Boletín DE OBSERVACIÓN TECNOLÓGICA EN DEFENSA

DIRECCIÓN GENERAL DE ARMAMENTO Y MATERIAL
ARMAMENTO Y MATERIAL

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PLANIFICACIÓN, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN
Boletín de Observación Tecnológica en Defensa n.º 58 • 3.er trimestre de 2018

Hibridación fuerte INS/GNSS

Diseño y fabricación de la estructura de un demostrador de un vehículo 8x8 avanzado híbrido eléctrico

SERS para la detección de agentes de guerra química

Edita:

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

NIPO en línea: 083-15-183-4
NIPO impresión bajo demanda: 083-15-182-9
ISSN edición electrónica: 2444-4839

Autor: Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT), Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM). C/ Arturo Soria 289, 28033 Madrid; teléfonos: 91 395 46 18 (Dirección), 91 395 46 01 (Redacción); **observatecno@oc.mde.es**.

Director: TCol. Juan Manuel González del Campo Martínez.

Consejo Editorial: Óscar Jiménez Mateo, José Agrelo Llaverol, Cap. Carlos Calderón. Bgda. José María Martínez Benéitez, Angel Nicolás Bellido Vivas.

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

Portada: Triangulación satelital. (Fuente: https://pixabay.com/es/triangulaci%C3%B3n-agrimensura-web-1899948/).

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

Colaboraciones y suscripciones:
observatecno@oc.mde.es

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

SOPT

DGAM
Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación

CONTENIDOS

Editorial

Actualidad

4 ¿Dónde hemos estado?

5 STO: Celebración en España de la 41ª Reunión Plenaria del Grupo NMSG

6 STO: Seminario SCI-277 “Store Separation and Trajectory Prediction”

Tecnologías emergentes

8 SERS para la detección de agentes de guerra química

En profundidad

12 Diseño y fabricación de la estructura de un demostrador de un vehículo 8x8 avanzado híbrido eléctrico

15 Hibridación fuerte INS/GNSS

19 Adaptación de nuevos materiales y procesos a munición convencional

DESEI+D - CONGRESO NACIONAL DE I+D EN DEFENSA Y SEGURIDAD

En el año 2013, el Ministerio de Defensa tomó la iniciativa de organizar un congreso en Madrid cuyo objetivo fuera crear un foro de referencia nacional en el que se presentasen todos aquellos trabajos tecnológicos de investigación relacionados con los ámbitos de defensa y seguridad, que hubieran sido desarrollados por agentes propios de nuestra amplia base tecnológica nacional y que pudieran ser compartidos entre, no sólo el resto de nuestra comunidad científica, bien sean pymes, grandes empresas, universidades o centros de investigación, sino entre el personal de nuestras Fuerzas Armadas, que en definitiva, debieran ser los potenciales usuarios finales de esas tecnologías y proceder así al desarrollo de sus capacidades. Sería de esta manera como naciera el llamado DESEI+D.

Ese mismo objetivo se ha mantenido en ediciones posteriores celebradas en los Centros Universitarios de la Defensa de Zaragoza, Marín y San Javier, así como el pasado año en la Academia de Infantería de Toledo, creciendo exponencialmente año tras año, no sólo en la dimensión de ponencias y asistencia a los mismos, sino también en su calidad técnica y rigor científico.

La I+D+i de defensa debe sustentarse prioritariamente sobre la capacidad tecnológica e industrial nacional, lo que obliga a orientar adecuadamente el esfuerzo de todos los actores implicados hacia la misma dirección. Es por ello, la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID) definida por el Ministerio de Defensa, y en la que se recogen las metas tecnológicas a desarrollar por la Base Tecnológica e Industrial de Defensa (BTID), constituye el pilar de las áreas temáticas en las que se ha organizado este congreso, añadiendo otras también de especial interés para las FAS como pueden ser las relacionadas con Economía, Sociedad y Humanidades en el contexto de la Defensa.

Paralelamente a las ponencias de cada una de las áreas temáticas, en cada una de las ediciones del Congreso, se ha pretendido llevar a cabo discusiones con un mayor carácter estratégico a través de sus sesiones plenarias.

La sexta edición del DESEI+D tendrá lugar los días 20, 21 y 22 de noviembre del presente año en la Academia de Caballería de Valladolid, organizada por la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación de la Dirección General de Armamento y Material en colaboración con 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).

En esta ocasión, y a través de las sesiones plenarias, se pretenderá determinar las nuevas formas de colaboración que permitan aprovechar las oportunidades a nivel nacional y europeo, pretendiéndose identificar los aspectos que deben ser reforzados en la coordinación entre entidades nacionales en aspectos de investigación en defensa y seguridad en España, las principales barreras existentes para ello, así como la detección de posibles sinergias entre las actuaciones públicas de I+D+i de los distintos organismos públicos financiadores con usuarios finales.

Desde la DGAM se considera de especial interés este tipo de eventos, en el que fomentar la colaboración entre las partes vinculadas al desarrollo de tecnología de aplicación a defensa y seguridad, con el fin último de lograr nuevos avances tecnológicos y su incorporación en última instancia a los sistemas en uso por las FAS.

Actualidad

¿Dónde hemos estado?

Del 16 al 18 de julio

- **Curso CESEDEN "Evolución de la I+D de Defensa en España en el Horizonte 2020"**

El objetivo de este curso fue dar a conocer las líneas estratégicas de I+D, algunos de los proyectos emblemáticos avanzados del Ministerio de Defensa, así como por otros organismos públicos y privados españoles relacionados con la tecnología de Defensa. A su vez, se dieron a conocer distintas oportunidades derivadas de la creciente implicación de la UE en el ámbito de Defensa.

El curso finalizaría con la visita guiada por las instalaciones del INTA.

Del 18 al 20 de julio

- **Curso de verano "Fabricando la realidad virtual"**

La Cátedra de Defensa Almirante Bonifaz de León organizó el evento en la Real Colegiata de San Isidoro de León. Este curso de verano, tuvo como finalidad acercar de la mano de expertos de la industria de la simulación y videojuegos, las últimas tendencias de la simulación virtual en el ámbito de la defensa, así como las nuevas oportunidades laborales y formativas que han surgido basadas en estas tecnologías.

Del 20 al 30 de septiembre

- **VIII Semana Naval de la Armada**

Entre el ciclo de conferencias organizadas con motivo de la VIII Semana Naval de la Armada, la ETSIT de la UPM organizó una jornada bajo el título "Tecnologías de ciberseguridad en el ámbito naval", en el que personal del CCN, MCCD, base tecnológica industrial y universidades pusieron de manifiesto la importancia de las tecnologías de ciberseguridad en el ámbito de las FAS.

"Imagen: © ETSIT".

25 de septiembre

- **Jornada "Energía inteligente: Soluciones tecnológicas para la eficiencia y seguridad energética en misiones internacionales"**

La Jornada, siendo una iniciativa de la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN) y que sirvió como continuación al trabajo de exposición de necesidades que las FAS mostraron en otra jornada previa, tuvo por objeto constituir un foro de exposición de las capacidades de la base tecnológica e industrial de Defensa al gran desafío que supone el suministro de energía en bases y campamentos en misiones en el exterior.

... entre otros eventos

STO: Celebración en España de la 41ª Reunión Plenaria del Grupo NMSG

Autor: Área de Cooperación Internacional (ACI), SDGPLATIN.

Palabras clave: Modelado y Simulación (M&S), simulación para el adiestramiento, estandarización en M&S, STO, OTAN.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 6.4.1; MT 6.4.2, MT 6.4.3.

La semana del 16 al 20 de abril de 2018 España acogió la 41ª reunión plenaria del grupo NMSG (NATO *Modelling and Simulation Group*) de la Organización de Ciencia y Tecnología de la OTAN (STO - *Science and Technology Organization*). La reunión, organizada por la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación de la DGAM, se celebró en la Academia de Artillería de Segovia.

El grupo NMSG es uno de los siete comités científico-técnicos en los que la STO estructura su actividad. La misión de este grupo es promover la cooperación, en el ámbito del Modelado y de la Simulación, entre los países de la OTAN, los organismos de la propia Alianza y las naciones asociadas, con el fin de maximizar el aprovechamiento de los medios y técnicas de que disponen en este ámbito. Las principales áreas de actuación del NMSG incluyen la estandarización, la instrucción y el adiestramiento y el desarrollo científico y tecnológico.

El acto inaugural del evento contó con la presencia del Coronel Director de la Academia de Artillería D. José María Martínez Ferrer y del Jefe del Área de Cooperación Internacional en I+D de la SDGPLATIN y representante en la Junta Directiva de la STO, D. José Ramón Sala.

La reunión congregó a más de 70 expertos científicos, técnicos y operativos pertenecientes a los diversos países de la OTAN y a sus naciones asociadas, así como a otros organismos de esta organización como el Mando Aliado de Transformación (ACT - *Allied Command Transformation*) o el Centro de Excelencia OTAN en Modelado y Simulación (M&S CoE). Estos expertos, algunos de reconocido prestigio a nivel internacional, trabajaron a lo largo de la semana en definir y poner en marcha actividades de investigación para avanzar en el conocimiento y el grado de desarrollo en esta importante área tecnológica, considerada clave por la OTAN y por muchos países por su capacidad para potenciar en alto grado el nivel de adiestramiento de la Fuerza.

Fig. 1. Miembros del grupo NMSG. (Fuente: ACART).

Durante la semana de la reunión, se reservó tiempo para que los asistentes pudieran visitar el avanzado Centro de Adiestramiento y Simulación del que dispone la Academia, que permite realizar los programas de instrucción de las diferentes unidades de artillería que pasan por sus instalaciones.

La reunión fue valorada muy positivamente por los asistentes, resultando un éxito tanto desde el punto de vista técnico como organizativo. Este evento ha demostrado una vez más que tanto las reuniones del NMSG como las del resto de los paneles de la STO constituyen foros esenciales para promover el intercambio de conocimiento y el avance científico en beneficio de la defensa y seguridad de las naciones OTAN y de sus aliados. Consciente de ello, el Ministerio de Defensa seguirá impulsando la participación de los expertos nacionales en los distintos grupos de trabajo de la STO, la mayor organización del mundo dedicada a la investigación en ciencia y tecnología relacionada con defensa.

Fig. 2. Visita al Centro de Adiestramiento y Simulación. (Fuente: ACART).

STO: Seminario SCI-277 *"Store Separation and Trajectory Prediction"*

Autores: Área de Cooperación Internacional (ACI), SDGPLATIN.

Palabras clave: separación de cargas de aeronaves, integración de armamento en aeronaves, predicción de trayectoria, ensayos en túnel de viento, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), ensayos en vuelo, seguridad de vuelo.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 1.2.1.

Introducción

La SDGPLATIN, en colaboración con la Escuela Politécnica Superior del Ejército, organizó los pasados días 21 y 22 de mayo de 2018 el seminario internacional SCI-277 "*Store Separation and Trajectory Prediction*", promovido por la Organización de Ciencia y Tecnología de la OTAN (*STO - Science and Technology Organization*). Estos seminarios o clases magistrales de la STO ("*Lecture Series*", por su denominación en inglés) son eventos de carácter formativo que se organizan anualmente en distintos países de la OTAN, con el objetivo de difundir información sobre el estado del arte en temas científicos y tecnológicos de gran interés para la Alianza y sus Estados miembro. Impartidos por expertos de reconocido prestigio, los seminarios de la STO constituyen excelentes oportunidades formativas para las naciones que los acogen.

El seminario SCI-277 se gestó en el seno del Comité "*Flight Test Technical Team*" (FT3) de la STO, uno de los comités científicos más longevos de la OTAN y responsable de contribuciones clave en el campo de los ensayos de vuelo a través de numerosas publicaciones de referencia en este ámbito. En este comité participan nueve naciones de la OTAN, entre las que se incluye España. La participación nacional se articula a través del INTA.

Temas tratados

El seminario SCI-277 estuvo enfocado a abordar la problemática de la separación de cargas de aeronaves, especialmente crítico en el caso de la separación de armamento (p.ej., misiles) de aeronaves de alta dinámica (ver figura 1). Antes de poder certificarse para el vuelo, el proceso de separación de toda nueva combinación de armamento/aeronave debe analizarse y ensayarse de manera exhaustiva desde los puntos de vista aerodinámico y estructural, utilizando simulaciones CFD, pruebas en túnel de viento y ensayos en tierra y en vuelo. El objetivo principal es evitar que la carga, una vez separada de la aeronave, pueda impactar en la misma debido a las condiciones del flujo aerodinámico. Por otro lado, el efecto de la carga en el comportamiento dinámico y estructural de la aeronave también debe modelizarse y ensayarse, para evitar la aparición de fenómenos como las vibraciones auto-inducidas (flameo o "*flutter*") que puedan hacer peligrar la integridad de la estructura. La complejidad

Fig. 1. Un misil JASSM se separa de un bombardero B-1. (Fuente: Lockheed Martin, cortesía de la USAF).

