de la prueba respecto al GC (tabla 3), siendo esta diferencia estadísticamente significativa (p=0.000033) (tabla 4).

	Grupo	N	Media	Desviación típica	Error típico de la media
Tiempo ejecución (momento 2)	Grupo control Grupo experimental	16 16	22.96 32.15	4.36 6.14	1.09 1.53

Tabla 3. Prueba T de muestras independientes (tiempo de ejecución en prueba TD)

	T student	gl	Sig (bilateral)
Tiempo ejecución (momento 2)	-4.876	30	0.000033

Respecto a la precisión, los resultados mostraron que el GE fue más impreciso que el GC (tabla 4), siendo esta diferencia estadísticamente significativa (p=0.00026) (tabla 5).

Tabla 4. Precisión prueba TD (%)

	Grupo	N	Media	Desviación típica	Error típico de la media
Precisión (momento 2)	Grupo control Grupo experimental	16 16	66.92 42.21	13.59 19.62	3.39 4.90

Tabla 5. Prueba T de muestras independientes (tiempo de ejecución, prueba TD)

	T student	gl	Sig (bilateral)
Precisión (momento 2)	4.139	30	0.00026

Las figuras 2 y 3 muestran gráficamente los resultados obtenidos por ambos grupos en la prueba de TD, en lo que respecta al tiempo de ejecución y a la precisión.

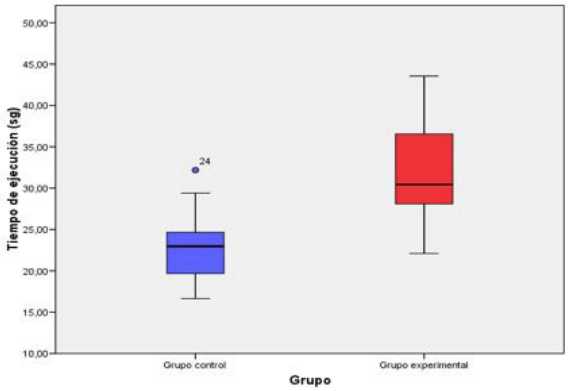


Figura 3. Resultados prueba TD (tiempo de ejecución).

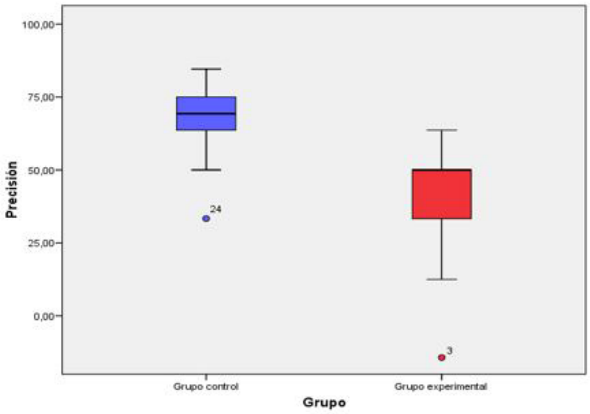


Figura 4. Resultados prueba TD (precisión).

4. Conclusiones

Los resultados sugieren que el nivel de estrés mostrado por el GE (expuesto a un estresor previo) puede ser el causante del peor rendimiento en la prueba de TD respecto al GC, empleando más tiempo en su realización y cometiendo mayor número de errores (precisión). Por el contrario, el GC (no expuesto a un estresor previo) mostró en el momento de realizar la prueba de TD un menor nivel de estrés respecto al GE, pudiendo ser esta la causa de que empleara menor tiempo en la realización de la prueba y cometiera menos errores que el GE.

Estos resultados son muy similares a los obtenidos en la investigación realizada el curso 2017/2018 y cuyos resultados se comunicaron en el VI Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad (Valladolid). En dicha investigación se observó que, aunque ambos grupos fueron igualmente precisos, el GE necesitó más tiempo para la realización de la citada prueba. Por dicha razón, y siendo conscientes de que los resultados pueden variar de una investigación a otra en función de la intensidad del estrés experimentado por los participantes y la carga cognitiva que se les exija, se aumentó el nivel de dificultad de la prueba de TD. Este hecho podría explicar el hecho de que en la presente investigación las diferencias han sido más claras en el sentido de que el rendimiento del GE (expuesto a un estresor previo) ha sido significativamente menor que el observado en el GC.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la EMMOE, por brindarnos la oportunidad de llevar a cabo la investigación. Igualmente, agradecer a los alumnos del Curso de Operaciones Especiales por su colaboración y buena predisposición. Destacar la imprescindible cola-

boración del Hospital General de la Defensa en Zaragoza, quien nos facilitó las analíticas de sangre.

Referencias

1. Wang, X. Decision making in recurrent neuronal circuits. *Neuron.* ***2008****;* 60, 215-234.
2. Roelofs, K., Bakvis, P., Hermans, E.J., van Pelt, J., y van Honk, J. The effects of social stress and cortisol responses on the preconscious selective attention to social threat. *Biological Psychology.* **2007**; 75*,* 1-7.
3. Starcke, K., Wolf, O. T., Markowitsch, H. J., y Brand, M. Anticipatory stress influences decision making under explicit risk conditions. *Behavioral Neuroscience.* **2008**; 122*,* 1352-1360.
4. Van den Bos, R., Harteveld, M. y Stoop, H. (2009). Stress and decision-making in humans: Performance is related to cortisol reactivity, albeit differently in men and women. *Psychoneuroendocrinology.* **2009**: 34, 1449-1458.
5. Van Honk, J., Shutter, D.J., Hermans, E.J. y Putman, P. (2003). Low cortisol levels and the balance between punishment sensitivity and reward dependency. *Neuroendocrinology.* **2003**; 14*,* 1993-1996.

Optimización de trayectorias de interceptación de drones maliciosos en entornos restringidos

García, Manuel[1,*], Viguria, Antidio[1] , Heredia, Guillermo[2] y Ollero, Anibal[2]

[1] CATEC. c/ Wilbur y Orville Wright, 19, 41300 La Rinconada, Sevilla, España. mgarcia@catec.aero (MG), aviguria@catec.aero (AV).

[2] Universidad de Sevilla. Grupo de Robótica, Visión y Control. Escuela Superior de Ingenieros. Camino de los Descubrimientos, s/n 41092 Sevilla (España). guiller@us.es (GH) aollero@us.es (AO).

* Autor Principal y responsable del trabajo: mgarcia@catec.aero (MG).

Resumen: este trabajo está motivado por la necesidad de mejorar los sistemas existentes de interceptación de drones mediante el uso de otros drones. La neutralización física de drones maliciosos está alcanzando interés recientemente en el campo de las tecnologías antidron. El tiempo de exposición de estas amenazas es un factor clave en entornos de altas densidades de población, tales como ciudades, donde la presencia de obstáculos puede complicar la tarea de persecución y captura del drone intruso. Este trabajo se centra en el desarrollo y la optimización de una estrategia de seguimiento e interceptación de drones maliciosos en un escenario con obstáculos, con el objetivo de reducir los posibles daños colaterales de una caída del drone interceptado en tierra o sobre personas.

Palabras clave: drone, neutralización, drone captor, generación de trayectorias.

1. Introducción

Actualmente, existe una creciente preocupación por el uso malicioso de los drones, y la neutralización física por parte de otros drones se considera una solución de interés para las empresas y agencias de seguridad. La proliferación de drones baratos y simples de usar ha llevado a un aumento en el número de incidentes en los que se ha comprometido la seguridad y protección de personas y también a otros usuarios del espacio aéreo. Recientemente se han desarrollado y probado muchas técnicas de contramedidas de drones. El problema se puede dividir en dos etapas principales: la primera se refiere a la detección, localización, seguimiento y clasificación del drone intruso; y la segunda se refiere a la neutralización del drone intruso para que no pueda llevar a cabo su amenaza. La NASA ha publicado en [1] un informe técnico que evalúa diferentes alternativas

para la detección de drones intrusos: radar, sensores acústicos, visión por computadora y otros. Con respecto a la neutralización de los drones, también hay muchos desarrollos que han surgido en los últimos años. La técnica de interferencia de comunicaciones es la que presenta mayor robustez, por ejemplo el Scrambler 1000 de MC2 [2], pero generalmente no puede interrumpir el vuelo. El trabajo que se muestra en este documento se centra en la neutralización física de los drones peligrosos, para que sean interceptados y capturados para evitar que continúen con la amenaza y para minimizar el daño colateral. Ya hay desarrollos de algunas compañías en este sentido [3], [4].

La rapidez en esta operación es un factor importante debido a la criticidad y peligrosidad de la amenaza que puede representar un drone no autorizado. Las amenazas con drones serán más preocupantes en entornos urbanos, donde hay una alta densidad de población. Dado el número de edificios, torres y otros obstáculos que generalmente están presentes en estos entornos, se requiere un algoritmo reactivo para evitar estos obstáculos. De esta manera, la optimización de la trayectoria de aproximación se ve limitada por las desviaciones locales producidas por el algoritmo de evitación de obstáculos propuesto para mantener al drone captor libre de colisiones con obstáculos. La Figura 1 muestra la representación del caso de uso del problema.

Figura 1. Representación del caso de uso para la neutralización física en un entorno restringido.

2. Capacidad de interceptación con obstáculos

El objetivo es la generación de trayectorias optimizadas para que el drone captor pueda llegar al drone sospechoso de una manera rápida y eficiente. Se supone que los datos de ubicación del drone sospechoso a rastrear son una entrada de un sistema externo. Ya hay sistemas que pueden detectar y localizar pasivamente a drones no autori-

zados. La mayoría de estos sistemas se basan en tecnología radar [6], pero también se utilizan cámaras infrarrojas y de visión en combinación con radares para mejorar la precisión de la localización, como el Boreades de CS [7]. No obstante, los movimientos futuros del drone intruso no se consideran conocidos, por lo que se requiere cierta anticipación.

El problema puede formularse como un problema de intercepción entre dos cuerpos, que es común en el campo de la física y la ingeniería. El guiado de misiles es un campo ampliamente estudiado desde el cual comienza este estudio. Las leyes de guiado como la Navegación Proporcional (PN) y la Persecución Pura (PP) están bastante extendidas para los problemas de intercepción y pueden adaptarse a este escenario. Hay trabajos disponibles que usan estos algoritmos de guiado, pero principalmente para drones de ala fija y con el propósito de rastrear objetivos terrestres. En [8] se presenta una adaptación de PN para multirrotores que siguen objetivos terrestres. La adaptación de PP a multirrotores también se ha estudiado en [9] para el seguimiento de trayectoria combinándolo con el concepto de objetivo virtual. Además, existen otros enfoques como el propuesto en [10] con drones que optimizan el tiempo para detenerse después de la captura.

En cuanto a la evitación de obstáculos, estos algoritmos son locales y reactivos, ejecutados en tiempo real para que el drone vuelva a planificar su trayectoria para alcanzar el objetivo, asegurando una cierta distancia de los obstáculos encontrados. Hay muchos enfoques para este propósito, como los métodos de planificación de rutas: algoritmos de búsqueda en grafos [11] y exploración aleatoria rápida [12], o métodos reactivos: campos potenciales [13]. En este trabajo se utiliza una estrategia reactiva basada en la evaluación de una función de coste en las posiciones futuras de ambos drones, minimizando la desviación de la trayectoria de aproximación al área de intersección.

3. Estrategia de optimización

El objetivo básico es minimizar el tiempo de llegada a la intercepción por el drone de captura. Se han realizado modificaciones al tradicional método PP y se han considerado varios criterios para minimizar el tiempo de intercepción mediante la estimación de la región de intercepción:

- Modelado de la trayectoria seguida por el drone intruso basado en datos históricos.
- Predicción de la trayectoria a la que se espera que se mueva el drone intruso.
- Cálculo del tiempo para la interceptación y optimizado de la trayectoria de aproximación.

La idea clave detrás del algoritmo de optimización es aprovechar la información de la trayectoria seguida por el drone intruso para prever sus intenciones: cambios en el

curso, velocidad, etc. Se propone una estrategia de aproximación inteligente al drone intruso. Para propósitos de generación de trayectoria, se supone un modelo de trayectoria simple para los drones, debido a la eficiencia en su integración en cada paso de tiempo:

$$\frac{dx}{dt} = v * \cos(\gamma) * \cos(\varphi)$$
$$\frac{dy}{dt} = v * \cos(\gamma) * \sin(\varphi)$$
$$\frac{dz}{dt} = v * \sin(\gamma) \tag{1}$$

Si el subíndice «i» se refiere al drone intruso y el subíndice «c» al drone captor, las posiciones de los drones en un sistema de referencia fijo a tierra se definen como $q_i(t) = [x_i(t), y_i(t), z_i(t)]$ y $q_c(t) = [x_c(t), y_c(t), z_c(t)]$ y respectivamente. La velocidad de los drones se denota como para el drone intruso y v_c para el drone captor. Finalmente, el ángulo de ascenso y el ángulo de rumbo para cada drone se definen como γ_i y φ_i para el drone intruso, y γ_c and φ_c para el drone captor.

El control de los drones se basará en comandos de posición. La optimización se basa en una adaptación de la metodología PP para el seguimiento de un objetivo mediante el comando al drone captor $[q_c]_{cmd}$ de la posición actual del drone intruso $[q_i]$, para que siempre vuele hacia él: $[q_c]_{cmd} = [q_i]$. La distancia entre los dos drones *dist(t)* se puede calcular, en función del tiempo, en base a la posición de ambos drones. Esta distancia se calcula para las posiciones sucesivas de ambos drones a través de la integración de (1). El tiempo en el que esta distancia es mínima se identifica como candidato para ser el punto donde tendrá lugar la intercepción. Una estimación del tiempo requerido para la intercepción, t_{int}, viene dada por:

$$dist(t) = f\big(q_i(t), q_c(t)\big)$$
$$\frac{d(dist(t))}{dt} = 0 \implies t_{int} \tag{2}$$

De manera similar a la metodología de «Guiado de persecución desviado» [14], se propone comandar al drone captor la posición de intercepción anticipada teniendo en cuenta el instante t_{int} y usando la velocidad actual, el rumbo y el ángulo de ascenso del drone intruso. Así, el comando para el drone captor será $[q_c(t)]_{cmd} = [q_i(t_{int})]$. Dirigir el drone captor hacia el punto de intercepción previsto con el objetivo se llama Guiado Rumbo Constante (CB del inglés «Constant Bearing») en el campo de misiles, ya que la trayectoria del interceptor debe ser recta (ver Figura 2). Esto implicará una reducción en el tiempo para la intercepción, así como una reducción en la distancia recorrida por el drone malicioso y, por lo tanto, su posibilidad de alcanzar su objetivo y causar el daño.

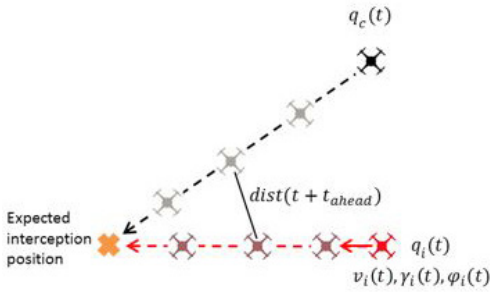


Figura 2. Proyección de las posiciones futuras de ambos drones y cálculo del punto de intersección esperado minimizando la distancia de las trayectorias proyectadas.