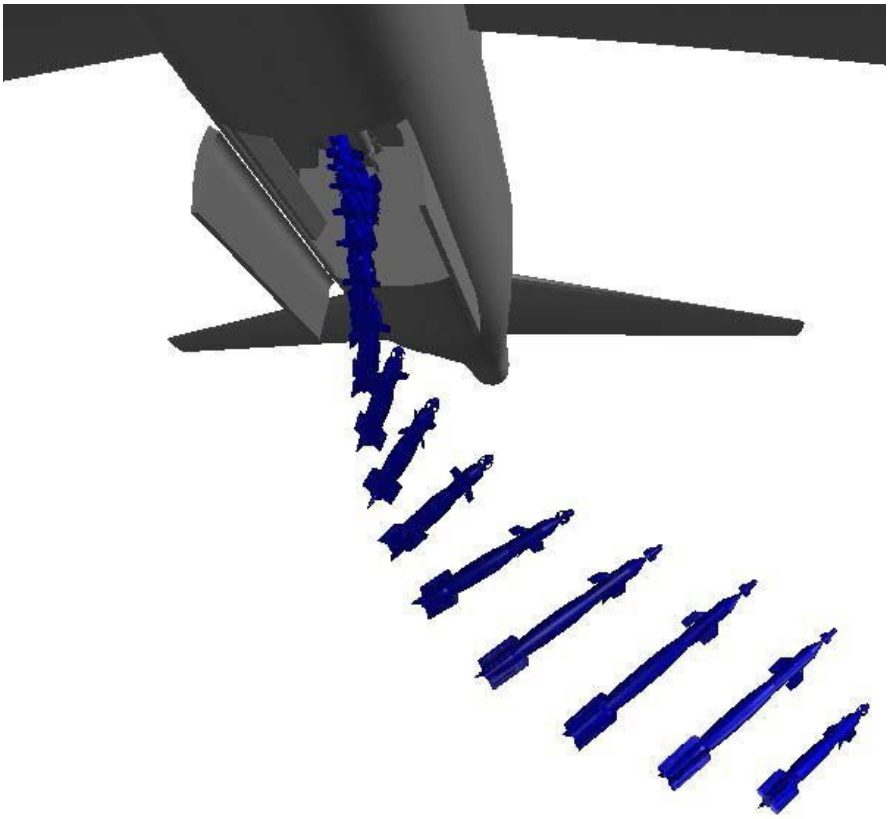

Fig. 2. Simulación CFD de la separación de una bomba GBU-12 de un bombardero B-52. (Fuente: Jacob A. Freeman).

de los análisis y ensayos requeridos para garantizar la seguridad de este proceso de separación hace que las actividades de certificación de toda nueva combinación carga/aeronave puedan prolongarse durante años.

En el análisis de la separación de cargas confluyen expertos de cinco disciplinas diferenciadas: actuaciones de la aeronave, cualidades de vuelo, estructuras, "*flutter*" y liberación de carga. Uno de los objetivos del seminario fue precisamente tratar de congregar a estos expertos y servir de foro de debate e intercambio de ideas sobre las posibles maneras en las que el proceso de separación de cargas podría mejorarse.

Las ponencias, impartidas por un equipo de expertos con una dilatada experiencia profesional en las disciplinas mencionadas, versaron (entre otros) sobre los siguientes temas:

- **Panorámica de la separación de cargas**, donde se ofreció una perspectiva histórica de cómo han evolucionado en los últimos sesenta años las capacidades de predicción para los procesos de separación de cargas.
- **Efecto de las cargas en las actuaciones de la aeronave y en las cualidades de vuelo,** donde se trataron las aproximaciones más utilizadas para determinar estas características de la aeronave cuando se le añade una configuración de carga nueva.
- **Efecto de la cargas en la estructura de la aeronave,** donde se detallaron las aproximaciones que se usan para probar la integridad estructural de las aeronaves de combate con cargas externas.
- **Aplicación de CFD a la separación de cargas,** donde se presentaron los resultados obtenidos en la separación de cargas de varias aeronaves mediante la utilización de códigos CFD. Asimismo, se describieron las prácticas de uso de estos códigos por parte de la "*Air Force SEEK EAGLE Office*" (AFSEO), que durante los últimos 25 años ha sido una de las organizaciones líderes en este ámbito. Un ejemplo de estas simulaciones se recoge en la figura 2.
- **Dinámica estructural y *flutter*,** donde se trataron las aproximaciones que se siguen para entender los mecanismos implicados en el fenómeno de "*flutter*", así como la identificación de los límites del mismo para todas las posibles configuraciones de carga de la aeronave. Se describió también el estado del arte de los ensayos dinámicos para la calificación de la aeronave desde los puntos de vista aeroelástico, aeroservoelástico y de dinámica estructural.
- **Lecciones aprendidas**, donde se repasaron los principales errores cometidos en diversos programas de separación de cargas, con el fin de extraer lecciones aprendidas de este complejo proceso.

Resultados

El seminario contó con una nutrida asistencia de expertos nacionales en el ámbito de la separación de cargas de aeronaves, pertenecientes tanto al ámbito gubernamental (sobre todo del Ejército del Aire y del INTA) como al industrial y académico. Es de destacar asimismo que las ponencias fueron valoradas muy positivamente por la mayoría de los asistentes. El seminario, con el mismo programa, se impartió también con posterioridad a la sesión de Madrid en Amsterdam (*Netherlands Aerospace Centre – NLR)* y en Ottawa (*National Research Council Canada*). Los documentos con las lecciones de los seminarios ("*educational notes*") se pueden descargar de la sección "*Publications*" de la página web de la STO (www.sto.nato.int).

Tecnologías emergentes

SERS para la detección de agentes de guerra química

Autores: Marta Lafuente, Maria Pilar Pina, Reyes Mallada, Jesús Santamaria, Instituto de Nanociencia de Aragón (INA); Miguel Urbiztondo, Centro Universitario de Defensa de Zaragoza (CUD); Ismael Pellejero, *Institute For Advanced Materials*.

Palabras clave: sensor, gas sarín, SERS.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 5.2.1.

Introducción

Agentes Químicos de Guerra

Según la *Chemical Weapons Convection* (CWC), un agente químico de guerra (*Chemical Warfare Agent*, CWA) es toda sustancia química que, por su acción química sobre los procesos vitales, pueda causar la muerte, la incapacidad temporal o lesiones permanentes a seres humanos o animales [1]. Las CWA son relativamente más baratas que el resto de armas de destrucción masiva (armas nucleares, radiológicas y biológicas), y sus efectos son devastadores para la población [2].

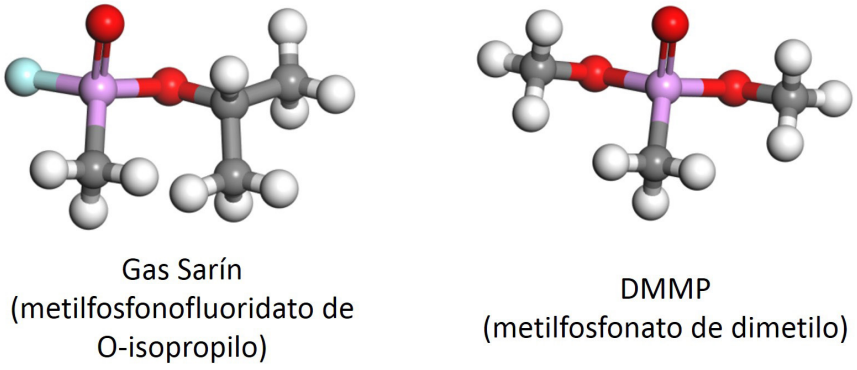

Fig. 1. Estructura del gas sarín y su simulante: DMMP. Leyenda de colores: C, gris; H, blanco; O, rojo; P, morado; F, azul. (Fuente: propia.)

Las CWA se clasifican según sus efectos en el cuerpo humano en agentes nerviosos, sanguíneos, pulmonares (asfixiantes), vesicantes, lacrimógenos y discapacitantes (o paralizantes).

Los agentes nerviosos son los agentes de guerra más tóxicos de todos los que se conocen, de cientos a miles de veces más letales que los vesicantes, los agentes pulmonares o los venenosos que afectan a la sangre. Por ejemplo, la toxicidad del sarín es de 25 a 50 veces superior a la del cianuro de hidrógeno. Además, este tipo de arma puede ser dispersada desde mísiles, cohetes, bombas, proyectiles, minas, municiones u otros dispositivos que den como resultado un aerosol que pueda utilizarse en espacios confinados (teatros, centros comerciales, estaciones de metro, etc.) con objeto de causar el mayor daño posible.

Detección de Agentes Químicos de Guerra (CWA) en fase gas

En la actualidad las técnicas más habituales de detección en fase gas de este tipo de amenazas están basadas en cromatografía gases-masas (GC MS) [3] y espectroscopía de movilidad iónica (IMS) [4]. Sin embargo, presentan severas limitaciones en especificidad,

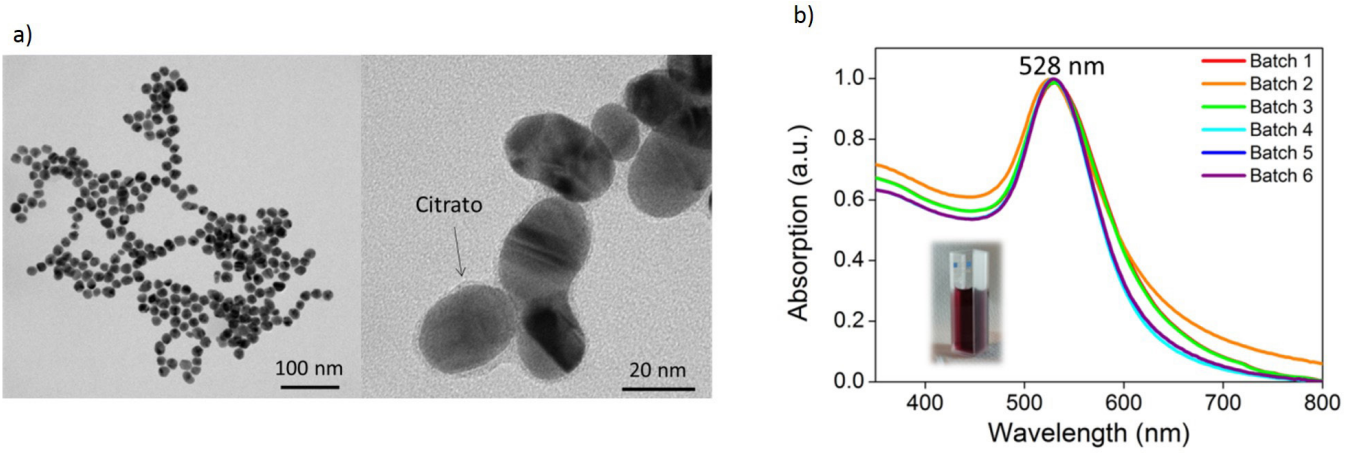

Fig. 2. a) Imagen TEM de AuNP@citrate donde se visualiza la capa estabilizante de citrato. b) Espectro de absorción de seis diferentes lotes de AuNP@citrate; inserto: AuNP@citrate en la cubeta de UV. (Fuente: Referencia [8]).

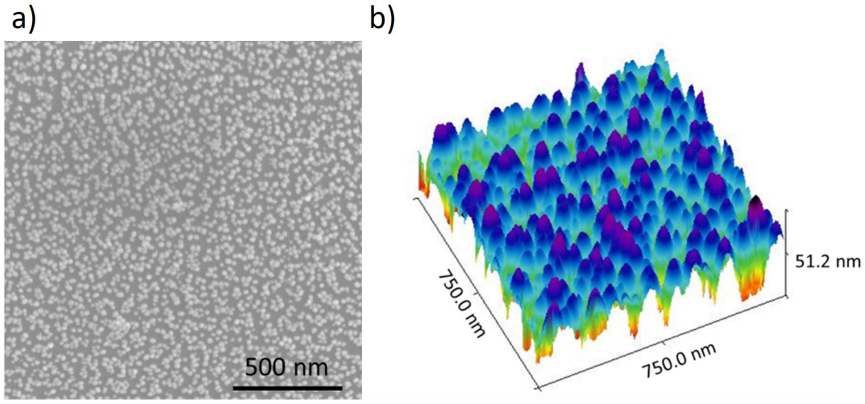

Fig. 3. a) Imagen SEM de las AuNP@citrate depositadas sobre SiO2/Si. b) Caracterización AFM-3D de las AuNP@citrate sobre SiO2/Si. (Fuente: Referencia [8]).

portabilidad, coste y simplicidad. Estas técnicas no dotan a los cuerpos de seguridad de respuesta rápida, de un equipamiento que les permita realizar un análisis rápido e "in situ" de la escena cuando haya riesgo de haberse producido un ataque químico. Los avances que se presentan en este artículo intentan suplir esta importante necesidad. El objetivo final es el desarrollo de un método rápido, sencillo y reproducible de detección de agentes nerviosos G en condiciones reales o de campo realmente útil para nuestras fuerzas de seguridad.

Espectroscopía Raman y efecto SERS (*Surface Enhanced Raman Spectroscopy*)

La espectroscopía Raman monitoriza la vibración de los enlaces de las moléculas obteniéndose la huella dactilar de las mismas (la vibración de cada molécula es única, como la huella dactilar humana) y, por tanto, alcanzándose una alta selectividad en la identificación de agentes químicos. Por otro lado, la variante Raman SERS ha sido identificada como una tecnología clave en la detección de agentes químicos debido a su ultra alta sensibilidad, y la capacidad de identificar y cuantificar mezclas de compuestos en una sola medida, permitiendo una detección a tiempo real en condiciones de campo.

El efecto Raman se produce cuando la luz (láser) incide sobre una molécula e interactúa con la nube de electrones de los átomos de esa molécula. El fotón incidente excita uno de los electrones a un estado virtual. La molécula se excita desde el estado basal a un estado de energía virtual, y se relaja a un estado vibracional excitado, lo que genera la dispersión inelástica de Raman Stokes.

El efecto SERS consiste en una intensificación extraordinaria de la emisión Raman procedente de una molécula cuando ésta se encuentra en contacto o cerca de una superficie metálica nano-estructurada. La amplificación de la señal en SERS proviene de la interacción de la luz con los electrones de conducción situados en la superficie del metal.

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 los más aplicados en experimentos SERS. Las dimensiones y la ordenación de las nanopartículas (NP) metálicas implicadas en este fenómeno juegan un papel importante.

En general, las nanoestructuras con unos tamaños entre 1 y 100 nm, absorción entre 400 y 800 nm, suelen ser efectivas. En su ordenación, el espaciado entre NP, también es un parámetro crucial para que se produzca el aumento de la señal. El campo electromagnético generado en una partícula individual debe entrar en interferencia coherente con los campos electromagnéticos de NP adyacentes para producirse el aumento de la señal, este punto de proximidad se denomina "*hot spot*", y suelen distar alrededor de entre 5-20 nm [5].

Materiales y Métodos

En este artículo se presentan los resultados obtenidos para la molécula modelo DMMP (metilfosfonato de dimetilo), un simulante del gas sarín, la molécula objetivo de este trabajo. Se utiliza un simulante dada la alta toxicidad de la molécula real y porque la *Chemical Weapons Convention* (CWC) prohíbe el desarrollo, producción, almacenaje y uso de armas químicas [6]. DMMP y gas sarín difieren principalmente en la ausencia del enlace C-F, responsable de la toxicidad (figura 1).

Cabe destacar que, en la bibliografía científica actual, apenas aparecen artículos que usen Raman SERS para detectar DMMP, y los que usan la técnica, detectan la molécula en fase líquida [7], cuando el verdadero peligro

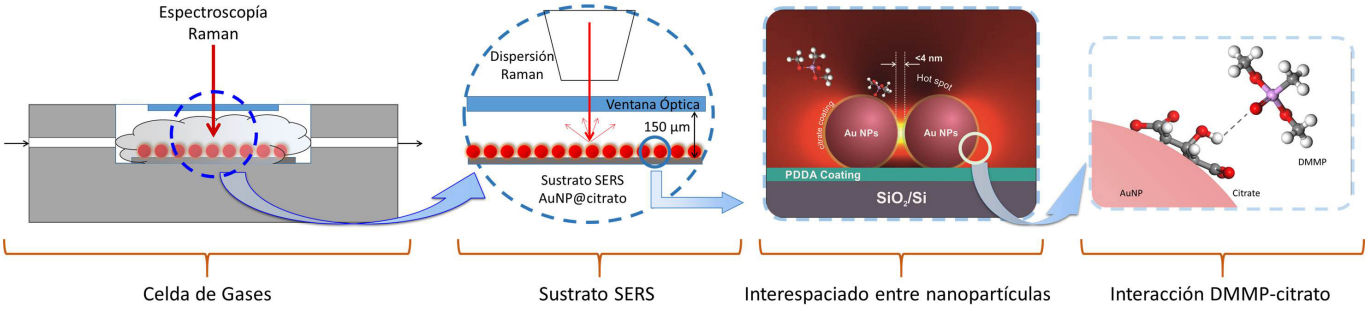

Fig. 4. Esquema general de la plataforma sensible desarrollada para detectar DMMP en fase gas. (Fuente: Referencia [8]).

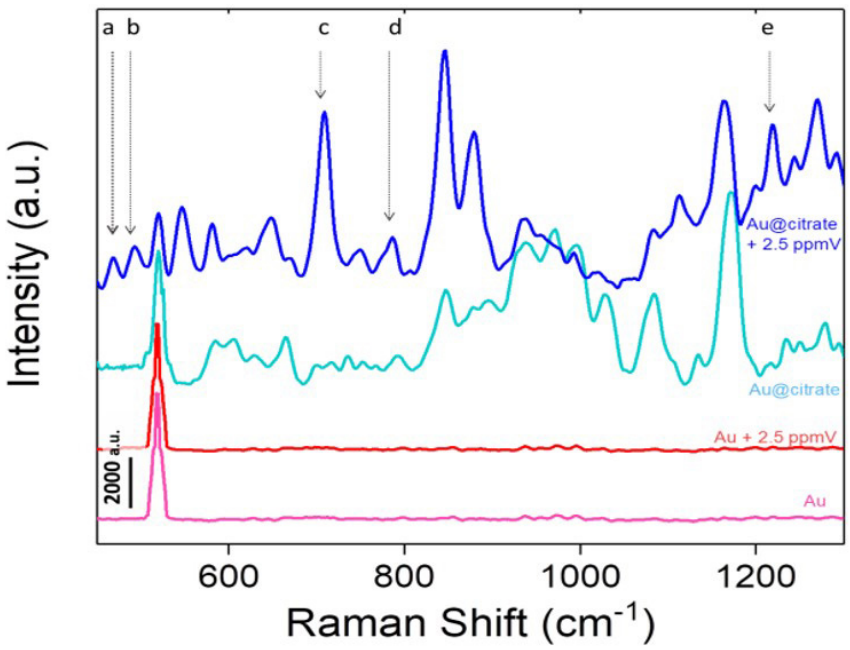

Fig. 5. Espectro SERS de AuNP@citrate sobre SiO2/Si antes (azul claro) y después de alimentar una corriente gaseosa de DMMP de 2,5 ppmV (azul oscuro). Espectro SERS de AuNP sobre SiO2/Si tras retirarle la capa de citrato antes (rosa) y después de alimentar una corriente gaseosa de DMMP de 2,5 ppmV (rojo). (Fuente: Referencia [13]).

se encuentra en su dispersión por vía área. Esto supone un reto añadido a nuestro objetivo de detectar e identificar DMMP en fase gas en concentraciones bajas.

Sustrato SERS

El soporte seleccionado como sustrato SERS en detección de DMMP en fase gas ha sido nanopartículas de oro recubiertas de citrato (AuNPs@citrate) depositadas sobre un sustrato plano de óxido de silicio (SiO2/Si) mediante un protocolo de *Layer-by-layer* usando como *linker* un polímero catiónico.

La figura 2 muestra imágenes TEM de las nanoparticulas de oro estabilizadas con citrato (AuNP@citrate) y su espectro UV situado en 528 nm para todas las muestras del lote denotando la gran reproducibilidad del método estudiado y optimizado de síntesis de estas partículas.

Tras la deposición de estas partículas mediante un método basado en un protocolo de deposición capa a capa, se obtuvo como resultado un sustrato SERS con una densidad de 750 AuNP/μm^2 proporcionando un grado de recubrimiento del 30% y unos interespaciados, *hot spots*, de 15 nm. La densidad y el espaciado fueron medidos de las imágenes SEM (figura 3 a) y AFM (figura 3 b) de los recubrimientos.

Sistema experimental para medir DMMP en fase gas

El equipo utilizado para medir los espectros Raman SERS del DMMP fue un *Alpha Raman Spectrometer* de WITec. El sistema Alpha 300 combina la alta eficiencia del detector Raman con un microscopio de alta resolución confocal. Con esta combinación es posible obtener información química de muestras realizando áreas x-y-z.

La figura 4 muestra el esquema general de la plataforma sensible desarrollada para la detección de DMMP en fase gas. La plataforma sensible consta de una celda de gases construida "ad-hoc" donde se sitúa el sustrato SERS y se alimenta el DMMP en fase gas [8].

Resultados y discusión de la detección de DMMP en fase gas

El DMMP tiene varios enlaces activos en Raman proporcionando un espectro SERS con múltiples picos, siendo el más intenso e importante el desplazado a 715 cm^{-1}, y que representa el enlace P-C de la molécula, es este pico el que se usa como referencia en la detección de DMMP en fase líquida y, por tanto, el que usaremos nosotros en fase gas.

Como puede observarse en la figura 5, el espectro SERS de las AuNP@citrate (azul claro) se modifica tras alimentar 2,5 ppmV de DMMP en fase gas a la celda (azul oscuro). El pico característico del DMMP (banda c de la figura 5) comienza a aparecer denotando su presencia. Además, en el espectro del DMMP sobre AuNP@citrato podemos reconocer los picos obtenidos de la vibración de los enlaces POCH3 (banda a), POC (banda b), PO2 (banda d) y P=O (banda 5).

La figura 5 también compara espectro SERS del DMMP sobre AuNP@citrate con el espectro obtenido del DMMP (rojo) sobre las mismas AuNP sin la capa de citrato (rosa). Si comparamos los dos espectros podemos observar que sobre AuNP sin citrato no somos capaces de detectar DMMP. Con este ensayo se demuestra la importancia de la capa orgánica de citrato alrededor de las AuNP, esta capa orgánica hace de trampa molecular del DMMP en fase gas, acercándolo a la superficie metálica e introduciéndolo así dentro del campo electromagnético amplificado por las nanopartículas metálicas (efecto SERS), es decir, aumentando la señal de la molécula de DMMP siendo así posible su detección e identificación en bajas concentraciones.

El tiempo de respuesta de nuestro sistema es inferior a 100 segundos, tal y como se muestra en la figura 6 (a). Además, la interacción responsable de la detección del DMMP entre esta molécula y el citrato es débil, lo que permite reutilizar el sensor en múltiples medidas. La figura 6 (b) nos muestran 10 ciclos ON/OFF de absorción de DMMP sobre un mismo sustrato de AuNP@citrate. Un ciclo se corresponde con alimentar 1,2 ppmV de DMMP en nitrógeno a la celda hasta obtener señal (puntos rojos) y después barrer la celda con nitrógeno limpio hasta que la intensidad del pico desplazado a 718 cm^{-1} es cero (puntos azules), aprox. 10 min, considerándose entonces que el sustrato está completamente limpio de DMMP y, por tanto, puede volver a utilizarse.

Una vez conocidas las bondades de nuestro sustrato SERS como plataforma de detección e identificación de DMMP en fase gas, se pasó a

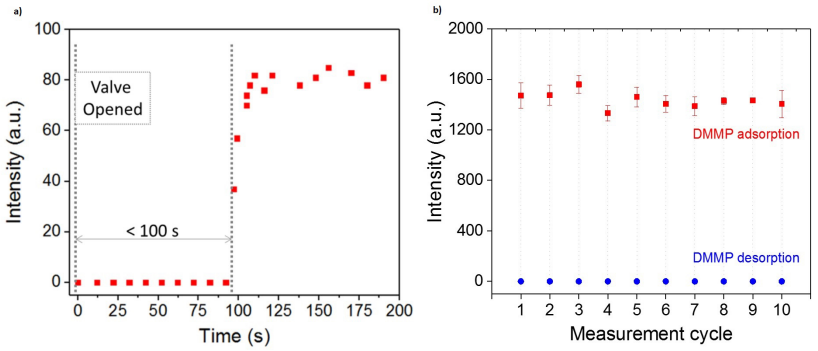

Fig. 6. a) Evolución temporal del pico a 718cm-1 del DMMP sobre AuNP@citrate. Condiciones: 1 mW y 0,5s. b) Evolución del espectro SERS del DMMP cuando se expone el sustrato AuNP@citrate a consecutivos de ciclos ON/OFF de DMMP. Condiciones: 1,2 ppmV. (Fuente: Referencia [13]).

reducir la concentración de DMMP para conocer el límite de detección del sustrato, o sensibilidad del mismo. La figura 7 nos muestra los espectros SERS sobre AuNP@citrate de tres concentraciones diferentes de DMMP: 2,5 ppmV, 1,2 ppmV y 625 ppbV. Puede observarse que en todos los casos se observa claramente el pico del enlace PC del DMMP, y el desplazamiento del pico se debe a la orientación de la molécula sobre el sustrato. Este comportamiento se ha observado anteriormente para otras moléculas cuando se desciende la concentración de las mismas [9]. La intensidad del pico característico del DMMP aumenta linealmente al aumentar la concentración de DMMP (figura 7 b), por lo que nuestro sustrato podría utilizarse para cuantificar DMMP en fase gas. Acorde a estos resultados experimentales se ha calculado el límite de detección (LOD) en 130 ppbV, valor muy por debajo de lo reportado hasta el momento en literatura [10].

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 se queda en una importante contribución a la ciencia, sino que, además, pretende dar solución a un problema que hoy en día existe frente a posibles ataques con agentes químicos de guerra.

Con el sistema de detección desarrollado se puede diferenciar, por primera vez en fase gas, 130 ppbV de agente nervioso (DMMP) con un tiempo de respuesta inferior a dos minutos. Ambas características aventuran un futuro sistema de detección tremendamente sensible y selectivo, fiable, barato y de fácil manejo, en resumen, el sistema de detección óptimo para este tipo de aplicaciones.