En caso de variaciones de rumbo o altura, la estimación de la posición de intercepción se actualiza en tiempo real, pero puede haber grandes desviaciones si los cambios son abruptos. Por lo tanto, se realizan modificaciones a la posición ordenada en ciertas circunstancias para optimizar la trayectoria de aproximación. Se definen dos parámetros para comparar la tasa de cambios del ángulo de rumbo φ_i y el ángulo de ascenso γ_i del drone intruso. Estos son K_1 para comparar con γ_i y K_2 para comparar con φ_i. Cuando ocurren cambios significativos, la posición comandada no puede basarse en predicciones muy largas de futuras posiciones del drone objetivo, ya que existe mucha incertidumbre sobre la dirección final que seguirá. De esta manera, la posición comandada para el drone captor se basará en la posición actual del drone intruso, y la confianza en las proyecciones futuras aumentará cuando las variaciones vuelvan a ser pequeñas. Para obtener la velocidad comandada $v_{c,cmd}$, es necesario descomponer el vector de velocidad e imponer la velocidad de los cambios en cada eje. Esta descomposición se realiza en función de la línea que une $[q_c(t)]_{cm}d$ and $[q_c(t)]$:

$$\gamma_{c,cmd} = \frac{z_{c,cmd}(t) - z_c(t)}{\sqrt{\left(x_{c,cmd}(t) - x(t)\right)^2 + \left(y_{c,cmd}(t) - y_c(t)\right)^2}}$$

$$\varphi_{c,cmd} = \frac{y_{c,cmd}(t) - y_c(t)}{x_{c,cmd}(t) - x(t)} \tag{3}$$

Las velocidades descompuestas comandadas para el drone captor se pueden calcular teniendo en cuenta $v_{c,cmd}$, $\varphi_{c,cmd}$ y $\gamma_{c,cmd}$, y con (1): $([vc,x(t)]_{cmd},[v_{c,y}(t)]_{cmd},[v_{c,z}(t)]_{cmd})$. Por consiguiente, la posición comandada en cada eje resultaría:

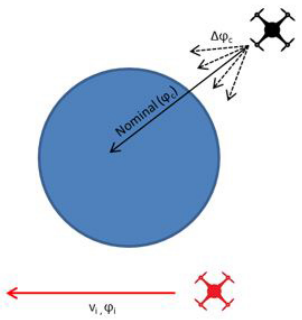
$$
\begin{aligned}
[x_c(t)]_{cmd} &= \int_0^{[q_{c,x}(t)]_{cmd}} [v_{c,x}(t)]_{cmd}\, dt \\
[y_c(t)]_{cmd} &= \int_0^{[q_{c,y}(t)]_{cmd}} [v_{c,y}(t)]_{cmd}\, dt \\
[z_c(t)]_{cmd} &= \int_0^{[q_{c,z}(t)]_{cmd}} [v_{c,z}(t)]_{cmd}\, dt
\end{aligned}
\tag{4}
$$

4. Evitación de obstáculos

En presencia de obstáculos, es necesario modificar localmente la trayectoria para evitar interferencias con ellos, pero minimizando la desviación de la ruta planificada previamente. De esta forma, se define una función de coste que tiene en cuenta la distancia al objetivo y la proximidad d_{obs} del drone captor a los obstáculos (5). La evaluación de esta función tiene un alto coste computacional, por lo que se actualiza a una frecuencia más baja. Mediante esta evaluación, será posible cambiar localmente el curso del drone captor para evitar los obstáculos actuales.

$$
\boldsymbol{cost(t) = f\big(dist(t, t+\Delta t, \dots), d_{obs}(t, t+\Delta t, \dots)\big)} \tag{5}
$$

La estrategia para evitar obstáculos considera un rango de comandos en rumbo $\Delta\varphi_{c,cmd}$ y ángulos de ascenso $\Delta\gamma_{c,cmd}$, tomando los valores $\varphi_{c,cmd}$ y $\gamma_{c,cmd}$, como referencias. La proyección de las posiciones futuras del drone captor se calcula mediante la integración de (1) considerando el previo barrido en ángulos. En cada iteración, esta función de coste se evalúa teniendo en cuenta la posición actual de ambos drones y la predicción en los instantes sucesivos en el rango considerado de orientaciones con respecto a la actual (6). La igura muestra la situación del drone captor (en negro) frente a un obstáculo que debe evitarse con el objetivo de seguir al drone intruso (en rojo).



$$
\begin{aligned}
\Delta\boldsymbol{\varphi_{c,cmd}} &= \boldsymbol{\varphi_{c,cmd}} + \Delta\boldsymbol{\varphi} \\
\Delta\gamma_{c,cmd} &= \gamma_{c,cmd} + \Delta\gamma
\end{aligned}
\tag{6}
$$

Figura 3. Explorando diferentes orientaciones para evitar obstáculos.

La función de coste tiene pesos para las dos dependencias de distancia al objetivo y distancia a los obstáculos, ofreciendo mayor relevancia a la distancia a los obstáculos. Además, las estimaciones futuras de colisiones con obstáculos $incl(t_n)$ se penalizan significativamente, asignando un valor de alto costo en estos casos. La función de coste resultante viene dada por:

$$\boldsymbol{cost(t)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{dist(t_i)}}{\mathbf{1000}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\mathbf{100/i}}{\boldsymbol{d_{obs}(t_i)}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\mathbf{1000}}{\boldsymbol{i}} \boldsymbol{incl(t_i)} \tag{7}$$

Las funciones $dist(t_n)$ y $d_{obs}(t)$ se calculan para el rango considerado de comando en rumbo $\Delta\varphi_{c,cmd}$ y ángulo de ascenso $\Delta\gamma_{c,cmd}$,. Por lo tanto, el curso y el ángulo de ascenso a seguir se eligen de tal manera que la función de coste tenga el valor más bajo.

$$\begin{aligned} \varphi_{c,obs} \,/\; \min cost(t) \;\; \forall\, \varphi \in (\varphi(t) + \Delta\varphi) \\ \gamma_{c,obs} \,/\; \min cost(t) \;\; \forall\, \gamma \in (\gamma(t) + \Delta\gamma) \end{aligned} \tag{8}$$

Como se explicó en la sección III, donde se calculan $\varphi_{c,cmd}$ y $\gamma_{c,cmd}$,, la variación de la posición ordenada en todos sus ejes se limita al descomponer la velocidad máxima ordenada de acuerdo con el curso y el ángulo de ascenso de la aeronave y el punto objetivo. Los ángulos calculados y reemplazan a $\varphi_{c,cmd}$ y $\gamma_{c,cmd}$, por lo que el drone captor se mueve de acuerdo con estos nuevos ángulos para evitar los obstáculos. Esto separará el drone captor de la trayectoria óptima, pero evitará la intersección con obstáculos. Por lo tanto, el algoritmo de evitación funciona comandando cambios en el rumbo del multirotor, pero no en el comando de posición basado en la estrategia de optimización explicada en la sección III.

5. Resultados

El análisis se centrará en una ruta aleatoria del drone intruso en el que hay múltiples cambios de orientación. Posteriormente, este escenario se combinará con un mapa de obstáculos para evaluar las capacidades del algoritmo desarrollado en el entorno requerido. Por la simplicidad del análisis, se considerarán velocidades constantes para ambos drones: 5 m/s para el drone intruso y una velocidad mayor de: 8 m/s para el drone captor. Se compararán los resultados obtenidos con la estrategia de Persecución Pura (PP) con la estrategia propuesta, que se denominará Interceptación basada en Persecución Pura (IPP). El análisis se realizará de acuerdo con el tiempo requerido para llevar a cabo la intercepción. Se define que se produce la interceptación en el momento en que la distancia entre ambos drones es inferior a 5 m, cuando un mecanismo de intercepción sería efectivo.

5.1. Escenario sin obstáculos

Se establece una trayectoria aleatoria en la Figura.a para el drone intruso, de modo que cambie su rumbo sin ningún criterio predefinido. El tiempo de intercepción con la estrategia nominal es de 235,12s. Por otro lado, si se utilizan las estrategias de optimización, el tiempo requerido para la intercepción es de 195,26s, por lo que hay una reducción del 16,95%. Se puede ver cómo la trayectoria del drone captor con la estrategia desarrollada lo dirige hacia una posición de intercepción estimada de forma más directa, acortando el viaje al mostrador. La estimación del punto de encuentro está condicionada por los cambios de orientación del drone intruso.

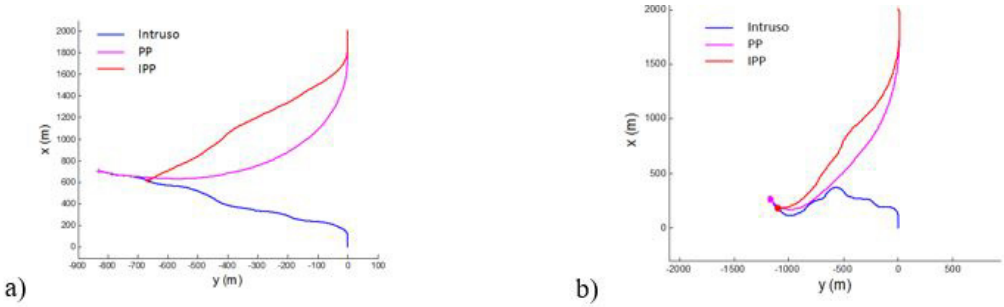


Figura 4. Comparación entre enfoque nominal y modificado con trayectoria curvilínea del drone intruso.

Se puede mostrar otro resultado en el caso de Figura.b para remarcar la diferencia entre las dos estrategias consideradas con una trayectoria del drone intruso que realiza una trayectoria más curvilínea. En este caso, la mejora en el rendimiento medida como la reducción del tiempo necesario para la intercepción es del 6,7%.

5.2. Escenario con obstáculos

En caso de que haya obstáculos en el entorno donde se desea la intercepción, será necesario modificar la trayectoria de aproximación en función del algoritmo de la sección IV. A continuación hay un ejemplo de la intercepción producida con la misma trayectoria para el drone intruso que en el caso anterior pero con dos circunferencias que representan obstáculos. Nuevamente, se comparan las capacidades de las dos estrategias analizadas en este estudio. En el primer caso de PP hay un tiempo requerido de intercepción de 225,37s, mientras que con el IPP el tiempo se reduce a 200,07s, de modo que la reducción del tiempo de exposición de la amenaza es del 11,23%

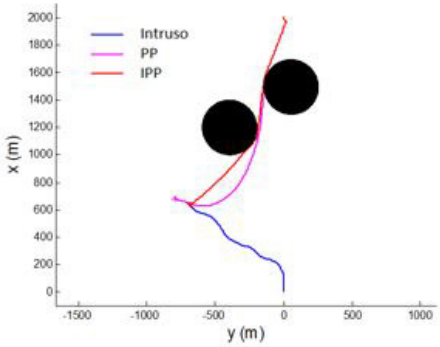


Figura 5. Comparación entre PP e IPP con obstáculos presentes.

La Figura muestra un ejemplo de ciertas trayectorias y entornos. Se han realizado hasta 100 simulaciones con diferentes trayectorias para el drone intruso y considerando diferentes mapas de obstáculos con una densidad similar a la mostrada en la Figura. En general, los resultados son satisfactorios con una reducción promedio del tiempo de exposición en un entorno sin obstáculos alrededor del 15%; y cuando hay obstáculos, esta mejora se reduce a aproximadamente el 10%. Esto se debe al hecho de que la replanificación realizada para evitar obstáculos hace que las optimizaciones del algoritmo IPP sean menos eficientes.

6. Conclusiones

Este artículo analiza un algoritmo de guiado que permite que otros drones intercepten drones maliciosos en un entorno con obstáculos como un escenario urbano. El objetivo principal es reducir el tiempo de exposición del drone malicioso y minimizar la amenaza. Se han adaptado y mejorado los algoritmos de guiado de misiles para la interceptación, tales como el PP, al problema de la interceptación de multirrotores teniendo en cuenta las particularidades del movimiento de este tipo de aeronaves. Además, se ha considerado un entorno de obstáculos ya que el caso de la intercepción de drones en entornos urbanos es de especial interés, donde el peligro de esta amenaza es muy significativo debido a la alta densidad de población. Este enfoque ha sido probado en un entorno de simulación. Los resultados extraídos de las simulaciones muestran las importantes mejoras producidas por las estrategias de orientación propuestas en comparación con las soluciones tradicionales en un escenario de búsqueda aérea e intercepción entre drones.

El trabajo futuro se centrará en aumentar las capacidades del algoritmo presentado aquí a una multitud de entradas de trayectoria variable del drone intruso y mapas de obstáculos para minimizar el tiempo de intercepción. Además, se requiere más trabajo

para la etapa final de la trayectoria de aproximación en la que el drone receptor debe capturar el drone intruso, cuando la distancia relativa es pequeña. Además, se han planeado pruebas experimentales destinadas a tener una validación práctica de los resultados obtenidos en la simulación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea dentro del proyecto ALADDIN bajo el Acuerdo de Subvención Nº 740859

Referencias

1. I. Güvenç, O. Ozdemir, Y. Yapici, H. Mehrpouyan y D. Matolak, *Detection, Localization, and Tracking of Unauthorized UAS and Jammers,* 36th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC '17), 2017.
2. *Scrambler 1000 [Online]. Available: https://www.mc2-technologies.com/scrambler-1000/.*
3. T. Lefebvre, T. Dubot y A. Joulia, *Conceptual study of an Anti-Drone Drone through the coupling of design process and interception strategy simulations,* Washington, D.C.: 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2016.
4. J. M. Goppert, A. R. Wagoner, D. K. Schrader, S. Ghose, Y. Kim, S. Park, M. Gomez, E. T. Matson y M. J. Hopmeier, *Realization of an Autonomous, Air-to-Air Counter Unmanned Aerial System (CUAS),* First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), 2017.
5. S. Thrun, W. Burgard y D. Fox, Probabilistic robotics, 2005.
6. *NO-DRONE [Online]. Available: https://www.idscorporation.com/pf/no-drone/.*
7. *Boreades [Online]. Available: http://boreades.fr/.*
8. R. Tan, *Tracking of Ground mobile Targets by Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles,* University of Cincinnati, 2013.
9. A. Manjunath, *Pah following by a quadrotor using virtual target pursuit guidance,* Utah State University, 2016.
10. M. Hehn y R. D'Andrea, *Real-Time Trajectory Generation for Interception Maneuvers with Quadcopters,* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012.
11. M. García, A. Viguria y A. Ollero, *Dynamic graph-search algorithm for global path planning in presence of hazardous weather,* Journal of Intelligent & Robotic Systems, Volume 69, Issue 1–4, pp 285–295, 2013.

12. M. V. Ramana, S. A. Varma y M. Kothari, *Motion Planning for a Fixed-Wing UAV in Urban Environments,* IFAC Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems: Volume 49, Issue 1, 2016, Pages 419-424, 2016.
13. A. Budiyanto, A. Cahyadi, T. Bharata Adji y O. Wahynggoro, *UAV Obstacle Avoidance Using Potential Field under Dynamic Environment,* International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC), 2015.
14. A. Ratnoo, *Variable Deviated Pursuit for Rendezvous Guidance,* Journal of Guidance, Control, and Dynamics, April, Vol. 38, No. 4 : pp. 787-792, 2015.

Procesado avanzado de la firma Multi-Influencia submarina generada por buques para aumentar su detectabilidad y clasificación

Rodrigo Saura, Francisco Javier[1,*] y Valdez Pérdomo, Julián[1]

[1] Sociedad Anónima de Electrónica Submarina (SAES). Carretera de la Algameca s/n, 30205, Cartagena. f.rodrigo@electronica-submarina.com (FJRS), j.valdez@electronica-submarina.com (JVP).

* Autor Principal y responsable del trabajo: f.rodrigo@electronica-submarina.com (FJRS).

Resumen: Las plataformas navales, en escenarios operativos reales, radian energía al entorno marino que, de manera general, se clasifican en función de sus fuentes y medio de propagación en energía acústica y no acústica. La energía radiada, una vez adquirida mediante sensores y caracterizada mediante sistemas de procesamiento se conoce comúnmente como firma. En el ámbito de la ingeniería se desarrollan sistemas con alta capacidad de medir y caracterizar dicha energía submarina radiada para detectar, localizar y clasificar a la fuente emisora. Así, están ampliamente extendidos tanto los sistemas de detección acústica tipo SONAR y sistemas de procesamiento de sonoboyas como armas submarinas tipo minas navales y torpedos. Tradicionalmente, tanto los sistemas de detección como las armas submarinas explotan la firma acústica y en ocasiones la magnética como entrada para el procesamiento, no integrando otros tipos de firmas existentes como la firma eléctrica estática, la firma electromagnética alterna, la firma sísmica y la firma de presión. En el presente trabajo se realiza la explotación de la considerada firma multi-influencia, compuesta de manera simultánea de la firma acústica, electromagnética estática y alterna, sísmica y firma de presión. Mediante el empleo de técnicas de procesado de señal avanzadas aplicadas a la firma multi-influencia se verifica que la explotación de dicha firma aumenta la capacidad de detección y clasificación de plataformas navales respecto al procesamiento individual de cada tipo de firma. Con el objeto de analizar y evaluar la mejora obtenida en la capacidad de detección y clasificación se aplican las técnicas de procesado avanzadas a medidas multi-influencia reales de buques de superficie adquiridas en aguas poco profundas con el sistema de medida multi-influencia MIRS fabricado por SAES.

Palabras clave: Acústica Submarina, Firma Multi-Influencia, Machine Learning.

1. Introducción

Todos los buques radian energía en escenarios operativos reales. En función de la naturaleza de la fuente, la energía radiada puede ser de origen acústico o no acústico. Además, dependiendo del tipo de energía radiada y del modo de propagación en el entorno submarino, la energía radiada de origen acústico se clasifica en energía acústica y energía sísmica, mientras que la energía radiada de origen no acústico, que suele ser de origen electromagnético se clasifica en energía eléctrica y energía magnética. Finalmente, la energía radiada es adquirida por sensores y caracterizada usado técnicas de procesado de señal en sistemas para conformar la llamada firma. Así, la firma multi-influencia está compuesta de la firma acústica, sísmica, eléctrica, magnética y de presión adquiridas y procesadas simultáneamente por un sistema.

La firma medida es característica de la plataforma que la genera, y su explotación permite la detección y clasificación de la fuente generadora. La detección es posible cuando la fuente genera una firma de amplitud superior al ruido acústico y/o no acústico existente en el entorno submarino. La clasificación es posible si existe una base de conocimiento de las características típicas que genera la plataforma en detección.

En la actualidad, los sistemas de explotación de la firma acústica están ampliamente estudiados y extendidos, de manera que se utilizan comúnmente en plataformas militares para la detección y clasificación de contactos. Esto es debido a que la firma acústica se puede detectar a grandes distancias, proporcionando a la plataforma que integra los sistemas acústicos ventajas tácticas. Por el contrario, el principal problema que presenta la firma acústica es su dependencia con el perfil de velocidad del sonido. Esta curva depende de la temperatura, profundidad y salinidad del agua de mar, y determina el modo de propagación de los rayos sonoros en el entorno marino, propiciando que las distancias de detección dependan de la profundidad de la fuente y del receptor, características de la emisión de la fuente y del sistema acústico receptor. Así, dependiendo de los factores comentados, la detección de un contacto puede que no sea posible mediante medios acústicos. Además, hay que considerar que el nivel de ruido debe ser el adecuado para no enmascarar el nivel emitido por la fuente medido en el receptor.

Por el contrario, la firma multi-influencia, no considera sólo la firma acústica, sino que además permite el procesamiento de la firma sísmica, eléctrica, magnética y de presión. El procesamiento conjunto de las cinco influencias aumenta la capacidad de detección de un blanco en un medio ruidoso y la clasificación del mismo.

En el presente estudio, se realiza el procesamiento de la firma multi-influencia utilizando técnicas de aprendizaje Machine Learning mediante un algoritmo de aprendizaje con entrenamiento supervisado para la detección y clasificación de buques. La técnica

Machine Learning es aplicada a una base de datos de medidas adquiridas con el sistema Multi-Influence Range System (MIRS) fabricado por SAES.

2. Descripción del procesamiento Machine Learning

Las técnicas de Machine Learning para decisión consisten en seleccionar una función F_w y adaptar sus parámetros para optimizar un objetivo sobre las observaciones etiquetadas disponibles (entrenamiento supervisado), manteniendo la generalización.

Un algoritmo de decisión lineal basado en una capa implementa una función $F_w = u(w^T x + w_0)$, siendo $u()$ una función de tipo umbral con salidas binarias (±1 o 0 y 1). En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques del algoritmo de decisión máquina de una sola capa.

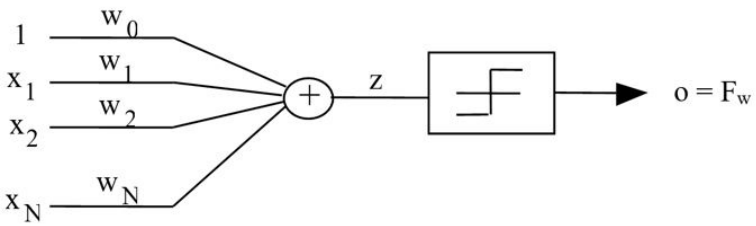


Figura 1. Diagrama de bloques del algoritmo de aprendizaje supervisado de una capa.

donde es una combinación lineal de las entradas w_j son las variables que determinan el clasificador y es la salida después de que $z = \boldsymbol{w}^T \boldsymbol{x} + w_0$ se ha pasado por el decisor (umbral duro). En este trabajo, los datos de entrada son bidimensionales, por lo que $N = 2$. En la Figura 2 se observa como el clasificador lineal divide el espacio de observación en dos partes proporcionando salidas positivas para entradas (observaciones) que estén situadas en la mitad indicada con un signo +, y salidas negativas o nulas para muestras situadas en la otra mitad.

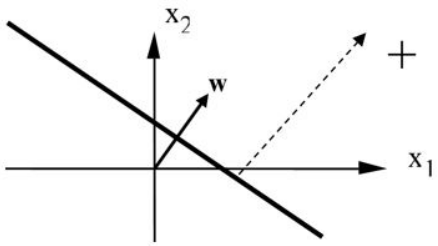


Figura 2. Representación de la frontera de decisión lineal del algoritmo de decisión máquina basado en una capa.

Con el objeto de encontrar los pesos o parámetros **w** óptimos que minimizan el error en la clasificación, se pueden utilizar algoritmos de descenso por gradiente que realizan la búsqueda de acuerdo a la Ecuación 1.

$$\boldsymbol{w}(k+1) = \boldsymbol{w}(k) + \Delta\boldsymbol{w}(k) = \boldsymbol{w}(k) - \mu\nabla_w C(k) \tag{1}$$

donde ∇_w C es el vector gradiente de la función de coste C(**w**) que se deseea minimizar. De esta forma, los pesos o parámetros **w** se modifican en cada etapa *k* según la dirección contraria al gradiente de la función de coste C(**w**) con el objeto de acercarnos a un mínimo de dicha función. Los pesos cambian en cada etapa una cantidad Δ**w** que depende del parámetro μ libre llamado escalón o parámetro de aprendizaje.

Para la minimización por gradiente de la función de coste, error cuadrático, se puede utilizar el algoritmo Least Mean Square (LMS). En este caso, la función de coste se expresa como se muestra en la Ecuación 2.

$$C(\boldsymbol{w}) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{k}(d_k - z_k)^2 \tag{2}$$

donde d_k son las salidas deseadas o targets. La ecuación de búsqueda de los pesos **w** óptimos utilizando el entrenamiento por gradiente aplicando el método LMS en bloque se expresa en la Ecuación 3 y aplicando el método LMS muestra a muestra se expresa en la Ecuación 4.

$$\boldsymbol{w}(m+1) = \boldsymbol{w}(m) + \mu\sum_{k=1}^{k}(d_k - z_k(m))\boldsymbol{x_k} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{w}(k+1) = \boldsymbol{w}(k) + \mu(d_k - z_k)\boldsymbol{x_k} \tag{4}$$

El algoritmo LMS ajusta los pesos de modo que las salidas del modelo (targets) se parezcan (en el sentido de mínimo error cuadrático) a las salidas del sistema, (salidas antes del decisor o función de umbral).

3. Descripción del análisis realizado

Con el objeto de evaluar la capacidad de detección y clasificación del algoritmo de aprendizaje con entrenamiento supervisado descrito en la sección anterior, se realiza el estudio de procesando señales multi-influencia adquiridas con el sistema MIRS fabricado por SAES.

El sistema de medida multi-influencia MIRS permite medir de manera simultánea la firma acústica, eléctrica estática y alterna, magnética eléctrica estática y alterna, sísmica y de presión de manera simultánea de un buque en tiempo real mediante unidades de adquisición, que integran los cinco sensores de medida, desplegadas en el fondo marino. Las influencias adquiridas son enviadas vía cable a la estación de control, configuración, almacenamiento, análisis y presentación de datos. Adicionalmente, cuando las medias se realizan de un buque de manera coordinada, el sistema MIRS integra una unidad de seguimiento que proporciona a la estación de tierra los datos de navegación. En la Figura 3 se muestra las unidades de adquisición del sistema MIRS.

Figura 3. Despliegue de unidad de sensores del sistema MIRS, a) transporte al área de medidas, b) maniobra de despliegue y c) unidad de sensores desplegada en el fondo.

El área de operaciones donde se ha realizado el despliegue del sistema MIRS corresponde a la costa de la Región de Murcia, en concreto en una zona próxima al puerto de Cartagena, caracterizado por elevados niveles de ruido debido a la actividad humana, en especial trabajos en el área portuaria y tráfico marítimo.

El número de medidas realizadas es 5731, de las cuales 3291 corresponden a medidas de buques y 2437 a medidas de ruido ambiente. En la Tabla 1 se muestra el número de medidas correspondiente a cada clase de buque.

Tabla 1. Número de medidas realizadas de cada clase de buque.

Mercantes	Pesquero	Crucero	Recreo	Remolcador	Velero	Otros
353	644	94	666	308	313	916

Para cuantificar la mejora en las prestaciones de detección y clasificación que proporciona el algoritmo de aprendizaje supervisado, se procesa la firma acústica, eléctrica, magnética y sísmica en el dominio del tiempo. El indicador que se extrae para cada una de ellas es el máximo del módulo de la firma eléctrica y magnética y el máximo de la en-

volvente de la firma acústica y del módulo de la firma sísmica. En la Figura 4 se muestra el indicador normalizado a la mitad del máximo obtenido para todo el conjunto de medidas y para cada tipo de firma.

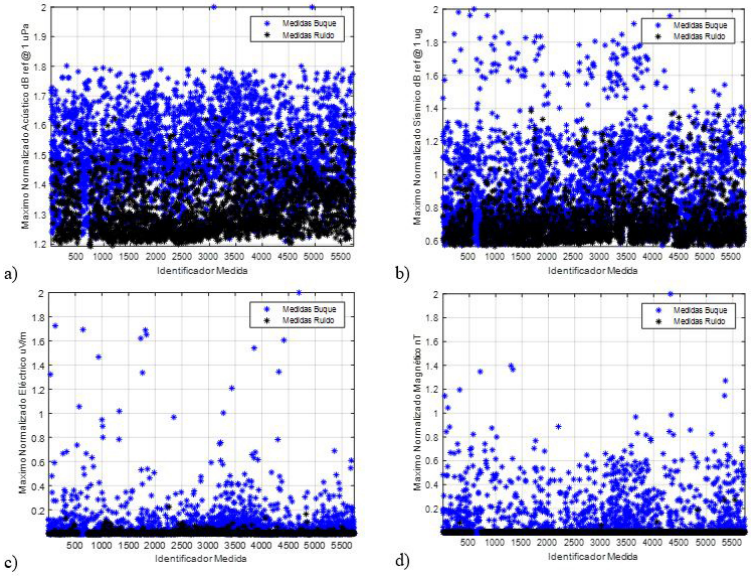


Figura 4. Máximos normalizados de a) envolvente de la firma acústica, b) envolvente del módulo de la firma sísmica, c) módulo de la firma magnética y d) módulo de la firma magnética obtenido para todo el conjunto de medidas.

Como se puede observar, no es claramente distinguible si el indicador corresponde a una medida correspondiente a un buque o a una medida correspondiente a ruido ambiente, especialmente, en las firmas acústicas y sísmicas. Con el objeto de evaluar la capacidad de detección se emplea el método de la umbralización, esto es, se calcula un umbral y se determina si hay detección de buque o no en función del paso por umbral. El umbral se calcula como la media de las primeras 250 medidas correspondiente a nivel de ruido ambiente para cada tipo de firma.

El proceso de aprendizaje supervisado se aplica creando un espacio de supervisión bidimensional. En el proceso de detección, cada dimensión corresponde a un tipo de firma diferente y se aplica el algoritmo LMS en bloque para el cálculo de los pesos . El número de medidas utilizadas para el aprendizaje es 250, correspondiendo 125 medidas a buques y 125 medidas a ruido ambiente. En la Figura 5 se muestra el espacio de observaciones del conjunto de entrenamiento y test cuando para detección se utiliza la firma acústica y sísmica y la frontera de decisión obtenida para el cluster de medidas de ruido ambiente (rojo) y el cluster de medidas de buques (negro).

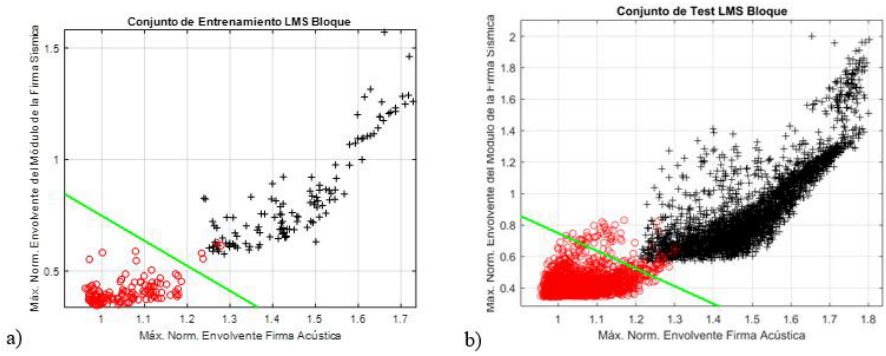


Figura 5. a) Espacio de observaciones del conjunto de entrenamiento y b) espacio de observaciones de test cuando se utiliza la firma acústica y sísmica para detección. En verde la frontera de decisión obtenida durante el entrenamiento supervisado.

El proceso de clasificación de buques se realiza de manera similar, por un lado, se realiza un proceso de clasificación basado en la umbralización de lo indicadores obtenidos, determinando un umbral de clasificación por cada tipo de buque y para cada tipo de firma. Para realizar la clasificación usando el algoritmo de decisión máquina se crea el espacio de observaciones de dos dimensiones siendo cada dimensión los indicadores obtenido para cada tipo de buque.

4. Resultados y discusión

En la Tabla 2 se muestra la probabilidad de detección y probabilidad de falsa alarma que se obtiene mediante el proceso de umbralización.

Tabla 2. Probabilidad de detección positiva y fala alarma obtenida mediante el método de umbralización para cada tipo de firma.

Tipo Firma	Probabilidad de Detección Positiva (%)	Probabilidad de Falsa Alarma (%)
Acústica	51,88	16,04
Sísmica	44,86	14,11
Eléctrica	36,76	13,38
Magnética	29,43	1,86

Como se puede observar, la probabilidad de detección de un buque mediante firma acústica y sísmica es superior que la probabilidad de detección de un buque mediante firma eléctrica y magnética. Esto es debido a que la ley de atenuación de las firmas electromagnéticas tiene una relación cúbica con la distancia, lo que implica que, si la distancia del sensor al buque es considerable, la amplitud de dichas firmas no es superior al

ruido ambiente. Por este motivo, a las firmas electromagnéticas se les suele llamar de campo cercano. Por el contrario, la probabilidad de falsa alarma de las firmas electromagnéticas es inferior, ya que el ruido electromagnético presente en el entorno marino es de amplitud muy pequeña.

En la Tabla 3 se muestra la probabilidad de detección y probabilidad de falsa alarma que se obtiene mediante el método de Machine Learning descrito.

Tabla 3. Probabilidad de detección positiva y fala alarma obtenida mediante el método de Machine Learning basado en aprendizaje supervisado.