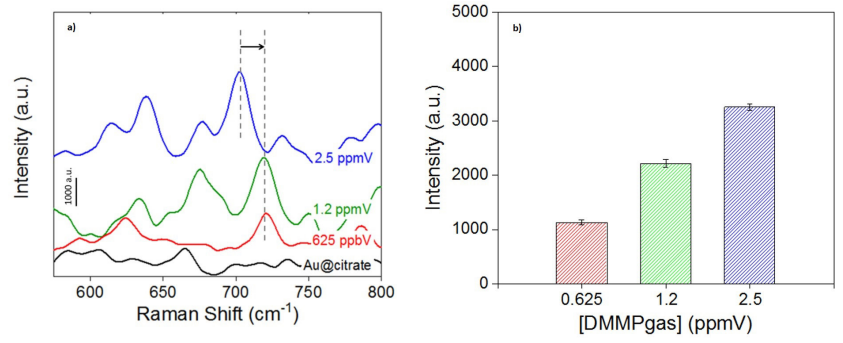

Fig. 7. a) Espectro SERS del DMMP sobre AuNP@citrate cuando se alimentan diferentes concentraciones de DMMP: 625ppbV, 1,2 ppmV y 2,5 ppmV. b) Representación de la intensidad del pico PC del DMMP sobre AuNP@citrate para las tres concentraciones estudiadas. (Fuente: Referencia [13]).

Referencias

[1] Monografía SOPT, consultada en Agosto 2017, http://www.tecnologiaeinno vacion.defensa.gob.es/Lists/Publicaciones/Attachments/11/monograf ia_sopt_11.pdf.

[2] A history of chemical warfare. Coleman, K. Basingstoke, UK: Palgrave Macmillan. 2015.

[3] Detection of gas-phase chemical warfare agents using field-portable gas chromatography–mass spectrometry systems: instrument and sampling strategy considerations.Smith P.A, Koch D, Hook G.L, Erickson R.P, Jackson Lepage C.R, Wyatt H.D.M, Betsinger G, Eckenrode B.A. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2004; 23(4):296-306.

[4] Miniaturized Low-Cost Ion Mobility Spectrometer for Fast Detection of Chemical Warfare Agents. Zimmermann S, Barth S, Baether W.K.M, Ringer J. *Analytical Chemistry.* 2008; 80(17):6671-76.

[5] Tailored surface-enhanced Raman nanopillar arrays fabricated by laser-assisted replication for biomolecular detection using organic semiconductor lasers. Liu S, Lebedkin S, Besser H, Pfleging W, Prinz S, Wissmann M, Schwab P.M, Nazarenko I, Guttmann M, Kappes M.M. *ACS Nano*, 2014; 9: 260-70.

[6] *https://www.opcw.org/,* consultada en Agosto 2017.

[7] Detection of nerve gases using surface-enhanced Raman scattering substrates with high droplet adhesion. Hakonen A, Rindzevicius T, Schmidt M.S, Andersson P.O, Juhlin L, Svedendahl M, Boisen A, Käll M. *Nanoscale,* 2016; 8: 1305-08.

[8] Highly sensitive SERS Quantification of Organophosphorous Chemical Warfare Agents: A Major Step towards the Real Time Sensing in the Gas Phase. Lafuente M, Pellejero I, Sebastián V, Urbiztondo M.A, Mallada R, Pina M.P, Santamaría J. Highly sensitive SERS Quantification of Organophosphorous En revision 2018.

[9] Surface-enhanced Raman spectroscopy of benzenethiol adsorbed from the gas phase onto silver film over nanosphere surfaces: determination of the sticking probability and detection limit time. Biggs K.B, Camden J.P, Anker J.N, Duyne R.P.V, *J. Phys. Chem. A*. 2009. 113: 4581-86.

[10] Surface-Enhanced Raman Detection of Nerve Agent Simulant (DMMP and DIMP) Vapor on Electrochemically Prepared Silver Oxide Substrates.Taranenko N, Alarie J.P, Stokes D.L, Vo-Dinh T. *J. Raman Spectrosc*. 1996; 27: 379-84.

En profundidad

Diseño y fabricación de la estructura de un demostrador de un vehículo 8x8 avanzado híbrido eléctrico

Autores: Rubén Coto González, José Manuel Artímez Encina, Ricardo Álvarez Fernández, Manuel Armindo Guerrero Rosales, ITMA Materials Technology; Daniel Díaz Álvarez, ASTURFEITO, S.A.

Palabras clave: Aceros avanzados, protección balística, integridad estructural, demostrador.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 3.1.4; MT 3.3.1; MT 3.3.2.

Resumen

El principal objetivo de esta investigación ha sido el diseño y la fabricación de la estructura de un demostrador a escala real de un vehículo blindado ligero 8x8, seleccionando los materiales más idóneos para maximizar simultáneamente la integridad y la ligereza de la estructura del vehículo, lo cual permite optimizar la seguridad, durabilidad, maniobrabilidad y autonomía del mismo. Durante el presente trabajo, se ha realizado un completo estudio de selección de los materiales candidatos a ser incorporados a la estructura del vehículo, así como simulaciones numéricas de la estructura, con el objetivo de proporcionarle un nivel de protección balística de Nivel I, según la normativa NATO AEP-55 STANAG 4659, minimizando simultáneamente su peso. El acero balístico ARMOX 500T, con un espesor nominal de 12 mm, ha sido seleccionado como el material idóneo para satisfacer los requisitos del vehículo, y ha sido el material de referencia empleado durante el diseño y ejecución de las uniones soldadas de los componentes que integran la estructura del vehículo. Los resultados de la simulación numérica de la estructura han sido validados mediante la caracterización mecánica de probetas representativas de las uniones soldadas. Por último, se ha fabricado a escala 1:1 la estructura del demostrador del vehículo avanzado híbrido eléctrico, así como el *mock-up* de los dos componentes más críticos, siendo estos dos últimos empleados para su caracterización mecánica, bajo las solicitaciones más restrictivas detectadas durante la simulación numérica.

Introducción

Desde finales del siglo pasado, principalmente a partir de las guerras de Iraq y Afganistán, las fuerzas militares de la mayor parte de los países se enfrentan a nuevos escenarios de combate, inciertos y complejos, que precisan de vehículos adaptados a estos nuevos ambientes, siendo los vehículos blindados ligeros, en sus múltiples versiones: 4x4, 6x6, 8x8, 10x10, una de las opciones más destacables [1].

Este tipo de vehículos militares están basados en un diseño optimizado para maximizar la seguridad de sus ocupantes frente a posibles artefactos explosivos improvisados (IED), identificados como uno de los armamentos más habituales de estos nuevos ambientes de combate, debido fundamentalmente a su reducido coste, facilidad de fabricación, dificultad de detección, etc.

Asimismo, los diseños de las múltiples versiones de estos vehículos blindados ligeros están optimizados para maximizar simultáneamente su ligereza, durabilidad y maniobrabilidad, respecto a vehículos blindados convencionales [2].

Se estima que durante las próximas décadas, la demanda de este tipo de vehículos blindados se incremente notablemente, estando presentes en los principales programas armamentísticos, permitiendo a los ejércitos potenciar sus capacidades para operar en estos nuevos escenarios de conflicto, denominados "híbridos": combinación de medios convencionales y asimétricos, complementando a equipamientos y vehículos pesados más convencionales [3].

El objetivo fundamental del proyecto ha sido desarrollar y validar un demostrador a escala 1:1 de un vehículo híbrido 8x8.

El proyecto ha permitido identificar los materiales candidatos a ser incorporados a la estructura del vehículo 8x8, confiriéndole un nivel de protección balística de Nivel I, según la normativa NATO AEP-55 STANAG 4659, seleccionando el más adecuado para minimizar simultáneamente su peso, así como definir las técnicas y los procedimientos de soldadura más adecuados para asegurar que las uniones de los componentes incorporados a la estructura del vehículo no afecten a la integridad del mismo.

En la figura 1 se muestra los niveles de protección balística STANAG para vehículos militares ligeros [4].

NATO AEP-55 STANAG 4569-Protection levels for Occupants at Logistic and Light Armoured Vehicles

Level	KE Threat	Bullet	Distance	Velocity*
I	Rifle	7.62 x 51 NATO Ball (Ball M80) 5.56 x 45 NATO SS109 5.56 x 45 M193	30 metres	833 m/sec (M80) 900 m/sec (SS109) 937 m/sec (M193)
II	Infantry Rifle	7.62 x 39 API BZ	30 metres	695 m/sec
III	Sniper Rifle	7.62 x 51 AP (WC core) 7.62 x 54 R B32 API (Dragunov)	30 metres	930 m/sec (51AP) 854 m/sec (54R)
IV	Heavy Machine Gun	14.5 x 114 AP / B32	200 metres	911 m/sec
V	Automatic Cannon	25 mm APDS-TM-791 or TLB 073	500 metres	1258m/sec

* Velocity tolerance is ± 20 m/sec

Fig. 1. Requisitos de los niveles de protección balística STANAG para vehículos militares ligeros. (Fuente: NATO Standardization Document Database).

Desarrollo Experimental

La presente investigación comienza con una completa revisión del estado del arte de los aceros empleados actualmente en la fabricación de vehículos, tanto de aplicación civil como militar, incluyendo las calidades convencionales, los nuevos aceros incorporados recientemente, y las recientes aleaciones desarrolladas experimentalmente a escala de laboratorio,

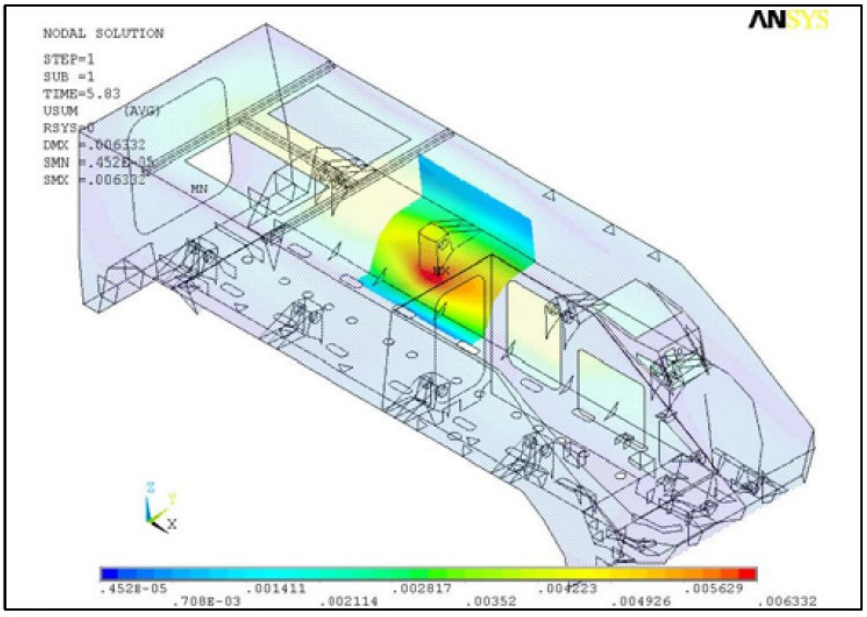

Fig. 2. Simulación numérica de una de las torretas de la suspensión. (Fuente: Proyecto CDTI IDI-20100932).

susceptibles de ser industrializadas e incorporadas al mercado durante los próximos años.

La selección del material idóneo para la fabricación a escala 1:1 de la estructura del demostrador del vehículo híbrido eléctrico 8x8 se ha realizado a partir de un diseño que minimiza el espesor del material y simultáneamente asegura un nivel de protección balística de Nivel I, según la normativa NATO AEP-55 STANAG 4659, referente a los niveles de protección de los ocupantes de los vehículos blindados ligeros, fundamentalmente frente a proyectiles, artillería y artefactos explosivos improvisados (IED).

Posteriormente, se han diseñado los procedimientos de soldadura de cada uno de los componentes de la estructura del demostrador del vehículo blindado ligero, validando metalográfica y mecánicamente los cupones de soldadura elaborados durante la presente investigación.

Una vez identificado el material óptimo y diseñados los procedimientos de soldadura, se ha realizado la simulación numérica del comportamiento mecánico de la estructura 3D del vehículo blindado ligero, mediante el empleo de software CAD y ANSYS®, con el objetivo de optimizar el diseño de la estructura del vehículo, minimizando el peso y asegurando la protección balística.

Las investigaciones detalladas anteriormente han permitido fabricar un demostrador de la estructura del vehículo blindado ligero a escala 1:1, y dos "*mock-ups*" a escala 1:1, empleados para caracterizar mecánicamente los componentes más críticos de la estructura, detectados previamente durante la simulación numérica. Asimismo, el proceso de soldadura de uno de los "*mock-ups*", ha sido simulado numéricamente.

Resultados y discusión

El acero balístico de alta dureza ARMOX 500T [5] con un espesor nominal de 12 mm ha sido seleccionado como el material idóneo para fabricar los componentes de la estructura del demostrador del vehículo 8x8 avanzado híbrido eléctrico, asegurando una protección balística Nivel I según la norma STANAG 4659.

La simulación numérica del comportamiento mecánico de la estructura del vehículo 8x8 se realizó suponiendo todos los componentes fabricados a partir de la citada calidad de acero (ARMOX 500T), optimizando un modelo inicial y evitando la presencia de posibles componentes susceptibles de fallo durante la vida en servicio del vehículo, mediante la incorporación de refuerzos y el cambio de algunas geometrías.