Tipo Firma	Probabilidad de Detección Positiva (%)	Probabilidad de Falsa Alarma (%)
Acústica-Sísmica	63,72	8,96
Acústica-Eléctrica	64,02	4,9
Acústica-Magnética	62,08	1,65
Sísmica-Eléctrica	59,57	6,8
Sísmica-Magnética	56,1	1,5
Eléctrica-Magnética	41,44	0,92

En la Tabla 3 se muestra como la probabilidad de detección aumenta al utilizar la firma multi-influencia debido a que las características de cada firma se complementan. Por otro lado, la probabilidad de detección de falsas alarmas disminuye principalmente al utilizar firmas electromagnéticas que presentan una probabilidad de falsas alarmas muy reducida.

En la Tabla 4 se muestra la probabilidad de éxito en el proceso de clasificación basado en umbralización obtenido con cada firma de manera independiente.

Tabla 4. Probabilidad de éxito en la clasificación de buques utilizando el método de umbralización.

Firma	Mercantes	Pesquero	Crucero	Recreo	Remolcador	Velero	Otros
Acústica	65	59	78	30	62	20	45
Sísmica	60	55	70	28	55	15	29
Eléctrica	82	65	85	15	75	5	26
Magnética	89	71	95	20	81	10	36

En la Tabla 4 se muestra como la probabilidad de éxito en la clasificación, usando la técnica de umbralización depende del nivel de firma generado por el buque. Así, la probabilidad de clasificar buques de gran porte es muy alta. También se puede observar

que la variabilidad y el ruido ambiente de las señales acústicas y principalmente de las señales sísmicas es muy alta, haciendo que la probabilidad de clasificación sea inferior a la probabilidad de clasificación usando señales electromagnéticas.

Finalmente, en la Tabla 5 se muestra la probabilidad de clasificación de buques de manera exitosa usando el método de Machine Learning descrito.

Tabla 5. Probabilidad (%) de éxito en la clasificación de buques obtenida mediante el método de Machine Learning basado en aprendizaje supervisado.

Firma	Mercantes	Pesquero	Crucero	Recreo	Remolcador	Velero	Otros
Acústica-Sísmica	72	62	79	35	67	26	55
Acústica-Eléctrica	87	72	82	34	78	23	51
Acústica-Magnética	95	82	95	32	86	21	48
Sísmica-Eléctrica	86	73	87	35	78	18	30
Sísmica-Magnética	93	79	95	35	85	17	32
Eléctrica-Magnética	90	73	95	28	82	15	42

Como se puede observar en la Tabla 5, al utilizar de manera combinada firmas acústicas y no acústicas, y principalmente para buques de gran porte, el éxito de clasificación aumenta al utilizar técnicas de Machine Learning.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se ha verificado que la utilización de la firma multi-influencia, compuesta por firmas acústicas y no acústicas aumenta la probabilidad de detección y reduce la probabilidad de falsas alarmas. Además, aumenta la probabilidad de éxito en la clasificación de buques de diferente clase.

El proceso utilizado para realizar el proceso de detección y clasificación está basado en técnicas de Machine Learning del tipo aprendizaje supervisado. Este método se ha aplicado para realizar la detección y clasificación de medidas multi-influencia reales obtenidas con el sistema MIRS fabricado por SAES. Los resultados obtenidos han sido comparados con la detección y clasificación realizada con procesos basados en umbralización. Se ha verificado que la técnica de Machine Learning aplicada a la firma multi-influencia aumenta la probabilidad de detección y clasificación.

Referencias

1. R. J. Urick. Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill, **1993**.
2. Rodrigo-Saura F.J & Sánchez-García A. Main characteristics of the MIRS measured electric and magnetic underwater radiations emitted by cruise ships in the Mediterranean Sea. *In Proceedings of the Maritime Systems & Technology* (MAST) EurAsia Conference, Istanbul (Turkey), May **2014**.
3. Rodrigo-Saura F.J & Sánchez-García A. Stand out characteristics of electric and magnetic fields emitted by cruise ships in the Mediterranean Sea. In *Proceedings of the Marine Electromagnetics* (MARELEC) Conference, Philadelphia (USA), June **2015**.
4. Rodrigo-Saura F.J, Sánchez-García A & Moya-Rivas E. Correlation patterns of multi-influence measurements from cruise ships in the Mediterranean Sea. *In Proceedings of the sixth international workshop on Marine Technology* (MARTECH), Cartagena (Spain), September **2015**.

e-nose «Azotic 1.0»: pruebas de estabilidad sobre pólvoras de base nitrocelulósica

López Sánchez, Raúl[1,*], Baza Herrero, David[1], López Ruíz, Sandra[1], Pardo Almudí, Rafael[2] y Debán Miguel, Luis M[2]

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

[2] Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid, Paseo de Belén 7, 47011 Valladolid, Spain.

* Autor principal y responsable del trabajo: lopezsr@inta.es (RLS).

Resumen: Las pólvoras sin humo, utilizadas para la propulsión de proyectiles, tienen como base principal a la nitrocelulosa; inestable de forma natural, se puede autoiniciar al emitir vapores durante su envejecimiento natural. Esta inestabilidad, unida a los prolongados períodos de almacenamiento, pone en riesgo los polvorines, por lo que suelen aplicarse las pruebas clásicas de estabilidad *in situ*, como primer paso del Plan Nacional de Vigilancia sobre la Munición. Estas pruebas clásicas son ensayos fenomenológicos relacionados con la estabilidad de las pólvoras y, aún hoy en día, constituyen una herramienta esencial para garantizar la seguridad en el almacenamiento de las pólvoras. A pesar de la prolífica regulación sobre estos ensayos, la información que proporcionan es escasa, aspecto que los ha relegado a técnicas de *screening*.

En el presente documento se presenta una nueva prueba de estabilidad, modernización del test de Will, que mide la concentración de los gases emitidos (p.ej. NO_2), en condiciones isocóricas e isotérmicas. La nueva instrumentación, basada en semiconductores quimioresistivos, aporta una mejora sustancial en la sensibilidad, robustez y fiabilidad de los datos experimentales. Adicionalmente, también se presenta una nueva metodología para la interpretación de los resultados. En conjunto, puede considerarse que se ha realizado un avance reseñable en la necesaria modernización de las pruebas clásicas de estabilidad.

Palabras clave: pruebas de estabilidad, test de Will, *e-nose*, pólvoras, nitrocelulosa.

1. Introducción

1.1. La nitrocelulosa y las pólvoras sin humo

La nitrocelulosa –NC– es un éster nítrico polimérico, con un marcado comportamiento inflamable y se considera el componente principal de las denominadas pólvoras sin humo, o pólvoras de base nitrocelulósica. Para la fabricación de propulsantes, la NC se suele obtener por nitración directa de la celulosa con ácido nítrico hasta un máximo del 13.7 %N, aun cuando la nitración completa sea del 14.4 %N, ver Figura 1a), el producto que se obtendría sería altamente inestable y sin aplicaciones prácticas. Es, por todo lo anterior, que la NC de uso militar no presenta una estructura definida debido a la disposición aleatoria de los tres grupos nitro (-NO_2) sobre las posiciones, originalmente ocupadas, por los grupos hidroxilo (-OH) de la celulosa [1].

Figura 1. a) Celulosa trinitrada, b) pólvora emitiendo «vapores rojos» a temperatura ambiente.

En las pólvoras sin humo, además de la NC, se pueden encontrar numerosos aditivos. Destaca, como segundo componente más importante la nitroglicerina –NG– que puede llegar a constituir más del 35 %w. Aunque la NG deba ser considerada como un agente polifuncional, una de sus principales funciones es la de gelatinizar el grano durante la fabricación de la pólvora, favoreciendo de esta forma la dispersión de otros aditivos (p.ej. estabilizantes) y contribuyendo a la estabilidad de las pólvoras de doble y triple base.

1.2. Problemática de la estabilidad

La intrínseca inestabilidad de la nitrocelulosa, incluso a temperatura ambiente (Figura 1b) es una situación que se agrava porque la desnitración es un proceso exotérmico, autocatalítico [2] y fuertemente dependiente de las condiciones ambientales: temperatura, oxígeno y humedad [3]. Los dos mecanismos más relevantes para la desnitración de la NC son la termólisis y la hidrólisis [4], en ambos se emiten gases (ver Figura 2) capaces de acelerar la descomposición de forma descontrolada. A continuación, en la Tabla 1, se presentan los principales mecanismos de envejecimiento con relevancia para el presente estudio.

Tabla 1. Mecanismos del envejecimiento de la NC.

Mecanismos	*Reacción principal*
Termólisis	$RONO_2 \rightarrow RO\bullet + NO_2$
Hidrólisis	$RONO_2 + H_2O \overset{H^+}{\rightleftarrows} ROH + HNO_3$
Autocatálisis	$RO\bullet + NO_2 \overset{NO_2}{\rightleftarrows} R'ONO_2 + NO + N_2O + N_2 + N_2O_4 + NO_2 + CO_2 + CO + H_2O + H_2 + C_2H_2O_4 + H_xC_yO_z$.
Equilibrios varios	$2\,NO + O_2 \rightarrow 2\,NO_2 \rightleftarrows N_2O_4$ $NO + NO_2 + H_2O \rightleftarrows 2\,HNO_2$ $3\,HNO_2 \rightleftarrows HNO_3 + H_2O + 2\,NO$

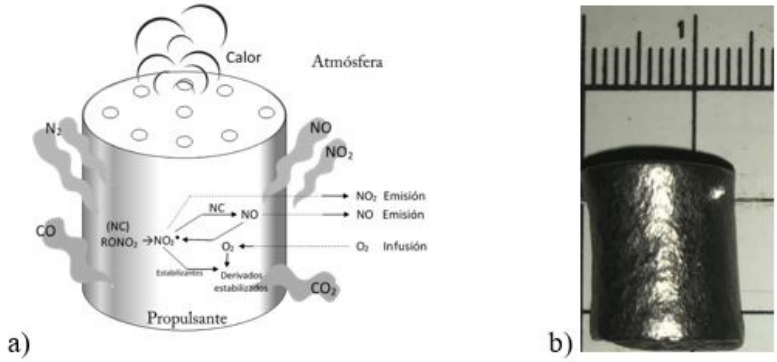


Figura 2. a) Esquema de los vapores emitidos por un grano de pólvora, b) grano de pólvora.

Los largos períodos de almacenamiento a los que son sometidos estos materiales energéticos, aumentan el riesgo de autoiniciación en los polvorines y santabárbaras, con funestos resultados, como nuestra historia reciente nos recuerda [5]. Los estudios de Robertson y Napper [2] constataron que la NC, incluso a temperatura ambiente en presencia de oxígeno, emite espontáneamente elevadas cantidades de NO_2. Posteriormente, Koehler y Marqueyrol [6] estudiaron la descomposición de la NC a vacío, identificando como principales gases emitidos al NO_2 (52 % a 100ºC), CO_2 y CO, aunque también constataron la emisión de pequeñas cantidades de NO, N_2 e HC. Las pólvoras de doble base presentan una elevada variedad composicional y esto se refleja en mezclas más complejas de vapores; a esta situación contribuyen, no solo la bien conocida influencia de la NG, sino también los aditivos activos (p.ej. estabilizantes) cuya función principal es, precisamente, la de reaccionar con el NO_2 emitido para evitar la autocatálisis [7] de la NC.

1.3. Problemática de las pruebas clásicas de estabilidad y de los envejecimientos acelerados

A pesar de que el estudio sobre la estabilidad de las pólvoras ha sido un campo intensamente investigado, la implantación de las técnicas analíticas de separación supuso

una revolución, al introducir una elevada precisión en la determinación de nuevas variables relacionadas con el envejecimiento de las pólvoras. Las técnicas cromatográficas facilitaron una rápida, y precisa, cuantificación del estabilizante presente en la composición de la pólvora; esto permitió disponer de una nueva herramienta para estimar un tiempo de vida para la pólvora en función de la concentración de los estabilizantes, ver Ecuación 1 [8]. Sin embargo, esta estimación es indirecta al no encontrarse relacionada con el comportamiento del material. A día de hoy, las pruebas clásicas de estabilidad siguen siendo las únicas que permiten un estudio del comportamiento fenomenológico en las pólvoras de base nitrocelulósica.

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{Ea}{R \cdot T}} \rightarrow t = \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{S}{S_o}\right)^{1-n}}{1-n} \right] \cdot e^{\frac{E}{RT}} \tag{3}$$

donde t es el tiempo de vida de la pólvora, n el orden de la reacción, S y S_o son, respectivamente, la concentración de estabilizante en el momento del ensayo e inicial.

En la predicción del comportamiento futuro de las pólvoras, los procesos de envejecimiento acelerado son herramientas imprescindibles que utilizan el mismo principio que las pruebas clásicas de estabilidad: la relación exponencial entre la desnitración y la temperatura (relación de Arrhenius) acelerando la descomposición de la NC por incremento de temperatura. Tanto las pruebas de estabilidad, como los envejecimientos acelerados de las pólvoras de doble base, se encuentra bajo una fuerte normalización (p.ej. AOP-48 [8], STANG 4178 [9]). Las pruebas de estabilidad, y los envejecimientos acelerados, se realizan en condiciones isotérmicas para mantener una velocidad de descomposición constante durante el proceso, salvo que se alcance la fase autocatalítica [7] o se haya acumulado una desnitración tan severa que, a efectos prácticos, el material haya dejado de comportarse como un propulsante.

Los ensayos clásicos de estabilidad son numerosos [10] aunque pueden agruparse en dos familias. La primera familia de tests como se denominan históricamente, está constituida por los ensayos más más utilizados, con una escasa dificultad técnica y cuyo factor común es la estimación de la concentración de gases de forma visual o por el tiempo de viraje de un papel indicador. Por su parte, los ensayos del segundo grupo de tests precisan de una compleja instrumentación y una mayor pericia por parte del analista; en esta familia se cuantifican los gases emitidos o alguna propiedad de la pólvora (p.ej. pérdida de peso) relacionadas con el proceso de descomposición. A continuación se enumeran algunos de los ensayos más conocidos para cada una de estas dos familias.

– Familia 1: Las condiciones térmicas de ensayo suelen definir el método, destacando los siguientes tests: vapores rojos, fume test o U.S. supervision test (132 *ºC*), test de Will o de violeta de metilo (100 *ºC* a 135 *ºC*), test de Abel o de yoduro potásico –con una variante de yoduro de zinc– (75 *ºC* a 82 *ºC*), heat test (65.5 *ºC* a 100 *ºC*) y test de Vieille –también llamado del papel de tornasol, o litmus– (108.5 *ºC*) [10].
– Familia 2: destacan el test de Bergmann y Junk (cuantifica NO_x absorbidos por agua), Dutch test o test holandés (cuantifica la pérdida de peso), vacuum test o estabilidad a vac*ío* (cuantifica incremento de presión) [11] y el test de Woolwich (cuantifica el estabilizante).

Actualmente, estos métodos de estabilidad para pólvoras se denominan «pruebas clásicas» y tienen una incuestionable utilidad en los controles de calidad durante la fabricación. Además, constituyen una herramienta esencial para las pruebas de vigilancia por combinar la facilidad operacional y de interpretación de los resultados fenomenológicos. Ninguno de estos aspectos puede considerarse aplicable a las técnicas cromatográficas.

A pesar de las citadas ventajas, las pruebas de estabilidad son herramientas con importantes deficiencias a la hora de realizar un dictamen sobre la estabilidad de las pólvoras, principalmente debido a la escasa información que estas proporcionan; por ejemplo, la primera familia de test, proporciona como respuesta el tiempo de viraje de un papel indicador frente a vapores, normalmente ácidos. No es posible considerar que estos ensayos cuantifican la concentración de una molécula objetivo, p.ej. NO_2, sino que su respuesta se debe a la acción conjunta de diversos vapores, en su mayoría, procedentes de la descomposición de la pólvora. Un ejemplo bien conocido es el adelantamiento del viraje en las pólvoras con elevadas concentraciones de nitroglicerina (p.ej. >35 %w NG del grupo 105). Es, por todo ello, que las pruebas clásicas están siendo sustituidas o, en el mejor de los casos, sus resultados requieren del respaldo de técnicas cromatográficas, aunque estas técnicas de separación tengan una muy dificil implantación en polvorines, santabárbaras y laboratorios de desplegados en zonas de operaciones.

1.4. Estudios de Will sobre la estabilidad de la NC

Los estudios originales de Will [12] se basaron en mantener NC, altamente nitrada (≈13 %N), sumergida en agua a ebullición con objeto de estabilizar su comportamiento por eliminación de las moléculas de $NO_{2\,(g)}$ acumuladas entre las fibras de la NC. Posteriormente, muestras procedentes de estas nitrocelulosas, fueron sometidas a tests de estabilidad a través de la cuantificación del nitrógeno perdido por la pólvora, función del tiempo de calentamiento ($\Delta n/\Delta t$), en condiciones isotermas (134.5ºC). Este estudio concluyó aseverando, entre otros aspectos, que las pólvoras eran más inestables cuanto más nitrógeno emitieran [13], ver Figura 3.

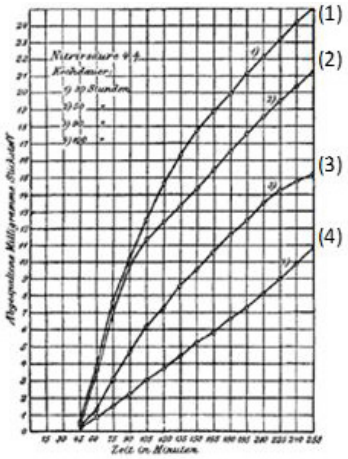


Figura 3. Estudio de Will [12]: el orden de menor (1) a mayor (4) estabilidad de las NC se establece en función de la cantidad de nitrógeno emitido.

2. Experimental

La valoración del equipamiento propuesto se ha realizado acelerando la descomposición, en condiciones isocóricas (50 ml) e isotérmicas (134ºC), de dos pólvoras de doble base del grupo 103 (NG < 30 %w). La medida de los gases emitidos por las pólvoras se realiza mediante el equipo, de diseño propio y ad-hoc, denominado Azotic v1.0 (ver Figura 4). Este equipo se ha construido con dos semiconductores quimioresistivos de SnO_2 [14] y un sensor de presión, además de la necesaria electrónica de control y registro. Esta nueva instrumentación permite obtener medidas cuantitativas de la concentración de los gases durante todo el ensayo, determinándose, principalmente, la concentración de NO_2 mediante métodos multivariantes [15].

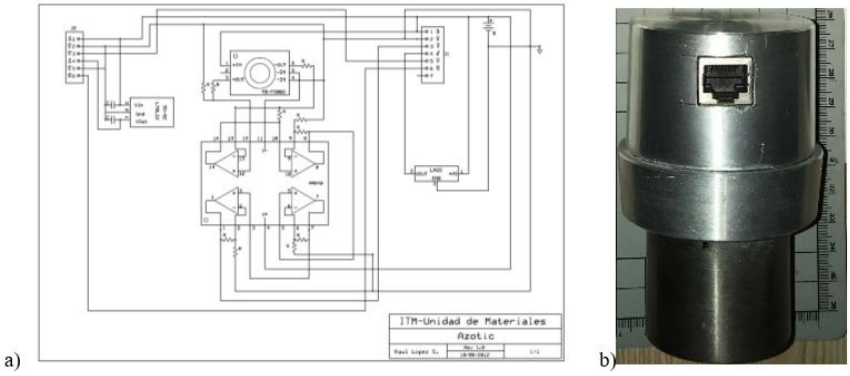


Figura 4. a) Esquema básico de la electrónica del Azotic, b) prototipo v1.0.

3. Resultados y discusión

Los resultados de los ensayos de estabilidad, obtenidos con el Azotic v1.0, pueden observarse en la Figura 5a), con una señal de 0 a 5 voltios, proporcional a la concentración de NO_2 y cuya calibración entraña cierta complejidad [16]. El tiempo de viraje, t_{viraje}, del papel indicador para las mismas condiciones de ensayo, se encuentra sobreimpreso y puede ser relacionado con la integral de la señal del Azotic v1.0. Es fácil constatar la escasa sensibilidad del método clásico (integral), incapaz de distinguir pólvoras con comportamientos similares, observándose que las muestras analizadas difieren menos de un 5 % de por este método, ver Tabla 2. Además, deben tenerse en cuenta dificultades adicionales como son las relacionadas con la necesaria pericia del analista para determinar cambios ligeros de coloración.

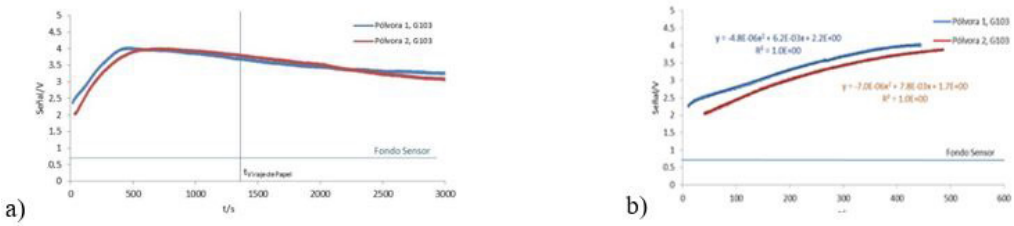


Figura 5. Ensayo de estabilidad sobre dos pólvoras G103, a) ensayo completo, b) primera rama.

Tabla 2. Área integrada del ensayo de estabilidad.

	Área $_{(0<t<1400s)}$ *V·s*
Pólvora 1	$9.7 \cdot 10^3$
Pólvora 2	$9.3 \cdot 10^3$

Sin embargo, en base a los resultados del estudio de Will, ver Figura 3, se puede deducir que el estado de estabilidad de una pólvora bien podría determinarse mediante la cuantificación del radio de curvatura, ρ(t) (inversa de la curvatura, χ(t), ver Ecuación 2) en el primer tramo. Los resultados recogidos por la bibliografía (Figura 3) han podido ser reproducidos con el Azotic v1.0 y el análisis de los datos experimentales han mostrado un buen ajuste a una función cuadrática facilitándose, de esta forma, la determinación de la curvatura en el primer tramo del ensayo, relacionado con la emisión del NO_2 retenido en la estructura fibrosa de la NC.

$$\rho^{-1}(t) = \chi(t) = \frac{f''(t)}{\left(1 + \left(f'(t)\right)^2\right)^{3/2}} \therefore \rho(t) = \frac{\left(1 + \left(f'(t)\right)^2\right)^{3/2}}{f''(t)} \tag{4}$$

La estabilidad en la determinación del radio de curvatura, ρ(t), medido con el Azotic, para este primer tramo del ensayo de estabilidad, se puede observar en la Figura 6, donde ρ(t) varía en menos de un uno por diez mil ($u_{t=2} < 1^0/_{000} \cdot \rho$) en el ramo considerado, lo que unido a diferencias significativas en el radio de curvatura para dos muestras analizadas (>40%), permite considerar a este método como altamente estable y sensible. Así pues, dos pólvoras que son indistinguibles por el método clásico (< 5%) presentan diferencias significativas desde el punto de vista estadístico, ver Figura 6, asumiendo la premisa del estudio de Will [12] en el que un mayor radio de curvatura se correspondería con una mayor estabilidad de la pólvora.

Tabla 3. Radio medio de curvatura para las dos pólvoras, del G103, analizadas

	$\bar{\rho}$ (V,s)
Pólvora 1	$1.0 \cdot 10^5$
Pólvora 2	$7.1 \cdot 10^4$

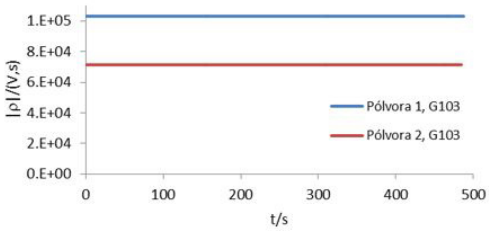


Figura 6. Estabilidad del radio de curvatura en todo el primer tramo para las dos pólvoras.

La validación de los resultados presentados en el presente artículo, requerirá de un estudio más profundo que utilice pólvoras en diferentes estados de envejecimiento y con diferentes composiciones.

4. Resumen y conclusiones

Se ha presentado una actualización de la instrumentalización para un ensayo de estabilidad de pólvoras a alta temperatura (*test* de Will) mediante el diseño, y fabricación, de un nuevo equipo denominado Azotic v1.0, el cual mantiene una metodología de uso similar a la de los ensayos clásicos, con objeto de facilitar su aplicación en polvorines. Es posible que esta técnica acabe presentando capacidad para desplazar al papel indicador

como base de los ensayos de estabilidad. Además, se ha presentado una metodología alternativa, y novedosa, para la interpretación de los resultados del ensayo, utilizando las ventajas que ofrecen los equipamientos electrónicos por comparación con los ensayos clásicos.

El funcionamiento del Azotic v1.0 se ha validado frente a dos pólvoras de doble base (grupo 103), y los resultados han mostrado la capacidad para reproducir el resultado del ensayo clásico, si se desea. Sin embargo, utilizando la nueva metodología, se ha observado un incremento relevante de la estabilidad, sensibilidad y fiabilidad de los resultados.

Finalmente, se ha comprobado que dos pólvoras, indistinguibles mediante el *test* clásico, han podido ser fácilmente diferenciados con el nuevo método de ensayo, sin que ello acarree un incremento en la complejidad experimental del ensayo.

Agradecimientos

Se agradece al Área de Materiales Energéticos del Departamento de NBQyM, en la Subdirección de Sistemas Terrestres del INTA, el uso de las instalaciones y el acceso a las muestras. De igual forma, se expresa un especial agradecimiento al Departamento de Química Analítica de la UVa por su constante apoyo, tutela y asesoramiento científico.

Referencias

1. T. L.Davis, The Chemistry of Powder and Explosives, Angriff Press, 1992.
2. R. R. a. S. S. Napper, «The evolution of nitrogen peroxide in the decomposition of guncotton,» *Journal of the Chemical Society, Transactions,* vol. 91, pp. 764-786, 1907.
3. J. F. Higgins, Energy of activation of the decomposition of cellulose nitrate by an effusion process, Monterey, California: Master of Science from United States Naval Postgraduate School, 1962.
4. L. Druet y M. Asselin, «A Review of Stability Tests Methods for Gun and Mortar Propellants, I: The Chemistry of Propellant Ageing,» *Journal of Energetic Materials,* vol. 6, nº 1-2, pp. 27-43, 1988.
5. J. Cañas, «La tragedia del polvorín de Cádiz que devastó la ciudad,» *El País,* p. https://elpais.com/elpais/2018/08/17/actualidad/1534519146_031957.html, 18 Agosto 2018.
6. Koehler y Marqueyrol, *Mémorial des poudres,* vol. 18, pp. 101-106, 1921.
7. V. Kucera y B. Vetlicky, «Investigation of the Decomposition Processes in Single-Base Propellants under Vacuum using a Minicomputer-Controlled Automated Apparatus,» *Propellants, Explosives, Pyrotechnics,* vol. 10, nº 3, pp. 65-68, 1985.

8. NATO, «AOP 48: Explosives, Nitrocellulose Based Propellants, Stability Test Proecedures and Requirements using Stabilizer Depletion,» Nato Standarization Agency (NSA), 3 October 2008.
9. NATO, STANAG 4178: Test Procedures for Assessing the Quality of Deliveries of Nitrocellulose from one NATO Nation to Another, Nato Standarization Agency (NSA).
10. J. Reilly, Explosives, Matches, and Fireworks, Gurney and Jackson, 1938.
11. NATO, STANAG 4556: Explosives: Vacuum Stability Test, NATO Standarization Organization (NSO), 22-11-1999.
12. V. W. Will., «Untersuchungen über die Stabilität von Nitrocellulose,» *Zeitschrift für angewandte Chemie,* vol. 30, pp. 743-753, 1901.
13. T. Urbanski, Chemistry and Technology of Explosives (vol II), Warszawa: Pergamon Press, 1965.
14. S. Das, V. Jayaraman, «SnO_2: A comprehensive review on structures and gas sensors, » *Progress in Materials Science,* vol. 66, pp. 112-255, 2014.
15. R. López, D. Pellico, R. Díez, L. Debán y R. Pardo, «Narices electrónicas para la detección de explosivos caseros,» *V Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad,* nº DESEID-2017-012, p. 245, 2017.
16. R. Castellanos, «Detección de gases NOx mediante sensores MOx - Posibilidades de aplicación y desarrollo en equipos e-nose para la detección y caracterización de sustancias explosivas», Trabajo Fin de Grado en Química de la Universidad de Valladolid. 2017.

Detección de agentes de guerra química en fase gas mediante tecnología Raman-SERS

Lafuente, Marta[1,2], Almazán, Fernando[1,2], Bernad, Eduardo[1,2], Rodrigo, Sergio G[2,3], Urbiztondo, Miguel[3], Santamaría, Jesús[1,2], Mallada, Reyes[1,2], Pina, María Pilar[1,2,*]

[1] Instituto de Nanociencia de Aragón (INA). Universidad de Zaragoza. c/Mariano Esquillor s/n, 50013. Zaragoza. martalaf@unizar.es (ML); feralm@unizar.es (FA); 701819@unizar.es (EB); jesus.santamaria@unizar.es (JS); rmallada@unizar.es (RM).

[2] Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA), Universidad de Zaragoza-CSIC, 50009 Zaragoza, Spain.

[3] Centro Universitario de Defensa (CUD) de Zaragoza. Academia General Militar (AGM). Ctra. de Huesca s/n, 50090. Zaragoza. sergut@unizar.es (SGR); urbiz@unizar.es (MU).

* Autor principal y responsable del trabajo: mapina@unizar.es (MPP).

Resumen: En este trabajo se describen las diferentes plataformas Raman-SERS desarrolladas en nuestro laboratorio de investigación para la detección e identificación de compuestos organofosforados a concentraciones de partes por billón en volumen. Los criterios de diseño y selección de estas plataformas son: respuesta ultrasensible, robusta y rápida, fabricación escalable y reproducible, miniaturización, bajo coste y sencillez de manejo. Estas características se alinean con los requerimientos de las herramientas que necesitan las unidades de intervención NRBQ para identificación, detección y monitorización de tóxicos industriales y agentes de guerra química en condiciones de campo. Los ensayos de laboratorio realizados con el simulante de la serie G de agentes nerviosos se han realizado en condiciones similares a las previstas ante una amenaza de riesgo químico en un espacio confinado; es decir, concentraciones del organofosforado a niveles traza en fase gas e instrumento Raman portable.

Palabras clave: agentes neurotóxicos, fase gas, detección, tecnología Raman-SERS, equipamiento para unidades NRBQ

1. Introducción

a) La Amenaza NRBQ en la actualidad

Aunque los grupos terroristas no han utilizado agentes NRBQ (Nucleares, Radiológicos, Biológicos y Químicos) en Europa, su potencial uso ocupa un lugar destacado en la propaganda terrorista, compartiendo en varias plataformas de redes sociales posibles

tácticas para ataques y objetivos, desde la liberación de sulfuro de hidrógeno (veneno de amplio espectro) hasta el uso de sistemas aéreos no tripulados para llevar a cabo ataques con explosivos. A medida que las organizaciones terroristas tratan continuamente de actualizar sus técnicas y modus operandi, la respuesta de los cuerpos de seguridad y defensa de los estados miembros ha der ser igualmente innovadora, aprovechar la tecnología y combinar la experiencia para detectar y mitigar las amenazas emergentes. La protección de la seguridad de los ciudadanos es una prioridad extrema para la UE según su Declaración conjunta sobre las prioridades legislativas de la UE para 2018-19 [1]. El terrorismo sigue siendo la segunda preocupación principal de los ciudadanos (con el 20% de las menciones), justo después del desafío de la migración, donde la gente espera soluciones de la UE [2]. Proteger a los ciudadanos e infraestructuras y reducir la vulnerabilidad de la sociedad en general a los ataques NRBQ es la segunda prioridad marcada por la Agenda Europea de Seguridad en su Plan de Acción [3]. En la adopción de cualquier medida para hacer frente a un ataque NRBQ, ya sea en la fase de evaluación, prevención, preparación, respuesta o recuperación, es crucial poder detectar y, si es posible, identificar el tipo de amenaza o compuesto químico/biológico. En este contexto se centra nuestro trabajo, que persigue el desarrollo de una herramienta sencilla, ligera, rápida y de bajo coste basada en la técnica Raman-SERS para la detección e identificación inequívoca de compuestos tóxicos industriales y agentes de guerra química en condiciones de campo.

b) Agentes de Guerra Química y Posibles Escenarios

Los agentes químicos de guerra se clasifican según sus efectos en el cuerpo humano, siendo los agentes nerviosos los más tóxicos de todos los que se conocen, cientos de miles de veces más letales que los vesicantes, los agentes pulmonares o los venenosos que afectan a la sangre. De entre los agentes nerviosos, los pertenecientes a la serie G (ver **Tabla 1**) están diseñados para que actúen por inhalación dada su alta presión de vapor, la elevada densidad de sus vapores (superior a la del aire) y su persistencia.