Los resultados de la simulación numérica del comportamiento mecánico de las estructura del demostrador del vehículo 8x8 han identificado una de las torretas de la suspensión, como el componente sometido a mayores esfuerzos mecánicos, tal y como se muestra en la figura 2.

Asimismo, el software ANSYS® ha permitido identificar los componentes de la estructura susceptibles de ser sustituidos por otros de menor espesor. Sin embargo, esta opción no ha sido tomada en consideración durante la fabricación del demostrador: una reducción del espesor implicaría la reducción de la protección balística, haciendo necesario incorporar nuevas calidades de acero balístico dotadas de mayor nivel de protección a esos componentes, y uno de los objetivos iniciales era disponer de una estructura de un solo material para facilitar su construcción.

Fig. 3. Caracterización mecánica a fatiga de una de las torretas de la suspensión. (Fuente: Proyecto CDTI IDI-20100932).

Durante la presente investigación, se han soldado un elevado número de cupones que han permitido diseñar y optimizar las uniones de todos los componentes de la estructura del vehículo, empleando varías tecnologías de soldadura: GMAW-P ("*Pulsed Gas Metal Arc Welding*") con y sin saneado previo de la raíz, GTAW ("*Gas Tungsten Arc Welding*") y GMAW-P + GTAW.

Procesos de soldadura dotados de mayores ratios de productividad, como por ejemplo SAW ("*Submerged Arc Welding*") han sido desestimados debido a la destacable merma de propiedades mecánicas de sus zonas afectadas térmicamente.

El consumible de soldadura empleado durante la elaboración de los cupones ha sido la calidad ER307 (AWS 5.9) con el gas de protección Protar Inox (98% Ar + 2% CO_2), precalentando a 30ºC (temperatura ambiente) y con una temperatura máxima entre pasadas por debajo de 200ºC, para evitar una merma de las propiedades mecánicas del material base.

Con el objetivo de validar los procedimientos de soldeo, se realizó la caracterización completa de los cupones soldados en ángulo y a tope, según los requerimientos de la norma EN ISO 15614-1, y por tanto validar los diseños y procedimientos de soldadura elaborados y optimizados durante la presente investigación.

La caracterización de los cupones se realizó mediante un completo procedimiento de ensayos no destructivos, metalografía y propiedades mecánicas, y los resultados han identificado el proceso de soldadura GMAW-P, como el más idóneo para ser empleado en la fabricación del demostrador del vehículo 8x8, debido a su alta productividad.

Cabe destacar una excepción: la unión soldada de uno de los componentes requiere una combinación de dos procesos de soldadura: GTAW + GMAW-P, debido al diseño estructural, que motiva un problema de accesibilidad al citado componente durante el proceso de fabricación.

Posteriormente, los resultados de la completa caracterización de los cupones soldados fueron validados mediante la caracterización mecánica de dos "*mock-ups*" a escala 1:1, identificados durante la simulación numérica del comportamiento mecánico, como las partes más críticas de la estructura:

Fig. 4. Demostrador a escala 1:1 de la estructura del vehículo 8x8 avanzado híbrido eléctrico. (Fuente: Proyecto CDTI IDI-20100932).

- ***"Mock-up"* del frontal del vehículo**: ha sido sometido a un ensayo de impacto a 20 km/h contra una masa de 2 toneladas, representativo de un impacto frente a un vehículo estacionado.
- ***"Mock-up"* de una de las torretas de la suspensión**: el componente identificado previamente como "más crítico" en la estructura del demostrador, ha sido sometido a un ensayo de fatiga (figura 3) con una carga variable de onda sinusoidal en un rango entre 3000 y 30000 N, con una frecuencia de 4 Hz.

Los resultados satisfactorios de la caracterización mecánica han permitido validar los resultados de la simulación numérica del comportamiento mecánico de la estructura y de la caracterización completa de los cupones de las uniones soldadas, lo cual ha permitido la fabricación del demostrador a escala 1:1 de la estructura del vehículo 8x8 avanzado híbrido eléctrico, tal y como se muestra en la figura 4.

Conclusiones

El presente proyecto ha consistido en el desarrollo experimental de un demostrador a escala 1:1 de la estructura blindada de un vehículo 8x8 híbrido eléctrico.

Se ha seleccionado el material idóneo (ARMOX 500T) para dotar a la estructura del vehículo de una protección balística Nivel I según la normativa NATO AEP-55 STANAG 4659, validando el diseño inicial, mediante la simulación numérica de su comportamiento mecánico. Asimismo, se ha diseñado y validado las uniones soldadas de los componentes estructurales, mediante la caracterización de cupones y de los dos "*mock-ups*" más representativos de la estructura.

Agradecimientos

Los autores de la presente publicación desean agradecer al Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España, la financiación aportada para este proyecto, identificado como IDI-20100932.

Referencias

[1] The market for light wheeled vehicles, McDougall S, 7 Forecast International, 2011.

[2] Armour protection and affordable protection for futuristic combat vehicles, Madhu V, Balakrishna T, Defense Science Journal, 2011.

[3] Armoured vehicles market report, Coward G, International Armoured Conference, 2014.

[4] Procedures for evaluating the protection level of armoured vehicles, Cihangir A, NATO Standardization Document Database (NSDD), 2011.

[5] Ballistic testing of SSAB ultra-high-hardness steel for armor applications, Showalter D, Gooch W, Burkins M, Koch R, Army Research Laboratory, 2008.

Hibridación fuerte INS/GNSS

Autores: Miguel Ángel Gómez López, David Laso Martín, Departamento de Optoelectrónica y Misiles, INTA - "La Marañosa".

Palabras clave: hibridación INS/GNSS, filtrado fuerte, *tight coupling*, PGM.

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

Introducción

En el marco de la Estrategia de la Defensa Nacional Española de Tecnología y la Innovación (ETID) se promueven, entre otras líneas de actuación, las adecuadas para la mejora de la precisión de municiones y armas. Mediante el empleo de tecnologías de control, navegación y guiado, esta mejora de precisión permite, a su vez, una mayor efectividad y eficiencia. Asimismo, se priorizan las soluciones de bajo coste para el uso de estos sistemas guiados en unidades de infantería, artillería y UCAV. La propia ETID destaca al INTA como un actor principal de la I+D+i en defensa, determinando como objetivo clave su trabajo en desarrollos cercanos al producto o sistema que nuestras Fuerzas Armadas demanda.

Los sistemas guiados se han impuesto como solución para actualizar armamento, desde morteros hasta cohetes de helicóptero. Por su capacidad para reducir los daños colaterales, serán probablemente imprescindibles en cualquier operación militar en un futuro cercano.

Se trata de una tecnología desarrollada por el ejército estadounidense partiendo de modificaciones en bombas convencionales, que salió a la luz durante la primera guerra del Golfo y se denominó Joint Direct Attack Munition (JDAM). Con un Kit de guiado provisto de aletas y una navegación por fusión sensorial INS/GNSS (Inertial Navigation System / Global Navigation Satellite System), eran capaces de transformar bombas convencionales en armas con una precisión del orden del metro. En la actualidad esta precisión puede llegar a ser mayor, dotando el kit con un guiado terminal, lo que es conocido como PGM (Precision Guided Munition).

En estos sistemas GNC (Guiado Navegación y Control) la navegación suele ser el primer escollo que

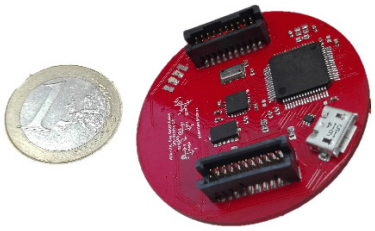

Fig. 1. Prototipo del sensor INS, enmarcado dentro del proyecto SIGMAD. (Fuente: propia).

necesita ser resuelto, el cuello de botella en las aplicaciones, y donde se están invirtiendo mayores esfuerzos. Desde el Área de Misiles del INTA se desarrolla la tecnología de navegación específica para alcanzar este reto tecnológico. Dado que aún con un guiado terminal se sigue dependiendo en gran medida de la navegación GNSS, se implementa un "filtrado fuerte" GNSS/INS. En este filtrado, los observables GNSS (código y fase) son incluidos directamente en el estimador del estado (un MEKF: *Multiplicative Extended Kalman Filter*). Se prescinde así de una solución aislada para el GNSS, permitiendo a su vez que la estimación del estado proporcionada por el INS sea usada para mejorarla, utilizando incluso información de menos de cuatro satélites. Esta hibridación, aunque con una algoritmia más compleja, permite solucionar los retos asociados a las grandes aceleraciones de la dinámica de las PGM, a la vez que es más robusta frente a sus alternativas, especialmente ante perturbaciones tipo "*jamming*" [4].

Fundamentos

Las dinámicas asociadas a este tipo de vehículos tienen el inconveniente de tratarse de dinámicas extremas, y no todos los componentes *hardware* comerciales serán capaces de soportarla sin empeorar sus prestaciones (o deteriorarse y dejar de funcionar durante el vuelo).

Dicha dinámica se compone de una primera fase con una fuerte aceleración inicial de varias decenas de *g* (unidad de aceleración equivalente a la aceleración de la gravedad terrestre), provocada por la combustión del propulsante encargado de impulsar inicialmente el cohete o munición durante unos pocos segundos (1-2 s). Posteriormente, una segunda fase de vuelo afectado sólo por la gravedad y el rozamiento del aire. El vuelo tendrá una duración de entre 12,7 s a 23 s.

En el caso de misiles este primer problema terminaría aquí, pero en el caso de cohetes y munición de artillería (obús 155/52, por poner un ejemplo), se ha de añadir otra complicación. La munición está típicamente estabilizada por rotación, y se encuentra girando sobre su eje longitudinal a una velocidad de unas 200 rps (revoluciones por segundo).

Otro problema a solventar es el implícito de cualquier INS debido a su condición de integrador, puesto que los errores producidos, por pequeños que estos sean, crecerán con el tiempo de forma indefinida.

El INS es un sistema de navegación de tipo "*dead reckoning*" (o navegación a

GNSS e INS tienen características operacionales complementarias:	
GNSS	**INS**
Ventajas	**Ventajas**
▪ **Alta precisión y estabilidad** en el tiempo. ▪ Permite monitorizar los sensores inerciales.	▪ **INS es autónomo**; no hay interrupciones de señal. ▪ Su **frecuencia** de muestreo puede ser **muy alta** (>1000 Hz)
Desventajas	**Desventajas**
▪ **Baja frecuencia** de muestreo (20 Hz) ▪ Susceptible a jamming e interferencias	▪ Calibrado ofrece **alta precisión**, aunque **sólo a corto plazo (errores no acotados en el tiempo)**. ▪ Coste alto si se requiere calidad

Fig. 2. Ventajas e inconvenientes de un receptor GNSS frente a un INS. (Fuente: propia).

Navegación	• Aviación comercial • Aviación militar • Navegación terrestre	Hibridación INS/GNSS para mejor RAIM Poseen < 1nm/hr CEP	0.1 deg/hr
Táctico	• Municiones guiadas • Uso Dual • AHRS • Misiles • RPAS	Llegan a 1 deg/hr Suelen estar sometidos a altas vibraciones 10,000 hr MTBF Aguantan aceleraciones de hasta 20,000g	1.0 deg/hr
Industrial	• Estabilización giroscópica	10 deg/hr (analógicos) BAJO coste	10 deg/hr
Consumidor	• Automoción • Otros	Llegan a vidas útiles de 20 años 2 deg/sec Extremadamente bajo coste	100 deg/hr

Fig. 3. Clasificación de los sensores MEMS atendiendo a distintos aspectos operativos y de aplicación. (Fuente: propia).

la estima o de tipo integrador) que proporciona actitud, velocidad y posición. Está compuesto por un procesador de actitud y un conjunto de sensores de posición. El procesador es el encargado de la integración de las ecuaciones de navegación [1]. Por un lado, el conjunto de sensores se encarga de obtener los valores físicos de la posición. El conjunto básico de sensores está formado por tres giróscopos, que nos permiten obtener las velocidades axiales, y por tres acelerómetros para las aceleraciones de cada eje coordenado. Es conveniente (muy recomendable en general) añadir a los cálculos, mediante técnicas de integración sensorial, los datos proporcionados por tres sensores de tipo magnetómetro. La inclusión del magnetómetro mejora la observabilidad del sistema y elimina la indeterminación alrededor del campo gravitatorio local [2].

Como se intuye, este sistema INS es totalmente autónomo, ya que no necesita ningún elemento externo para proporcionar la posición y actitud del vehículo en el que está instalado (no será afectado por ningún tipo de señal de interferencia) y tiene unas velocidades de actualización altas. Por contra, debido a su condición de integrador, los errores producidos en los cálculos, por pequeños que éstos sean, crecerán de forma indefinida con el tiempo. Además, el sistema tiene unos costes altos si se requiere calidad en sus sensores.

Por otro lado, en general, un receptor GNSS estima la posición y velocidad con gran precisión y con errores que se encuentran acotados en el tiempo en todo caso. El error en la posición puede llegar a ser menor de 1 m [3], pero presenta una frecuencia de actualización uno o dos órdenes de magnitud menores que el INS (un ancho de banda mucho más pequeño). Además puede verse afectado por señales de interferencia (*jamming* o *spoofing*).