Tabla 1. Volatilidad y Toxicidad de los principales agentes nerviosos de la serie G. AEGL2 (*Acute Exposure Guideline Level* 2): efectos adversos irreversibles, graves o de larga duración para la salud; o capacidad de huida disminuida. AEGL3: causa daños incompatibles con la vida y/o muerte.

Agente nervioso	**Presión de vapor (Pa) a 25ºC**	**Volatilidad (mg/m³) a 25ºC**	**AEGL2 (ppm [mg/m³])** [4]	**AEGL3 (ppm [mg/m³])** [4]
			10 min	**10 min**
Sarín (GB)	387	22.000	0,015 [0,087]	0,064 [0,38]
Tabún (GA)	9	600	0,013 [0,087]	0,110 [0,76]
Somán (GD)	53,3	3900	0,0057 [0,044]	0,049 [0,38]

De entre estos, el gas sarín (GB) es el agente químico más letal ya que aunque su toxicidad es inferior a la del Somán (GD) su volatilidad es 5 veces superior. El grupo de trabajo en detección de agentes químicos y biológicos en ambientes interiores de ERN-CIP (European Reference Network for Critical Infrastructure Protection) ha reconocido como ataque terrorista altamente probablemente la liberación de Sarín en una estación subterránea [5] (similar al atentado de Tokio en 1995). Por todo ello, este trabajo se ha enfocado en la identificación de un simulante de gas Sarín, metilfosfonato de dimetilo (DMMP), para demostrar la viabilidad de la técnica que proponemos.

c) Técnicas para detección de agentes químicos de interés para la comunidad de usuarios NRBQ

Según IFAFRI (International Forum to Advance First Responder Innovation), las unidades de intervención en caso de amenaza NRBQ, necesitan de herramientas y equipos tecnológicamente avanzados que sean asequibles e innovadores para identificar, detectar y analizar rápidamente amenazas y peligros en campo [6]. Actualmente, las distintas técnicas para la detección de agentes químicos se desvían en mayor o menor medida de la idealidad cuando se analizan conjuntamente los siguientes factores: tamaño, coste, sensibilidad, velocidad de respuesta, especificidad, precisión, reversibilidad y reutilización. De entre ellas, la espectrometría de movilidad iónica (IMS) es actualmente la tecnología líder, existiendo equipos comerciales (ChemPro 100 de Environics Oy; SABRE 5000 de smiths detection; GDA-FR de Air Sense Analytics;) adaptados a las necesidades de la comunidad NRBQ. Sin embargo, la identificación de mezclas complejas sigue siendo un desafío y particularmente la detección de agentes nerviosos en fase gas a nivel de partes por billón, ya que la tasa de falsas alarmas es muy elevada. Además, el uso de fuentes radiactivas para la ionización de la muestra impone rutinas de mantenimiento específicas y de alto coste.

d) Espectroscopía Raman-SERS

La espectroscopía Raman es ampliamente conocida por su especificidad para el análisis químico, ya que nos proporciona la huella vibracional característica de los enlaces de la molécula investigada. La disponibilidad comercial de espectrómetros Raman portables a partir de 15-20 k€ ha contribuido notablemente a la adopción de esta técnica por parte de los cuerpos de seguridad y defensa para el análisis de sustancias sólidas o líquidas (explosivos, narcóticos, sustancias ilícitas…). La baja intensidad de la respuesta Raman, tan solo 1 de cada 10^6 fotones incidentes son dispersados inelásticamente (**Figura 1a**), se solventa utilizando SERS (Surface Enhanced Raman Spectroscopy).

En SERS, la amplificación de la respuesta Raman se debe principalmente a la intensificación local del campo electromagnético como consecuencia de la resonancia del

plasmón de superficie de nano-estructuras metálicas (**Figura 1b**) bajo la excitación con un láser de longitud de onda adecuada. El efecto SERS depende de varios parámetros, entre los que destacan: la composición, el tamaño, la morfología, la topología y el entorno dieléctrico de la superficie metálica nano-estructurada.

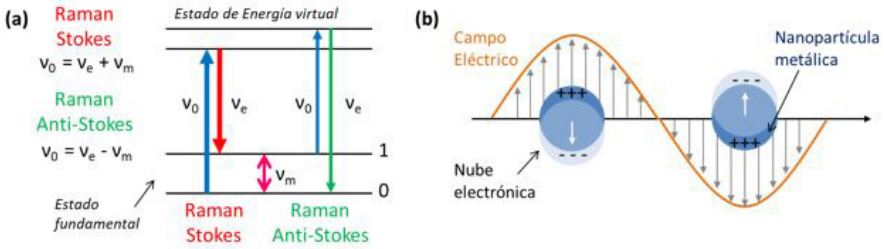


Figura 1. (a) Dispersión de la luz en Raman-Stokes y Raman anti-Stokes. (b) Esquema del plasmón de superficie en las proximidades de superficies metálicas; adaptada de [7].

Los metales que presentan las propiedades ópticas adecuadas para generar tales intensificaciones, son principalmente la plata, el oro y el cobre, siendo los dos primeros los que alcanzan una mayor intensificación y lo más aplicados en SERS. Una de las estructuras más utilizadas son nanopartículas (NPs) metálicas donde las dimensiones, forma y arreglo de las mismas sobre el sustrato juegan un papel muy importante. Así, los recubrimientos con estas NPs han de proporcionar un máximo en la absorción de la luz, plasmón de resonancia, lo más cercano posible a la longitud de onda de excitación del instrumento Raman para que se produzca el efecto SERS sobre las moléculas diana presentes en la superficie. En su ordenación, el espaciado entre NPs también contribuye al aumento de la señal. El campo electromagnético generado en una NP individual puede entrar en interferencia coherente con el de NPs adyacentes cuando las distancias entre las mismas son inferiores a 10 nm [8]. Pero, por encima de todo, es necesario que las moléculas diana interaccionen con la superficie metálica, y es aquí donde los fenómenos clásicos de fisisorción y quimisorción adquieren importancia. La optimización de estos parámetros, junto con el desarrollo de metodologías reproducibles, escalables y de bajo costo para la preparación de sustratos SERS homogéneos, es un campo de indiscutible interés para la comunidad científica.

Hoy en día, la espectroscopía Raman-SERS se ha consolidado como una herramienta analítica ultrasensible para la detección directa e identificación de una amplia variedad de especies químicas, entre ellos explosivos y agentes de guerra química [9] [10], con la particularidad de permitir una detección múltiple con un sola medida. Este trabajo pretende contribuir al estado del arte en el campo menos explorado como es la detección en fase gas a condiciones relevantes, es decir, partes por billón de agentes nerviosos.

2. Materiales y métodos

La molécula diana utilizada en los experimentos es el metilfosfonato de dimetilo (DMMP), simulante de la serie G de agentes nerviosos, cuya producción y almacenaje están prohibidas por la convección sobre las Armas Químicas [11]. El DMMP difiere principalmente de estos en la ausencia del enlace C-F, responsable de la toxicidad de los mismos (**Figura 2**).

Figura 2. Estructura del gas Sarín (izda) y del simulante metilfosfonato de dimetilo utilizado en este trabajo.

Cabe destacar que en la bibliografía científica actual, apenas aparecen artículos que usen Raman-SERS para detectar DMMP en el aire [10,12,13] dada la dificultad añadida que representa la necesaria co-localización de las moléculas diana presentes en una fase gas altamente diluida y los centros activos del sustrato SERS donde se amplifica la intensidad de campo electromagnético.

a) Sistema experimental para medir DMMP en fase gas

Los espectros SERS de la molécula de DMMP fueron medidos con dos equipos Raman. En primer lugar, se midieron con un equipo de sobremesa Alpha 300 Raman spectrometer de WITec que combina la alta eficiencia del detector Raman con un microscopio confocal de alta resolución (2cm^{-1}) (**Figura 3a**). Después se midieron con un equipo Raman portable BWTEK i-Raman pro system (resolución 6 cm^{-1}) para conocer las capacidades de detección con sistemas reales de campo.

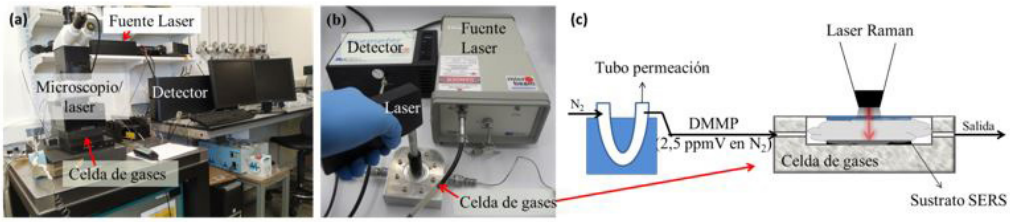


Figura 3. Fotografías de los equipos Raman usados en este trabajo: (a) equipo de sobremesa y (b) equipo portable. (c) Esquema del sistema experimental usado en la detección de DMMP en fase gas. Imagen adaptada de [14].

Para medir DMMP en fase gas el sustrato SERS se monta dentro de una celda de gases *ad hoc* ($2{,}7x10^{-2}$ cm^3) a 90º con respecto a la fuente de excitación, laser de 785nm en ambos equipos. El DMMP se alimenta a la celda de gases arrastrado por una corriente de inerte (10 mL/min). Los espectros se recogieron a temperatura ambiente y sin dejar tiempo de estabilización del gas dentro de la celda. Los vapores de DMMP, 2,5 ppmV (14 mg/m^3), se generan mediante un tubo de permeación calibrado (MT-PD-Experimental 107-100-7845-HE3-C50, 126,78 ng/min ± 4,81 ng/min a 80ºC).

b) Sustratos SERS: nanopartículas y nanoestructuras metálicas

La primera plataforma SERS se basa en una monocapa de nanopartículas de oro recubiertas de citrato (AuNP, 22 nm de diámetro, **Figura 4a**) sobre un espejo de plata evaporado en estructuras fractales en 3 dimensiones (**Figura 4b**) [13]. Los fractales-3D de silicio fueron microfabricados mediante *corner-lithography* y un ataque químico anisotrópico. Las nanopartículas de oro se depositaron mediante autoensamblaje usando como intermediario un polímero catiónico.

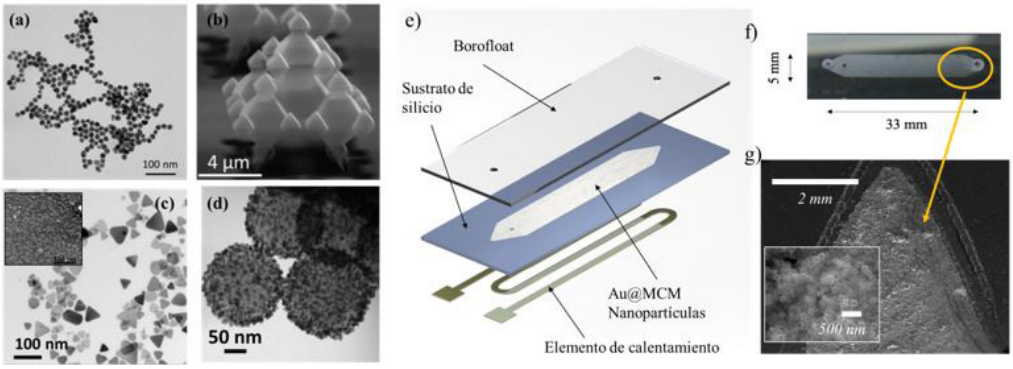


Figura 4. (a-c) Imágenes TEM de las nanopartículas sintetizadas: (a) AuNP; (c) AgPlates; (d) Au@MCM48. Imágenes SEM insertadas de los sustratos SERS finales: (b) fractales 3D recubiertos de plata evaporada; (c) AgPlates sobre grafito y (g) Au@MCM48 sobre microchip de silicio. (e) Esquema del microchip usado como plataforma SERS con Au@MCM48 y (f) imagen real del microchip una vez terminado (adaptada de [15]).

La segunda aproximación consistió en la utilización de nanotriángulos de plata (AgPlates) sobre un sustrato comercial de grafito (**Figura 4c**) [14]. Los AgPlates fueron sintetizados por vía húmeda y con un tamaño en torno a 38 nm de arista y depositados de modo similar a AuNPs. El grafito introduce importantes beneficios en términos de coste, versatilidad y flexibilidad, reducción de la fotodescomposición y quencheo de la fluorescencia.

En la tercera plataforma sensible se han combinado las propiedades de adsorción de una sílice mesoporosa con las propiedades plasmónicas del oro [15]. Para ello, se an-

claron semillas de oro, y posteriormente se recrecieron (hasta 15nm), sobre la superficie de nanopartículas de sílice (180nm) para obtener Au@MCM48 (**Figura 4d**). Las nanopartículas Au@MCM48 fueron depositadas mediante *spin-coating* en microchips de silicio estancos en los que se alimentan los vapores de DMMP de manera continua (**Figura 4g**). Estos microchips fueron diseñados y fabricados *ad hoc* siguiendo un proceso de grabado húmedo del silicio y su posterior sellado con un vidrio transparente, **Figura 4e-f** [16], lo que asegura la estanqueidad y el flujo continuo de la corriente portadora. Esta aproximación permite la pre-concentración (gracias a la sílice porosa) y la detección Raman SERS (gracias a las NPs de Au) en una sola unidad.

3. Resultados y discusión

La molécula de DMMP tiene varios enlaces activos en espectroscopía vibracional Raman, proporcionando un espectro SERS con múltiples picos (**Figura 5** espectro negro): el más intenso e importante es el desplazado a 715 cm^{-1} (banda a en la **Figura 5**), y que representa el enlace P-C de la molécula, 794 y 825 cm^{-1} (bandas b y c) del enlace P-O_2, 1033 y 1059 cm^{-1} (bandas d y e) del enlace C-O, y 1243 cm^{-1} (banda f) que representa el enlace P=O.

En primer lugar, se caracterizó la actividad SERS en la detección de 2,5 ppmV de DMMP de las tres plataformas desarrolladas con el equipo de sobremesa de mayor resolución (**Figura 5a**). Los fractales 3D, gracias a la amplificación del campo en sus vértices, fueron capaces de identificar dos modos vibracionales de la molécula DMMP (bandas a y b). Por otra parte, la mayor actividad SERS de la plata, junto con la interacción directa entre el sustrato basado en AgPlates y la molécula de DMMP, permitieron un mayor aumento de la señal. Las consecuencias de esta interacción fueron la obtención de una

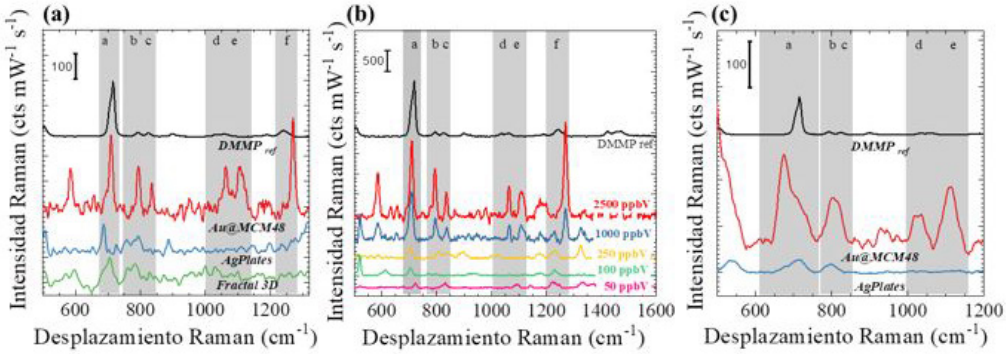


Figura 5. (a) Espectros SERS del DMMP (2,5 ppmV) obtenido con el equipo Raman de sobremesa sobre: fractales 3D (verde); AgPlates (azul) y Au@MCM48 (rojo). (b) Respuesta SERS de Au@MCM48 en función de la concentración en la fas gas de DMMP: 2500, 1000 250, 100 y 50 ppbV. (c) Espectros SERS del DMMP (2,5 ppmV) obtenido con el equipo Raman portable sobre AgPlates y Au@MCM48. En negro espectro de referencia de DMMP puro medido en fase líquida y multiplicado por un factor de 100.

huella más clara y completa del DMMP (bandas a, b y c) manteniendo la sensibilidad y reproducibilidad de la anterior. Por último, gracias a las propiedades de adsorción de la sílice mesoporosa (1200 m^2/g de superficie específica) la plataforma Au@MCM48 fue capaz de detectar la huella completa del DMMP (bandas a-f). Los ligeros desplazamientos de los picos con respecto a la molécula de DMMP en estado puro/líquido se deben a las diferentes interacciones entre la molécula y los sustratos metálicos. Este comportamiento ya ha sido descrito en la literatura para DMMP y ligandos orgánicos [10].

Tras este primer estudio, se seleccionaron las plataformas basadas en AgPlates y Au@MCM48 para desarrollar los estudios de detección de gases tóxicos en condiciones de campo, para lo que se utilizó un equipo Raman portable. La **Figura 5c** muestra los espectros SERS de DMMP para una concentración de DMMP de 2,5 ppmV sobre ambos sustratos. El tiempo de respuesta ($t_{50\%}$) de ambos sistemas fue inferior a 2 minutos. Si comparamos los espectros, podemos afirmar que la huella espectral obtenida para el DMMP con la plataforma SERS Au@MCM48 es más clara y completa, y permite su identificación a esas concentraciones, incluso utilizando un equipo comercial portable de resolución limitada. Además, la plataforma Au@MCM48 tiene la capacidad de regenerarse por desorción térmica a 200ºC de las moléculas de DMMP adsorbidas en la superficie, para su posterior uso. La **Figura 5b** nos muestra la actividad SERS del sustrato Au@MCM48 en función de la concentración de DMMP: 2500 ppbV, 1000 ppmV, 250 ppbV, 100 ppbV y 50 ppbV; con el fin de evaluar el límite de detección. En todos los casos, se observa claramente la huella del DMMP, por lo que nuestro sustrato podría utilizarse para cuantificar DMMP en fase gas con un límite de detección experimental de 0,28 mg/m^3 (50 ppbV), concentración 50 veces inferior a la reportada en la literatura mediante esta técnica. De acuerdo a los valores de AEGL3-10 min de 0,38 mg/m^3 (**Tabla 1)** y AEGL3-30 min de 0,19 mg/m^3 [4], las unidades NRBQ equipadas con esta herramienta dispondrían de un tiempo de actuación para evacuar a víctimas en zona caliente de entre 10-30 minutos.

4. Conclusiones

En este trabajo se rescata una técnica de principios de siglo XX con el empuje del efecto SERS, y la sitúa en la vanguardia de las publicaciones científicas más recientes. Pero este trabajo no sólo representa una contribución científica, sino que, además, busca aportar una solución para cubrir algunas de las necesidades claramente manifiestas de las unidades NRBQ ante las amenazas de posibles ataques con agentes de guerra química.

Las tres plataformas SERS desarrolladas permiten detectar DMMP en fase gas en condiciones estándar, 2,5 ppmV. De entre ellas, la plataforma Au@MCM48, gracias a la combinación sinérgica de las propiedades de adsorción de sílice mesoporosa (núcleo de

la nanoestructura) con las propiedades plasmónicas de las nanopartículas de oro (carcasa de la nanoestructura), es la única que satisface los criterios para su aplicación en campo. Esta plataforma SERS permite la detección de 50 ppbV del organofosforado con un tiempo de respuesta inferior a 2 minutos. Los ensayos preliminares realizados con un instrumento Raman portable disponible comercialmente auguran un futuro muy prometedor en la adopción de esta tecnología como herramienta rutinaria por las unidades NRBQ.

Agradecimientos

Agradecer la financiación recibida del MICINN a través de los proyectos: CTQ2013-49068-C2-1-R y CTQ2016-79419-R; y de la UE a través del proyecto H2020-MSCA-RISE-2018-823895.

Referencias

1. United Nations, Joint Declaration, (2004) 5–6. https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/joint-declaration-eu-legislative-priorities-2018-19_en.pdf.
2. Standard Eurobarometer 90 - Autumn 2018 «Public opinion in the European Union, First results,» (n.d.). https://ec.europa.eu/commfrontoffice/publicopinion/index.cfm.
3. European Commission, Action Plan to enhance preparedness against chemical, biological, radiological and nuclear security risk, Com. 18 (2017) 16. https://ec.europa.eu/home-affairs/sites/homeaffairs/files/what-we-do/policies/european-agenda-security/20171018_action_plan_to_enhance_preparedness_against_chemical_biological_radiological_and_nuclear_security_risks_en.pdf.
4. Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals, (2019). https://www.epa.gov/aegl.
5. P. Gattinesi, European Reference Network for Critical Infrastructure Protection ERN-CIP handbook 2018 edition., 2018. doi:10.2760/245080.
6. The International Forum to Advance First Responder Innovation. Capability Gap 3 «Deep Dive» Analysis Synopsis, (2018). https://www.internationalresponderforum.org/sites/default/files/1ckfrer4m_16447_0_0.pdf.
7. K.A. Willets, R.P. Van Duyne, Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing, Annu. Rev. Phys. Chem. 58 (2006) 267–297. doi:10.1146/annurev.physchem.58.032806.104607.
8. P.L. Stiles, J.A. Dieringer, N.C. Shah, R.P. Van Duyne, Surface-enhanced Raman spectroscopy, Annu. Rev. Anal. Chem. 1 (2008) 601–626. doi:10.1146/annurev.anchem.1.031207.112814.

9. A. Hakonen, P.O. Andersson, M. Stenbæk Schmidt, T. Rindzevicius, M. Käll, Explosive and chemical threat detection by surface-enhanced Raman scattering: A review, Anal. Chim. Acta. 893 (2015) 1–13. doi:10.1016/j.aca.2015.04.010.
10. M. Lafuente, I. Pellejero, V. Sebastián, M.A. Urbiztondo, R. Mallada, M.P. Pina, J. Santamaría, Highly sensitive SERS quantification of organophosphorous chemical warfare agents: A major step towards the real time sensing in the gas phase, Sensors Actuators, B Chem. 267 (2018). doi:10.1016/j.snb.2018.04.058.
11. Convención sobre las Armas Químicas, (2019). https://www.opcw.org/es/convencion-sobre-las-armas-quimicas.
12. N. Taranenko, J.-P. Alarie, D.L. Stokes, T. Vo-Dinh, Surface-Enhanced Raman Detection of Nerve Agent Simulant (DMMP and DIMP) Vapor on Electrochemically Prepared Silver Oxide Substrates, J. Raman Spectrosc. 27 (1996) 379–384. doi:10.1002/(SICI)1097-4555(199605)27:5<379::AID-JRS925>3.0.CO;2-G.
13. M. Lafuente, E.J.W. Berenschot, R.M. Tiggelaar, R. Mallada, N.R. Tas, M.P. Pina, 3D fractals as SERS active platforms: Preparation and evaluation for gas phase detection of G-nerve agents, Micromachines. 9 (2018). doi:10.3390/mi9020060.
14. M. Lafuente, D. Sanz, M.A. Urbiztondo, J. Santamaría, M.P. Pina, R. Mallada, Gas phase detection of Chemical Warfare Agents CWAs with portable Raman, Submitted. (2019).
15. M. Lafuente, F. Almazán, E. Bernad, M.A. Urbiztondo, SERS detection of neurotoxic agents in gas phase using microfluidic chips containing gold-mesoporous silica as plasmonic-sorbent., Transducers 2019 - EUROSENSORS XXXIII. IEEE. (2019) 1313–1316.
16. F. Almazán, I. Pellejero, A. Morales, M.A. Urbiztondo, J. Sesé, M.P. Pina, J. Santamaría, Zeolite based microconcentrators for volatile organic compounds sensing at trace-level: fabrication and performance, J. Micromechanics Microengineering. 26 (2016) 084010. doi:10.1088/0960-1317/26/8/084010.

Satélites Definidos por Software, aplicación para defensa y seguridad y resultados en órbita

Nodar López, Diego[1,*], Nercellas Ventas, Aarón[1], González Muiño, Alberto[1], Lamelas Nogueira, Guillermo[1], Vázquez García, Antonio[1], Aguado Agelet, Fernando[2], Hurtado de Mendoza Pombo, Diego[1] y Ferndández-Arruti García, Bibiano[1]

[1] Alén Space, info@alen.space.

[2] Universidad de Vigo, fernando.aguado@space.uvigo.es.

* Autor principal y responsable del trabajo: info@alen.space (DNL).

Resumen: TOTEM es una Radio Definida por Software (SDR) para nanosatélites desarrollada por Alén Space. Esta radio puede actuar tanto como carga útil de comunicaciones para diferentes aplicaciones, como radio principal del satélite (TTC) así como ordenador de abordo (OBC) del mismo y, dada su arquitectura flexible, puede implementar muchas de estas aplicaciones en un único dispositivo, reduciendo el espacio y la potencia requerida. Además, permite la actualización y la carga de nuevas aplicaciones una vez está el satélite en órbita.

Esta tecnología habilita un nuevo tipo de satélites, los satélites definidos por software, aquellos que están compuestos por un hardware de propósito general, tal como varias radios SDR y antenas multibanda, y cuya funcionalidad viene determinada únicamente por el software cargado, lo cual es perfectamente actualizable desde tierra una vez se encuentran los satélites en órbita. Una constelación de nanosatélites de este tipo permitirá a gobiernos desplegar nuevas soluciones de defensa y seguridad y actualizar las existentes de una manera más ágil y eficiente, sin tener que cambiar la infraestructura ya existente en órbita y únicamente actualizándola y configurándola adecuadamente.

Un primer caso de este tipo de satélites es la misión de la Universidad de Vigo LUME-I, un nanosatélite lanzado en Diciembre de 2018 dentro del proyecto FIRE-RS para la detección de incendios forestales. En este caso la radio TOTEM embarcada a bordo de este satélite implementa una carga de pago de un sistema de comunicación M2M/IoT, un receptor ADS-B para la localización de aeronaves, una carga de pago de monitorización de espectro radioeléctrico que puede ser utilizado para SIGINT y un transmisor de alta tasa en banda S. Todo ello ejecutándose en un único dispositivo utilizando distintas antenas. Se presentarán los resultados de la operación de cada aplicación así como el desempeño general en órbita de la radio TOTEM.

Palabras clave: Nanosatélites, SDR, Satélites definidos por software, constelación, Lume-1, CubeSat.

1. Introducción

La Radio Definida por Software (SDR) es una tecnología que permite la definición de aplicaciones radio mediante software, gracias al soporte de un hardware genérico, suficientemente flexible para soportar distintos escenarios. La clave reside en la digitalización de las señales en recepción, para poder ser tratadas por una CPU/FPGA y, en el proceso inverso, convertir en señales analógicas las muestras procesadas digitalmente para su transmisión. La principal ventaja que ofrece el software es la reconfigurabilidad; el sistema puede cambiar la aplicación o aplicaciones que ejecuta y adaptarse a los nuevos requisitos con una actualización de software de manera remota. Ello habilita un nuevo paradigma en el sector espacial [1], que asiste a otra revolución tecnológica en los últimos años, conocida como «new space». Desde la aparición del estándar CubeSat, los nanosatélites han ido evolucionando a un ritmo vertiginoso, cada vez más capaces en el campo de la ciencia, la observación de la tierra y por supuesto, las comunicaciones.

La SDR se presenta por tanto como una tecnología extremadamente ventajosa para los pequeños satélites de comunicaciones, pues les ofrece la posibilidad de desarrollar distintas aplicaciones radio con una misma carga útil, reduciendo espacio y por tanto coste.

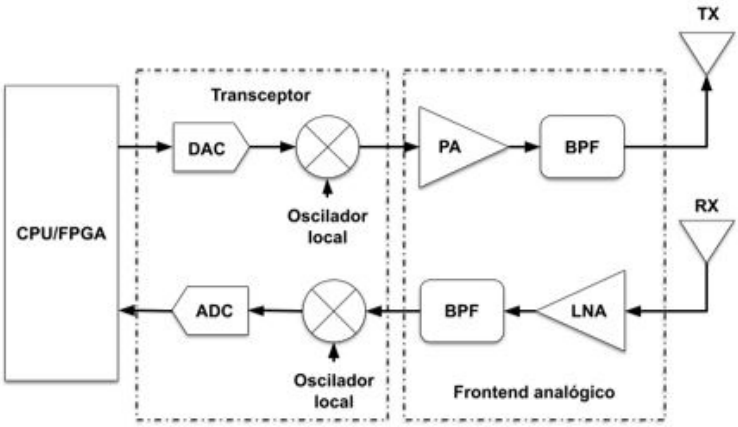


Figura 1. Arquitectura de un sistema SDR.

Análogo a esta idea nace el concepto de satélite definido por software: satélites que disponen de un hardware genérico, flexible y cuya aplicación está definida por el software que ejecutan no por los instrumentos específicos que llevan abordo y por lo tanto se pueden actualizar una vez están en órbita. Estos satélites son capaces de modificar y/o

adaptar la misión a nuevos requisitos incluso una vez han sido lanzado. A diferencia de los satélites de comunicaciones convencionales, que se diseñan, construyen y operan de acuerdo a los requisitos de una misión concreta, los satélites definidos por software constituyen una infraestructura espacial flexible y duradera, pues el fin o cambio de la misión principal no implica el fin o remplazo del segmento espacial. Mientras el satélite esté operativo se puede reconfigurar para ejecutar nuevas misiones, ya sea a largo plazo o bien de manera puntual para dar soporte a necesidades específicas, por ejemplo tras una catástrofe natural o una alerta de seguridad. Pero no solo eso, también pueden ofrecer distintos servicios en puntos diferentes de su órbita y por lo tanto ofrecer soluciones de manera simultánea sin necesidad de incluir un nuevo instrumento o payload por aplicación.

Además, estos pequeños satélites están pensados para operar en constelaciones, grupos de satélites coordinados. La constelación permite cubrir el planeta con los tiempos de revisita adecuados. Además, por su propia naturaleza una constelación es un sistema de alta resiliencia. La baja de uno o varios satélites, no alteraría la misión principal, pues es la constelación quien asume el servicio mientras los satélites dañados pueden ser rápidamente sustituidos gracias a los reducidos tiempos de desarrollo y puesta en órbita.

Una infraestructura de este tipo evita todos los inconvenientes en cuanto a despliegue, gestión y coste de las infraestructuras satelitales actuales y ofrece las ventajas de agilidad en puesta en producción de nuevos servicios, resiliencia y actualización continua. Sin embargo, para una gestión eficiente y para poder explotar todas las ventajas se necesita una infraestructura en tierra más flexible todavía capaz de operar a nivel global basándose igualmente en redes definidas por software [2].

2. TOTEM: SDR para pequeños satélites

TOTEM es una radio definida por software de altas prestaciones diseñada para pequeños satélites. Permite además instalar un frontend radio como una tarjeta añadida para dotarlo de total capacidad en las bandas de interés. El núcleo principal de TOTEM, está compuesto por un System-On-Chip (SOC), formado por un doble núcleo ARM y una FPGA, y un transceptor radio que cubre la banda de 70 MHz a 6GHz. Es en este núcleo donde se carga el sistema operativo (Linux embebido) y se hace todo el procesado de señal necesario para correr las aplicaciones. La FPGA se usa, entre otras cosas, para acelerar por hardware operaciones que además liberen de carga computacional a la CPU. Además, TOTEM cuenta con soporte para GNURadio [3], un paquete de software de código abierto ampliamente extendido para el desarrollo de aplicaciones de SDR de manera rápida y ágil.