Combinando los sistemas GNSS y INS se puede optimizar la determinación del estado, ya que usamos la información del receptor GNSS para realizar una calibración *"on line"* del sistema INS. Esto permite al INS estimar el estado del vehículo (es decir, la actitud, posición y velocidad) de un modo fiable y además, con gran ancho de banda (alta frecuencia). Estimación a su vez necesaria para las consecuentes tareas de control y guiado.

Sensores

Dado que la ETID propone como reto la búsqueda de una solución de compromiso entre el coste del sensor y la precisión de los mismos, es este compromiso el primer dilema al que enfrentarse, siquiera antes de abordar la problemática del cálculo de la actitud y posición del sistema. En los últimos años se ha visto como la tecnología en los sensores ha mejorado ampliamente, y se disponen de sensores de buenas prestaciones a un coste razonable.

Pero ello no exime de realizar una buena elección de los mismos, puesto que se ha de tener en cuenta las variables del entorno en el cual se va a desenvolver, máxime para sistemas de alta dinámica. En el caso abordado, se ha de extremar la precaución tanto con la dinámica como con la temperatura. Ambos factores ponen en riesgo la integridad de las medidas que deben ser empleadas. Conociendo los efectos que estos factores generan sobre las medidas se debe ser capaz de tener un sensor con una alta precisión.

Por lo general, los fabricantes tienen estos dos factores y ofrecen unas características que, si bien para aplicaciones convencionales (*smartphones*, *tablets*, GPS de automoción) funcionan de manera adecuada, los requisitos de esta aplicación concreta son mucho más taxativos.

Es por ello que, se ha puesto el foco en dos aspectos fundamentales: que los MEMS elegidos resistan las altas dinámicas a las que se verá sometido y que los rangos dinámicos sean elevados. Ello implica un alto grado de conocimiento del sensor y la realización de *firmware* específico para nuestra aplicación, pero el esfuerzo permite obtener una calibración detallada de nuestros sensores, lo que aumenta la precisión en las medidas en función de estos dos factores.

Tipos de integración INS / GNSS

La arquitectura de hibridación GNSS/INS depende fundamentalmente de tres aspectos:

- Cómo son las correcciones aplicadas a la solución del INS.
- Qué tipos de medidas del GNSS son usadas.
- Cuál es la técnica y el algoritmo usados para la fusión de la información.

Loose, *Tight*, *Ultra-Tight* ("débil", "fuerte", "muy fuerte") son adjetivos que describen la manera en la que la información de los sensores inerciales y el GNSS son hibridadas para obtener una solución de navegación. En el caso del débil (*Loose*), se mantiene el GNSS y el INS como sensores de navegación separados, con soluciones de navegación independientes (ver figura 2). La información de ambos se une en un tercer filtro, que es a menudo un EKF (*Extended Karman Filter*) dada la no linealidad de las ecuaciones que intervienen. Es este tercer filtro el que proporciona la solución deseada: con errores acotados en el tiempo y el alto ancho de banda característico del INS, lo que en nuestra aplicación de alta dinámica es vital. Además, sobre todo cuando se posee sensores que no son de calidad navegación (menos 2º/h de deriva del

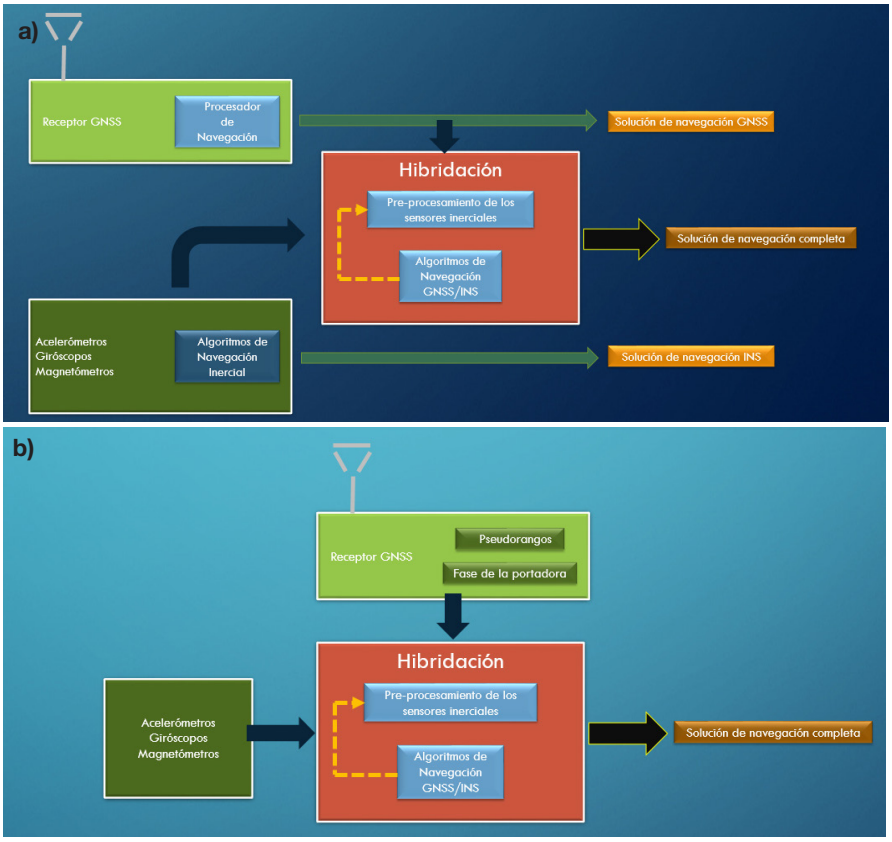

Fig. 4. a) Esquema de filtrado débil. b) Esquema de filtrado fuerte. (Fuente: propia).

giróscopo), se añade una realimentación que corrige los errores asociados a la deriva temporal de las medidas de ambos sensores. Sin esta realimentación, la hipótesis implícita en el EKF acerca de la linealidad durante cada paso temporal de aplicación del algoritmo podría no cumplirse, llevando a la divergencia de la solución [2].

En esta ocasión, se ha usado el llamado filtrado fuerte (figura 4b). En ese filtrado el INS y el GNSS se reducen a una función de "puro sensor". Usando los mismos sensores inerciales, y el mismo receptor GNSS, la solución del filtrado fuerte casi siempre es mejor que la proporcionada por un filtrado débil [4]. El GNSS aporta los pseudorangos y la medida del *Doppler* de cada satélite, mientras que los giróscopos y acelerómetros aportan la velocidad angular y la aceleración respectivamente. Además, en este caso, el sistema de navegación no requiere una solución completa del posicionamiento GNSS para apoyar "ayudar" al INS. Aporta información al filtro, aunque se tengan menos de cuatro satélites a la vista [2], lo que mejora la robustez del sistema de navegación, y esto constituye una de las mayores ventajas respecto al filtrado débil.

Asimismo se eliminan los problemas asociados de usar la solución de un filtro de Kalman como entrada para otro [5].

A los estados de ambos tipos de filtrado, a su vez, se les pueden añadir las componentes correspondientes a los errores de los sensores. Ya que estos errores son estimados con cada nueva iteración, e incluidos durante el pre-procesamiento, permiten mejorar la calidad de las medidas enviadas al filtro. Dada la no linealidad de las ecuaciones, el EKF es prácticamente un estándar, aunque actualmente se investiga con filtros no lineales como el UKF (*Unscented Kalman Filter*) o el filtro de partículas [6].

Otra de las ventajas de la integración fuerte, es que, llegados a este punto, es más sencillo dar el salto tecnológico a la llamada "*ultra tight integration*". Esta última integración añade, en forma de realimentación, la solución de alto ancho de banda proporcionada por el INS como ayuda al bucle de seguimiento del GNSS. Esto permite reducir el ruido, y aumentar la capacidad del receptor GNSS para engancharse al satélite, de forma que se reduce considerablemente la posibilidad de *jamming* [4]

Resultados y discusión

La problemática asociada a realizar medidas en entornos de alta dinámica es doble. Por un lado hay que encontrar sensores capaces de aguantar las grandes aceleraciones iniciales (en torno a los 50 g), así como realizar una medida adecuada una vez pasada la aceleración inicial seguida de la deceleración (en torno a los 20 g) cuando se agota el motor cohete. Hasta hace poco encontrar sensores de calidad táctica con estas características era difícil y bastante costoso. Sin embargo, en la actualidad, con los sensores MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) esto está prácticamente resuelto [7].

Por otro lado, se necesita un receptor GNSS que sea capaz de responder a esta dinámica sin perder señal. Los receptores comerciales de propósito general, incluso de la gama más alta, continúan por el momento limitados para la realización de estas tareas. Ello obliga a recurrir a receptores "ad hoc", [8] o a desarrollos complejos desde las etapas de más bajo nivel [9].

En el Área de Misiles del INTA se ha trabajado en la simulación de vuelos de munición, con el fin de encontrar un algoritmo que permita, mediante hibridación fuerte, obtener una trayectoria hacia el objetivo con un error de centímetros.

Como ejemplo para ilustrar los problemas del filtrado débil, en la figura 5a) se han recogido casos obteniendo los datos de vuelos reales. Los test se realizaron en el laboratorio de guiado del INTA con un receptor comercial y un simulador de señal GNSS. El receptor, se trataba de un modelo M8T del fabricante "UBLOX". El simulador GNSS con el que se cuenta es un modelo GSS8000 de la marca "SPIRENT".

La figura 5a) muestra la trayectoria seguida por el proyectil mientras que la figura 5b) muestra el error del receptor GNSS. La trayectoria se trata de un lanzamiento con un ángulo de 800mils y con la dinámica característica ya comentada anteriormente. En la figura 5a) se comprueba que durante la fase intermedia del vuelo, el receptor GNSS pierde "*fix*", siendo incapaz de proporcionar solución de navegación. En esta fase el dispositivo está sometido a 50 g y la pérdida de señal

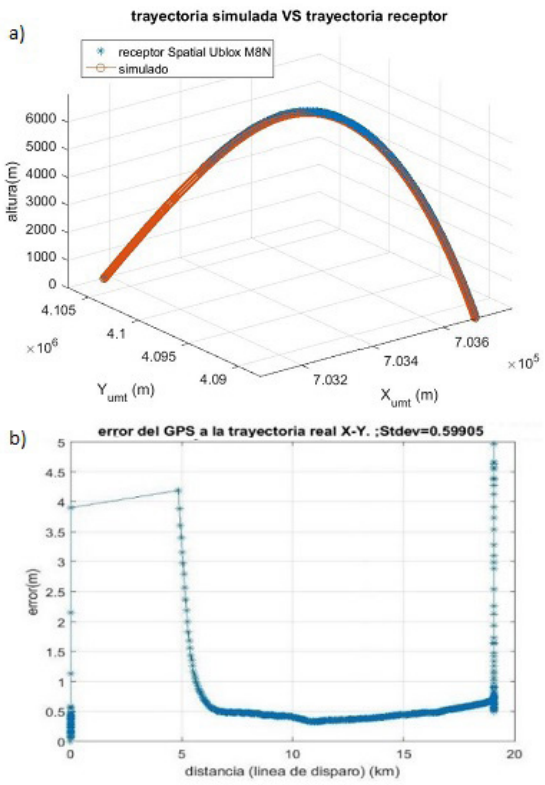

Fig. 5. a) Trayectoria simulada con un GSS8000. En azul posiciones donde el receptor obtuvo fix. b) Errores del receptor GPS. (Fuente: propia).

es prácticamente instantánea desde el momento en que es disparado. En la figura 5b) se puede comprobar que segundos más tarde de perder la señal el receptor la readquiere, pero con un error grande. No es hasta pasados 6 segundos -en el zenit- cuando este error disminuye por debajo del metro.

Téngase en cuenta que la simulación sólo recoge los efectos de las aceleraciones en la señal de radiofrecuencia, no fenómenos físicos asociados a esos 50 g (sensibilidades del reloj interno por ejemplo). Esta pérdida instantánea de "*fix*" tiene una explicación sencilla: los anchos de banda de los bucles de seguimiento de un receptor GNSS son siempre un compromiso entre la capacidad de capturar dinámicas cada vez más extremas y la capacidad de encontrar señal con coberturas limitadas, o resistencia al ruido. Por regla general los receptores comerciales convencionales suelen ir a soluciones que aseguren esto último sobre la capacidad de respuesta dinámica, como es lógico. Sin embargo, si a los bucles de seguimiento se les aporta la solución de navegación del sistema INS (velocidad y aceleración), el receptor GNSS sólo tendrá que 'seguir' el ruido del reloj del receptor y el error en la navegación INS, y no la dinámica completa del vehículo o antena, permitiendo usar anchos de banda más estrechos y aun así seguir la dinámica.

Conclusiones

- Se ha justificado el uso de una hibridación INS/GNSS para esta aplicación.
- El filtrado que más ventajas ofrece es el fuerte, aún a costa de pagar el precio de complejidad en la implementación.
- Tanto simulaciones numéricas como diversos ensayos de laboratorio han sido necesarios para ajustar y validar los algoritmos.
- Se está trabajando en el diseño *hardware*, e introduciendo la algoritmia en un procesador embebido.