Figura 2. TOTEM + UHF Frontend.

En el apartado de RF, cuenta con múltiples puertos de manera que pueden ser acoplados a distintos frontends y antenas de diferentes bandas, como UHF, banda L o banda S. Además TOTEM también ha sido diseñado para poder ser usado como OBC y TTC lo que le convierte en una plataforma muy flexible.

3. Lume-1: una misión definida por software

Lume-1 es un CubeSat de 2 unidades desarrollado en la Universidad de Vigo por los integrantes actuales de Alén Space dentro del proyecto europeo Fire-RS. Se trata de un consorcio entre la Universidad de Vigo, la Universidad de Porto y el Laboratorio de Análisis y Arquitectura de Sistemas (LAAS) situado en Toulouse. Este proyecto tiene como objetivo la detección temprana de incendios a través de sensores en tierra que envían una alarma geolocalizada al satélite usando comunicaciones máquina a máquina (M2M) en UHF a través de un modem desarrollado por Alén Space. Por su parte, Lume-1 embarca como carga útil la SDR de Alén Space, TOTEM, a través de la cual se ejecuta la aplicación de M2M/IoT para la retransmisión de alarmas de incendio. De manera complementaria, UAVs son usados en este proyecto para enviar más datos obtenidos in-situ al satélite además de recibir nuevos planes de vuelo para sobrevolar la zona.

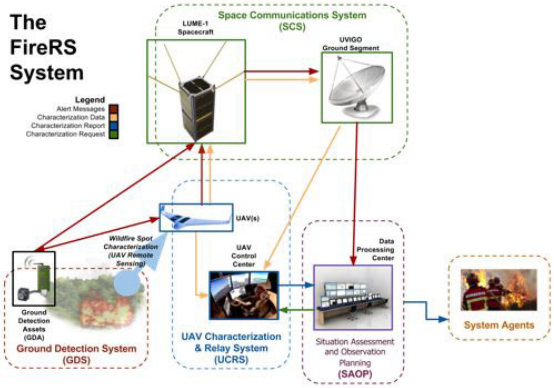


Figura 3. Arquitectura proyecto Fire-RS.

Para ello, Lume-1 cuenta con una antena tipo turnstile de UHF en su cara +Z. Se trata de una antena omnidireccional, compartida entre TOTEM y TTC. A pesar del reducido tamaño del satélite, este cuenta con dos antenas activas de parche situadas en su cara -Z y +Y operativas en banda L (1090 MHz) y banda S (2,4 GHz) respectivamente. De esta manera y gracias a TOTEM, el satélite puede operar en distintas bandas de frecuencia y ejecutar otras aplicaciones con la misma carga útil. Entre estas otras aplicaciones destacan la recepción de señales de ADS-B para monitorizar el tráfico aéreo a través de la antena de banda L, la descarga de datos de alta velocidad en banda S o la monitorización del espectro radioeléctrico en banda S y UHF.

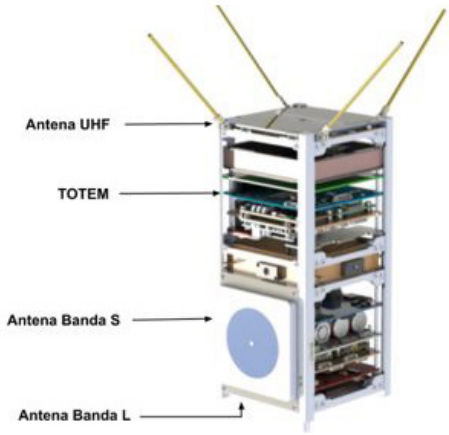


Figura 4. Configuración de Lume-1.

4. Resultados en órbita del satélite Lume-1

El satélite Lume-1 fue lanzado el 28 de diciembre a través del cohete Soyuz. Tras más de 8 meses de operación y casi 3500 órbitas a la tierra, se han efectuado más de 8500 telecomandos y el satélite se encuentra en perfecto estado de forma. A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la operación de la carga útil y sus aplicaciones.

4.1. M2M/IoT

M2M/IoT es la aplicación principal de Lume-1. Consiste en la comunicación del satélite con terminales remotos en tierra a través de su módem usando comunicaciones de baja tasa de transmisión y datos (1.2 -2.4 kbps). En este caso los equipos de tierra consisten en sensores de fuego y UAVs. La banda de operación de M2M/IoT se encuentra en la banda de radioaficionados de UHF y que presenta un alto nivel de interferencias que

dificulta enormemente la comunicación entre satélite y tierra, especialmente con terminales pequeños y bajas potencias de transmisión. Tras las primeras pruebas se trabajó trabajó para caracterizar y reproducir el canal en tierra con los modelos de ingeniería de TOTEM y los terminales. Fueron necesarias ciertas modificaciones de parámetros radio para mejorar la calidad del enlace sin aumentar la potencia transmitida (30 dBm en ambos extremos). Tras las pruebas en tierra, una nueva configuración de la aplicación M2M/IoT se subió a TOTEM de manera remota y se verifico el correcto funcionamiento, lo que permitió cumplir la misión de manera exitosa, ejecutando hasta la fecha más de 160 demostraciones de comunicación con este sistema.

4.2. ADS-B

Lume-1 lleva en la cara -Z una antena de parche activa centrada en 1090 MHz para ADS-B. Se realizaron pruebas iniciales de operación de esta carga útil cuyos resultados se pueden ver en la figura 5, con los datos recogidos de ADS-B cuando el satélite orbitaba por encima del caribe y la costa este de Estados Unidos y un detalle sobre el aeropuerto de Santiago de Chile. El periodo de captura de datos es de 10 minutos en ambos casos, realizando TOTEM un procesado a bordo consistente un filtrado de 30 segundos entre posición y una compresión de datos previa a la descarga. Estas son algunas de las estadísticas tras el filtrado para la primera de las operaciones realizadas con esta aplicación:

1) 3359 mensajes recogidos (10 minutos)
2) 1344 ICAOs
3) 850 posiciones completas
4) 305 ICAOs con posiciones completas

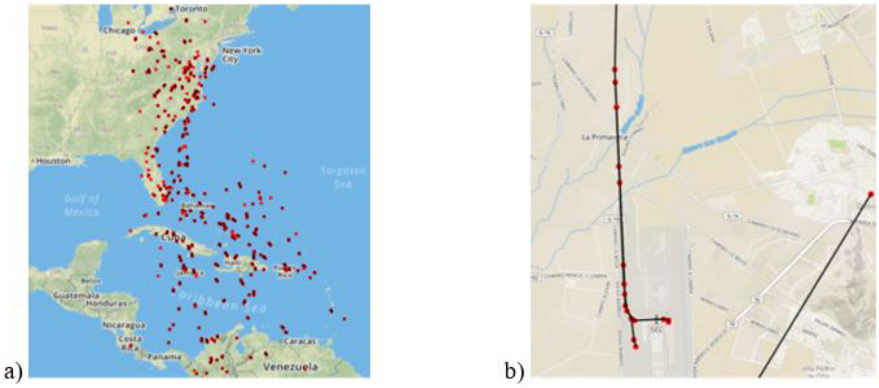


Figura 5. a) Representación en mapa de aeronaves con ADS-B . b) Detalle sobre una aeronave en el aeropuerto de Santiago de Chile.

4.3. Monitorización de espectro

La aplicación de monitorización de espectro captura señal de la banda de frecuencias de interés para poder recoger y poder detectar las señales que hay presentes en ella. Esto es útil para la detección de interferencias, pero para también la detección de señales no autorizadas y su geolocalización. La aplicación es capaz de generar una imagen como previsualización durante un tiempo determinado para una banda y un ancho de banda determinado, lo que permitiría una vez descargada a tierra, analizarla y solicitar la descarga de las muestras en crudo a TOTEM, para su posterior análisis en tierra. Adicionalmente, TOTEM realiza ciertas tareas de procesado a bordo como son la bajada en frecuencia, el filtrado o el diezmado, para limitar la cantidad de datos almacenados. La siguiente imagen, tomada el 01 de marzo de 2019 con Lume-1 sobre Europa del este, muestra una imagen de previsualización generada por TOTEM centrada en la frecuencia de 437.160 MHz con un ancho de banda de 25 KHz durante 5 segundos en la que se observa claramente la transmisión de una señal por encima de la frecuencia central.

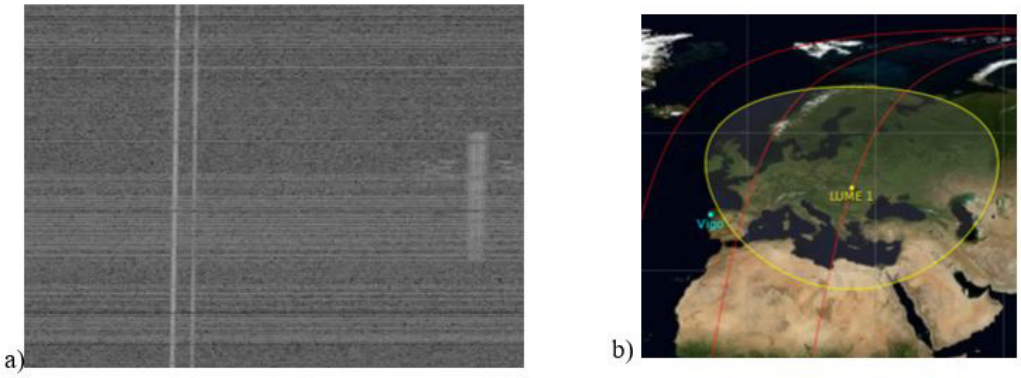


Figura 6. a) Previsualización de espectro en UHF. b) localización del satélite en el momento de la captura.

4.4. Demostración de actualización en órbita: APRS repetidor digital

Como muestra de la potencialidad de los satélites definidos por software y de TOTEM, durante la operación de Lume-1 se demostró la funcionalidad que estos satélites tienen de cambiar de misión una vez están en órbita, subiendo al satélite una nueva aplicación que no existía en él con anterioridad a ser lanzado.

En este caso se desarrolló un repetidor digital basado en el protocolo AX.25 [4] para la comunidad de radioaficionados en UHF con modulaciones y protocolos inexistentes previamente en el satélite. La necesidad de implementar esta nueva aplicación en el

satélite se identificó una vez estaba ya en órbita, es decir, que no se había contemplado durante su diseño, su verificación en tierra ni su comisionado en órbita.

La nueva aplicación se desarrolló y probó usando los modelos de ingeniería en tierra, y una vez validada, la aplicación se cargó remotamente en el satélite para el uso por parte de los radioaficionados.

5. Capacidades de los satélites definidos por software para defensa y seguridad

Hemos comprobado las capacidades que puede ofrecer un satélite definido por software gracias a Lume-1. Algunas de las aplicaciones que hemos validado en órbita tienen un potencial muy importante para el sector de defensa y seguridad.

Una de estas aplicaciones es la conocida como inteligencia de señal, o SIGINT de sus siglas en inglés (Signal Intelligence), cuya base es la aplicación de monitorización de espectro que se ha mencionado en el caso del satélite Lume-1. Consiste en el análisis del espectro radioeléctrico en busca de señales con el objetivo de caracterizarlas, identificarlas y geolocalizarlas. Esto puede ayudar a detectar y geolocalizar fuentes de interferencia, emisiones no autorizadas o incluso traquear objetivos gracias a sus emisiones de radio. Con la radio definida por software, las aplicaciones en este campo no acaban aquí ya que se pueden realizar todo tipo de análisis sobre las señales recibidas una vez digitalizadas. Además y gracias a las nuevas tecnologías de inteligencia artificial y machine learning, es precisamente el campo de la inteligencia de señal la que cobra si cabe un mayor interés en aplicaciones de seguridad y defensa, incluso llevando todo el procesado o parte de él a bordo gracias a las cada vez mayores prestaciones de los satélites.

Otro punto clave de las constelaciones de satélites definidos por software es el de servir de soporte a comunicaciones tácticas. Normalmente la exigencia de las redes de comunicación militares es muy elevada, y exigen de ellas que sean flexibles para poder adaptarse rápidamente a nuevos escenarios, que sean robustas en todos los sentidos, fácilmente adaptables según la situación o a nuevos entornos, que soporten comunicaciones móviles, de alto y bajo ancho de banda, de voz y de datos, etc. Algunas de estas prestaciones pueden ser aportadas por satélite gracias a la tecnología SDR. Si bien en tierra se puede intercambiar entre distintos sistemas de comunicaciones rápidamente, en la infraestructura espacial no es viable a menos que se embarquen todas las opciones posibles en los satélites desarrollados, lo cual no es realista. Por ello, la reprogramabilidad que tendrían los satélites definidos por software y su capacidad para adaptarse a las nuevas situaciones es una ventaja competitiva.

Pero más allá de las aplicaciones concretas que puedan implementarse con estos satélites la capacidad más importante que aportan para defensa y seguridad es el cambio que suponen para la planificación estratégica. Disponer de una infraestructura espacial adaptable y flexible, como sería una constelación de satélites definidos por software,

permitiría a los órganos encargados de la planificación estratégica de defensa no tener que pensar que capacidades se necesitarán dentro de 10 o 15 años, como ocurre actualmente con la planificación de los programas nacionales satelitales de defensa.

Los nuevos escenarios internacionales nos obligan a realizar cambios de prioridad y de disponer de nuevas funcionalidades, hoy en día inexistentes, cada vez con ciclos más cortos. Para conseguirlo la actual estrategia de planeamiento y desarrollo de nuestros satélities nacionales no será capaz de adaptarse. Sin embargo estrategias que combinen los sistemas satelitales tradicionales con soluciones basadas en satélites definidos por software sí lo permitirían, aumentando además la redundancia y por lo tanto la resiliencia de nuestras capacidades.

6. Conclusiones

La radio definida por software es una tecnología tremendamente ventajosa por su flexibilidad, adaptabilidad y sobretodo reconfigurabilidad. Esto permite a un equipo que incorpore una SDR adaptarse a nuevos requisitos incluso una vez en activo y de manera remota. Esto no solo dota de flexibilidad al usuario sino que alarga la vida útil del equipo notablemente, pues nuevas soluciones y aplicaciones pueden ser instaladas sin necesidad de cambiar el hardware. Son estas características las que la hacen especialmente atractivas en el sector espacial y permiten la aparición de nuevos conceptos como los satélites definidos por software.

Disponer de una tecnología de estas características, capacidades y flexibilidad para la defensa nacional es una ventaja competitiva notoria. Además, y gracias a las constelaciones de pequeños satélites, los tiempos de desarrollo y coste se reducen con lo que aportar nuevos satélites con tecnología mejorada es más rápido que con satélites más grandes. Estas constelaciones habilitan la capacidad nacional para adaptarse a los cambios con rapidez, reorientando su infraestructura espacial a una nueva necesidad en tiempos muy reducidos.

Son numerosos los retos tecnológicos que quedan por solventar para que esta tecnología pueda desplegarse por completo, pero sin duda la tecnología se puede desarrollar a medio plazo. El reto más importante será, por lo tanto, si seremos capaces de adaptar nuestros sistemas de planeamiento, mando y control a soluciones abiertas y altamente cambiantes como las que permiten este tipo de satélites.

Referencias

1. Maheshwarappa, Mamatha R., and Christopher P. Bridges. «Software defined radios for small satellites.» 2014 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). IEEE, 2014.

2. Tang, Zhu, et al. «Software defined satellite networks: Benefits and challenges.» 2014 IEEE Computers, Communications and IT Applications Conference. IEEE, 2014.
3. GNURadio wiki, https://wiki.gnuradio.org/index.php/Main_Page
4. Protocolo AX.25, http://www.ax25.net/Default.aspx.

DESEi+d 2019

PUBLICACIONES DE DEFENSA

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