Se ha presentado un ejemplo de implementación de un algoritmo de integración fuerte INS/GNSS. El modelo de sistema se realizó mediante cuaternios para definir la actitud, y en estado de errores para: 1) asegurar que dichas variables tendrán valores acotados, 2) disminuir el tamaño del vector de estado, disminuyendo la carga computacional del algoritmo, 3) separar la propagación del estado de su corrección.

El algoritmo empleado para realizar la fusión sensorial es un EKF, en el caso concreto de las PGM va enfocado a poder readquirir la señal del GNSS rápidamente tras el lanzamiento. A su vez, el INS seleccionado es tal que con su ancho de banda es capaz de recoger la dinámica del vehículo. Por último, gracias al uso del filtrado fuerte, se mejora la robustez de la navegación, el receptor GNSS es usado como un sensor más, e incluso sin una solución de navegación se sigue acotando el error producido por la integración de las ecuaciones de navegación.

Referencias

[1] Titterton D, Weston J. Strapdown Inertial Navigation Technology. *Reston: IET*; 2004.

[2] Jay A. Farrel, Aided Navigation Systems: GPS and High Rate Sensors. New York: McGraw-Hill; 2008.

[3] Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. Available from: http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/

[4] Schmidt, G.; Richard E. INS/GPS Integration architectures. NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116, *Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology*, 2011.

[5] Grewal, M. S., L. R. Weill, and A. P. Andrews, Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. *New York: Wiley*; 2001.

[6] Gufsson F. Particle filter theory and practice with positioning aplications. *IEEE Aeroespace and Electronics Magazine*. 2010; 25(7):53-82.

[7] An example available from: http://www.analog.com/media/en/news-marketing-collateral/solutions-bulletins-brochures/MEMS-IMU-Brochure.pdf

[8] Montenbruck O.; Enderle W.; Schesny M.; Gabosch V.; Ricken S.; Turner P. Position-Velocity Aiding of a Mitel ORION Receiver for Sounding-Rocket Tracking. ION GPS 2000 Conference, Salt Lake City, 19-22 Sept. 2000.

[9] Mumford, Parkinson, et al. An open GNSS Research Receiver. *Journal of GPS*. 2004; 3(1-2), 63-69.

Adaptación de nuevos materiales y procesos a munición convencional

Autores: Ángel Cobo Curiel, Zaira Monasterio Peiteado, Juan Ignacio Andrés Gallego, Victor Benito Martín, Expal.

Palabras clave: Polímeros, materiales plásticos, materiales compuestos, impresión 3D, munición de mortero, granada de mortero, bengala iluminante.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 1.1.1; MT 1.1.2; MT 1.4.1.

Introducción

En la última década el empleo de materiales plásticos ha ido en aumento debido a sus innumerables aplicaciones. De acuerdo con los datos presentados por *PlasticsEurope* (Asociación Europea de productores de materias primas plásticas) y EPRO (Asociación Europea de Organizaciones de Reciclaje y Recuperación de Plásticos), la producción de plásticos a nivel mundial creció de 322 millones de toneladas en el año 2015 a 335 millones de toneladas en el año 2016. Este crecimiento evolucionó de 58 millones de toneladas a 60 millones de toneladas a nivel europeo. Destacar también, que la industria de los plásticos en Europa alcanzó un volumen de negocio de casi 350.000 millones de euros en 2016. [1]

El empleo de dichos materiales se ha hecho imprescindible en sectores muy dispares, tales como la medicina, deporte, automoción, agricultura y construcción, entre otros.

El mercado del plástico está sustituyendo, superando en funcionalidad y ciertas características, a los materiales metálicos. Estos materiales, presentan importantes ventajas, tales como gran ligereza, durabilidad, bajo mantenimiento y elevada estabilidad química. Ventajas de especial importancia en diferentes sectores, así como en el sector defensa, ya que confiere a sus productos una mejora en sus prestaciones.

Además de ello, resaltar que este tipo de materiales poseen la gran ventaja de poder ser fabricados mediante impresión 3D, lo cual ha impulsado una nueva vía para la fabricación de prototipos como previo paso a la fabricación de los diseños definitivos de tipo plástico o composite.

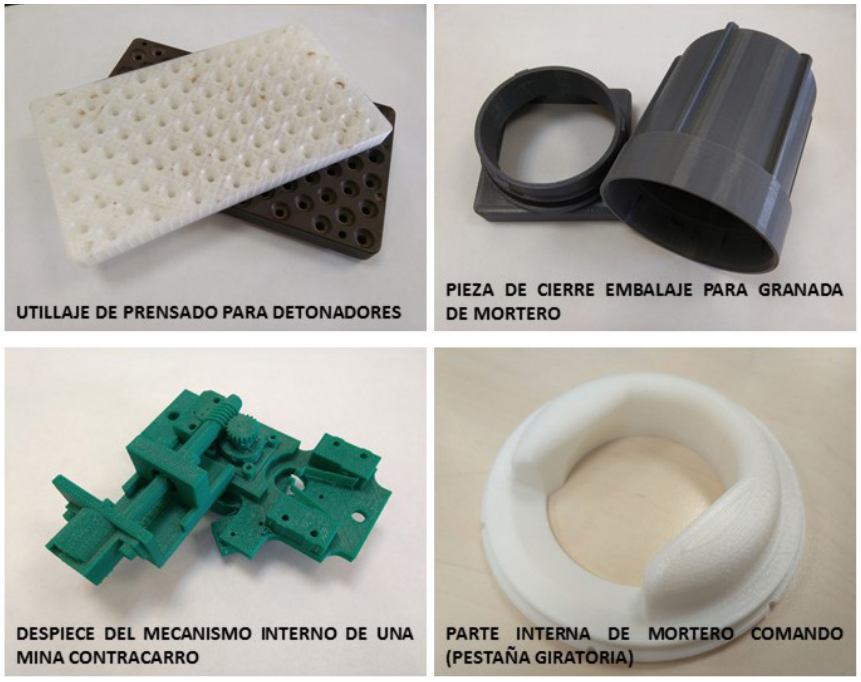

Fig. 1. Prototipos fabricados en diferentes materiales termoplásticos mediante impresión 3D. (Fuente: propia).

La impresión 3D o fabricación aditiva, consiste en la creación de estructuras tridimensionales a partir de un modelo 3D generado con programas informáticos, sin tener que recurrir a moldes o procesos de mecanizado.

Los métodos más conocidos de impresión 3D, son:

- **Modelado por Deposición Fundida (FDM)**: proceso mediante el cual se calientan pequeñas cantidades de polímero termoplástico para ser fundidas capa a capa creando una estructura tridimensional.
- **Estereolitografía (SLA)**: proceso que consiste en la aplicación de un haz de luz ultravioleta para solidificar la resina de un fotopolímero líquido.

Destacar, que dicha tecnología puede ser extendida a una gran variedad de materiales termoplásticos, además de permitir incorporar cualquier tipo de aditivo, con lo que las posibilidades son prácticamente ilimitadas. Así, por ejemplo, el sector defensa está utilizando esta tecnología con las más diversas finalidades:

- Conformación de prototipos basados en materiales energéticos fundibles: propulsantes, iniciadores.
- Elaboración de prototipos sobre piezas sólidas.
- Fabricación de piezas en el campo de batalla.

En la última década, Expal ha detectado en los materiales plásticos y composites una gran opción frente a materiales tradicionales, debido a sus innumerables prestaciones. En la figura 1 se observan cuatro prototipos de aplicación en el sector defensa, tales como utillajes de carga, embalajes, piezas de munición y de armas.

Germen del proyecto: bengala iluminante en munición de mortero

Las granadas, proyectiles, bombas, cohetes, calibres medios, así como armas y morteros, son elementos dónde propiedades tales como el peso, resistencia

Fig. 2. Bengala iluminante de 81 mm en combustión. (Fuente: propia).

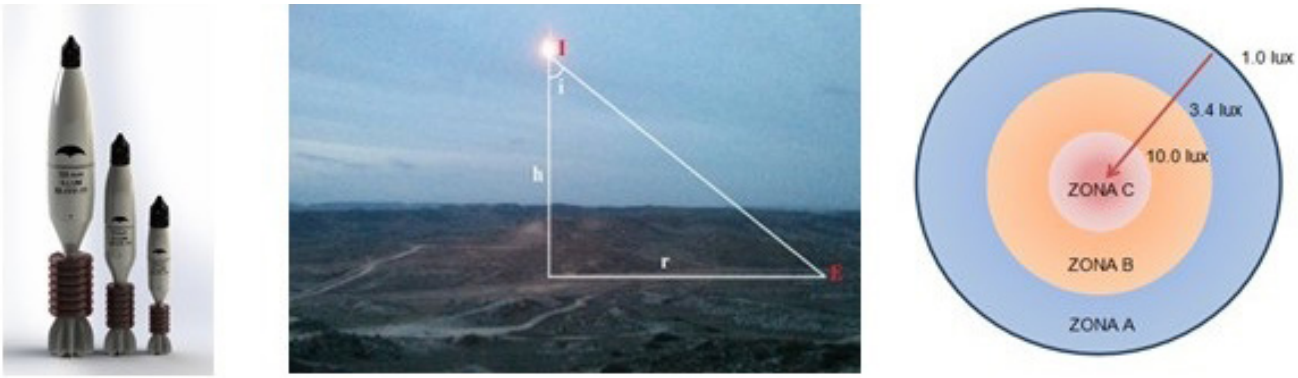

Fig. 3. Requisitos técnicos de las bengalas iluminantes de calibres 60, 81 y 120 mm. (Fuente: propia).

química y mecánica, juegan un papel clave en su seguridad y prestaciones.

Entre la amplia gama de munición, se encuentra la munición de mortero. En los últimos años, se han desarrollado granadas de mortero para una gran variedad de aplicaciones como se observa en sus diferentes versiones en munición para ocultación en el infrarrojo y en el visible, versión RP fumígeno multiespectral, y su versión iluminante IR, visión en el infrarrojo, que completa su ya amplia oferta de versiones: HE, Iluminante, ocultación y de prácticas, todas ellas con unas excelentes prestaciones por su alcance y precisión.

Las granadas de mortero iluminantes son utilizadas principalmente para iluminar un determinado terreno durante un periodo de tiempo concreto. Dicho efecto se consigue mediante la combustión de una mezcla pirotécnica la cual va alojada en un canister que, tras la apertura de la granada, desciende lentamente con ayuda de un paracaídas.

La bengala iluminante, posee principalmente, requisitos técnicos de tiempo de funcionamiento e intensidad luminosa, por lo que un cambio de cualquiera de sus elementos debe cumplir con ambos requisitos.

La superficie de terreno iluminada por una bengala iluminante depende de la altura de apertura de la granada (ver figura 3), la cual, a su vez depende en gran medida del peso del conjunto, entre otras. Cuanto menor es el peso del conjunto, menor es la velocidad de descenso de la bengala, y, por lo tanto, el conjunto puede mantenerse en la altura efectiva de iluminación durante más tiempo. Si se reduce el peso del conjunto y su velocidad de descenso se puede ajustar mejor la altura de apertura para aumentar las prestaciones del producto en cuestión.

Desarrollo del proyecto: bengala iluminante

Los materiales empleados hasta la actualidad en la fabricación de bengalas iluminantes consisten en un cánister de acero laminado en frío en cuyo interior va alojado un tubo de cartón compacto adherido a las paredes interiores del propio cánister. La función principal del material aislante consiste en evitar la corrosión del cuerpo, mejorar la adhesión de la mezcla pirotécnica al cánister y trabajar como aislante cuando esta está en funcionamiento.

Dicho diseño, aparentemente sencillo, lleva implícito varias etapas de montaje:

- Confección del bote y colocación del cáncamo.
- Colocación de la inhibición: cartón.
- Carga de la bengala con mezcla pirotécnica.
- Cierre y sellado.

Éste proceso de montaje, se inicia con la preparación de una resina bicomponente. Ésta es preparada y aplicada de manera homogénea en el interior de dicho cánister, para, posteriormente introducir el tubo de cartón compacto y fijarlo a las paredes.

Resaltar los largos tiempos de espera, principalmente debido al tiempo de curado de la resina empleada en el proceso de adhesión.

Con el objeto principal de disminuir los tiempos de conformado de la bengala y mejorar la calidad del producto eliminando etapas de montaje, surge la propuesta de desarrollo de un nuevo concepto, como puede verse en la figura 4.

Se plantea diseñar un cuerpo que integre el aislamiento, para así reducir etapas de montaje y disminuir tiempos de espera, debiendo ser compatible químicamente con la mezcla, capaz de

Fig. 4. Partes principales de la bengala y prototipo. (Fuente: propia).

Fig. 5. Prototipo por impresión 3D y mecanizado del canister. (Fuente: propia).

soportar los esfuerzos de carga y esfuerzos en el disparo, además de mejorar la calidad del producto y de las prestaciones en vuelo de la bengala.

Se evalúa, por tanto, un cambio en el diseño del cánister para eliminar piezas internas y simplificar el producto mediante el desarrollo de una única pieza basada en un interior tipo rosca que facilite la adhesión de la mezcla pirotécnica a las paredes del cánister. Además, sumamos un cambio en el material del cánister que aporte una mejora las propiedades y/o características finales tales como ligereza, resistencia estructural y estabilidad química, éstas juegan un papel primordial en las prestaciones de este producto.

El nuevo material y proceso de fabricación le aportará una mejor adherencia de la masa pirotécnica al cánister y consecuentemente se podrá reducir la tasa de fallos permitida para este tipo de productos, por lo que la calidad del producto mejorará en comparación con su predecesor.

Prototipos y desarrollo

En una fase inicial, se lleva a cabo el análisis de requisitos y propiedades que ha de cumplir el material empleado en la nueva propuesta de diseño:

- Compatible químicamente con la mezcla pirotécnica.
- Resistente a esfuerzos de carga.
- Operacional en el rango de temperatura de funcionamiento.
- Ser antiestático y/o conductor.
- Capaz de soportar los esfuerzos generados en el disparo.
- Reducir el número de etapas en el montaje y mejora de la calidad del producto final.

En una etapa posterior, se conforma el esquema gestión del desarrollo:

- Fabricación de unidades por impresión 3D con diferentes configuraciones interiores y carga con una mezcla inerte.
- Elaboración de unidades por mecanizado que son cargadas con mezcla inerte para su posterior carga con mezcla real.
- Evaluación de la seguridad del proceso.
- Valoración de productos y revisión de requisitos.
- Montaje del producto final en granada de mortero.
- Fabricación de la matriz para su inyección con materiales compuestos.

Se seleccionan dos materiales plásticos para llevar a cabo el desarrollo del proyecto. Polímeros termoplásticos, tales como polioximetileno (POM) y el polipropileno (PP) son materiales plásticos de gran dureza y resistencia, además de poseer una alta resistencia química. Es importante destacar que el coeficiente estático y dinámico y comportamiento elástico del POM es similar al acero.

Del PP, destacar su elevada resistencia a la fractura por flexión o fatiga, buena resistencia al impacto superior a temperaturas superiores a los 15 °C y su buena estabilidad térmica (coeficiente de dilatación térmica 10 veces la del acero). Además, poseen la gran ventaja de poder ser utilizados en impresión 3D por adicción, en la generación de piezas por mecanizado y en la confección por inyección.

Resaltar que el amplio uso de impresoras 3D, donde se pueden usar estos polímeros, está siendo una revolución que cada día juega un papel más importante en la generación de prototipos. Esta tecnología, hasta la fecha de este proyecto, había sido poco utilizada para confeccionar piezas funcionales y normalmente, orientada a muestras y demos.

Aprovechando la accesibilidad y rapidez en la generación de prototipos mediante impresión 3D, en una primera aproximación, se realizaron distintas configuraciones de canister, en las que se veían modificadas: el tamaño, la profundidad y la distancia entre los surcos generados. Dicha geometría se consideró fundamental para un proceso de carga seguro y una sujeción apropiada a la mezcla pirotécnica.

Fabricación de prototipos

Antes de iniciar esta etapa, se lleva a cabo un estudio de viabilidad desde el punto de vista del proceso y del producto:

Seguridad en manipulación y almacenamiento

Dado que el cánister está sometido a una agresión química a consecuencia de la mezcla energética, la cual

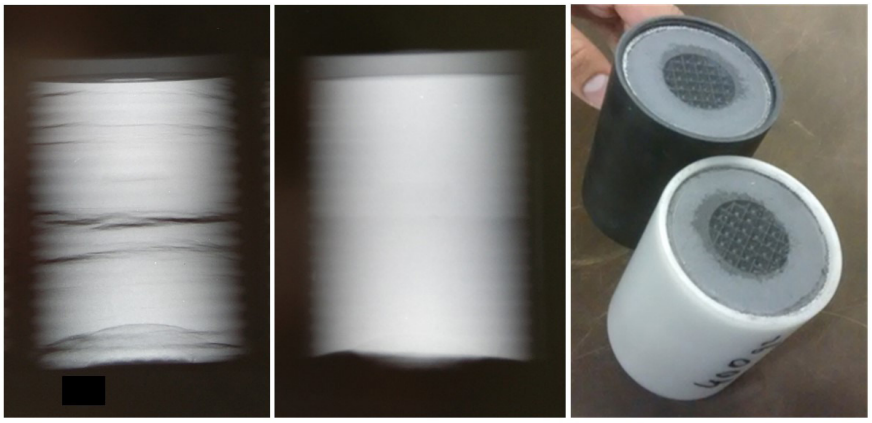

Fig. 6. Radiografiado y prototipos cargados en diferentes materiales plásticos. (Fuente: propia).

Fig. 7. Luxómetro y osciloscopio en túnel de quemado de bengalas. (Fuente: propia).

a su vez está formada por agentes oxidantes y reductores, se realiza un estudio de compatibilidad química de la mezcla energética con cada uno de los materiales de base polimérica seleccionados para la fabricación del cánister. El ensayo de compatibilidad química se realiza mediante calorimetría diferencial de barrido (Differential Scanning Calorimetry, DSC) siguiendo el procedimiento descrito en el STANAG 4147 edición 3, Test 4. [2]

Definición del proceso de carga

Durante el proceso de carga del cánister con mezcla pirotécnica, el propio cánister ha de ser capaz de soportar los esfuerzos de carga. Por lo que se considera esta etapa como uno de los puntos críticos del proceso.

El proceso de carga se efectúa en el interior de una matriz donde se aloja el cánister a estudio, se añade la mezcla pirotécnica para ser prensada por un punzón que realiza 2 prensadas.

La importancia del proceso de carga radica en la necesidad de una distribución de carga homogénea tanto en el alojamiento como entre cargas. El radiografiado de las bengalas cargadas, muestra la homogeneidad durante este proceso.

La homogeneidad en la carga tiene un efecto directo sobre los requisitos de tiempo e intensidad luminosa en el proceso de combustión.

Por motivos de seguridad, se cargaron con mezcla inerte los diseños preliminares de base polimérica realizados por impresión 3D y así caracterizar mecánicamente los mismos, evitando, de este modo, iniciaciones indeseadas

En el proceso de carga, son evaluadas las diferentes configuraciones de cánister fabricadas, aquellas con diferentes tamaños de oquedades/surcos en su interior, así como geometrías. En las pruebas iniciales realizadas, se observó que en determinados cánisters con surcos de pequeño tamaño, daban lugar a oquedades tras el proceso de carga. A medida que se aumentaba el tamaño del surco, se observaban cargas más homogéneas, pero el cánister perdía en algunos casos geometría debido al prensado.

Evaluando el proceso de carga en cánisters fabricados en POM y PP, se observó que el cánister de PP se deformaba más que el cánister de POM.

Evaluación de requisitos

Entre los requisitos a evaluar, se deben tener en cuenta tanto el tiempo de combustión como la intensidad luminosa del producto. En la figura 7 se observa, conjuntamente el equipo y la instalación empleada para tal efecto.

En ella, se muestra la caracterización del proceso de combustión de la bengala. Éste se lleva a cabo en un túnel de ensayos ubicado en las instalaciones de Expal, el cual posee una aspiración vertical y regulación de caudal. A 10 metros de la bengala, en el interior del túnel, se sitúa el equipo de medida, Luxómetro Yokogawa 5002 y Osciloscopio DSOX2014A Keysight Technologies.

Se registra la intensidad luminosa frente al tiempo, como puede observarse en la figura 8.

La homogeneidad de la intensidad luminosa a lo largo del periodo de combustión de la bengala, certifican la idoneidad tanto del proceso de fabricación descrito (condiciones de prensado, etc.) como de la nueva propuesta en el diseño del cánister, materiales y configuración. Los resultados de intensidad luminosa y tiempo obtenidos para ambas bengalas, POM y PP, son muy similares.

Merece la pena resaltar el comportamiento que presenta cada uno de los materiales a lo largo del proceso de combustión. Por un lado, el PP resiste estructuralmente durante el proceso de combustión y no genera residuos, y a diferencia de este, el POM se consume durante proceso de combustión y continúa ardiendo tras el apagado de la bengala.

Seguimiento del trabajo y próximos pasos

El siguiente paso será la conformación de un molde que permita fabricar estos cánister por inyección. El material de base será el polipropileno, se podrán añadir compuestos en función de las características mecánicas y funcionales que se consideren oportunas aportar al producto final.

Si se evalúa por una parte el impacto del uso de impresión 3D sobre el coste de desarrollo, destaca que esta tecnología ha supuesto una enorme reducción en el tiempo de fabricación de los prototipos. El desarrollo de la fase inicial (desarrollo de prototipo de cánister) podría reducirse hasta un 40%, ya que la fabricación de una pieza por impresión 3D es de unas horas. Es un desarrollo autónomo e independiente de terceros. En caso de no haberse realizado de este modo, se hubiese necesitado: mecanización de piezas, embutición de piezas, etc., normalmente son necesarios tiempos medios de espera de 20 a 30 días. Esto unido a la posibilidad de iterar varias veces, reduce los tiempos de adquisición de materiales para prototipos en menos de la mitad de lo que comúnmente hubiese sido necesario.

En este primer desarrollo se ha llegado a verificar los requisitos de esta bengala, habiéndose mostrado resultados positivos. El siguiente paso consistirá en la modificación del cáncamo para poder acoplar el paracaídas y así probarlo en una prueba de disparo real. Este tipo de pruebas se prevé llevarlas a cabo durante el año 2018.

Se prevé que con el nuevo diseño, se alcanzará una reducción en peso del

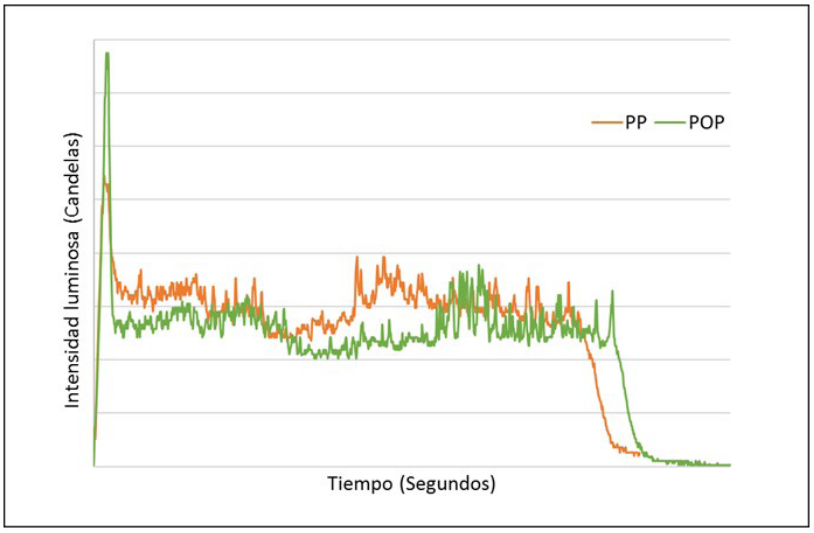

Fig. 8. Curva de intensidad luminosa frente al tiempo. (Fuente: propia).

60%. Debido a dicha reducción, se podría conseguir una disminución en la velocidad de descenso de aproximadamente 1 m/s. Indicar la gran importancia de este hecho, ya que permite disminuir la altura de apertura de la granada de mortero provocando un aumento en el diámetro de iluminación efectivo.

En el plano de la calidad y la fabricación, esta configuración podrían reducir los tiempos de fabricación del producto de hasta un 80%, se pasaría de aproximadamente 1 semana desde la recepción, montaje y carga a un solo día desde la recepción hasta el producto terminado, siendo así más competitivos. Además, habría que sumar que se podría reducir el defectivo de montajes en un 50% (pasar de defectivos de 3 de cada 100 a 1 de cada 100) debido a que una de las operaciones, colocación de la inhibición, cartón, ya no se realizará.

Futuros desarrollos

Debido a los resultados satisfactorios del desarrollo de prototipos tras el desarrollo del proyecto mostrado, tanto a nivel de prestaciones del producto final como en la mejora del proceso de fabricación. Se han detectado otros proyectos susceptibles de utilización de esta tecnología como puesta a punto de nuevos desarrollos, tal y como se muestran a continuación:

- **Munición:** Búsqueda de materiales plásticos y composites capaces de autoextinguirse tras el proceso de combustión de la mezcla pirotécnica, manteniendo las propiedades de ligereza y resistencia química y mecánica.
- **Armas:** Implementación de materiales plásticos y composites como partes de sus componentes con el objeto principal de aumentar la ligereza del producto final, así como la sencillez en el montaje del mismo.

Conclusiones

El uso de tecnología de impresión 3D ha permitido reducir los tiempos de fabricación de prototipos y testeo de materiales en la fabricación de bengalas iluminantes para granada de mortero de 81mm. Pudiendo reducir a futuro, los tiempos de los próximos desarrollos donde se implemente esta tecnología.

Dicha tecnología posee la capacidad de realizar ajustes sobre el piecerío de forma inmediata, dando lugar a una rápida visualización del prototipo para poder fabricar utillajes de montaje y carga, además de gran independencia a la hora de fabricar los mismos. Implantando esta metodología de trabajo se podría llegar a prescindir de la fase de conformación de partes, normalmente metálicas, mediante mecanizado para piezas que no necesiten valores elevados de resistencia estructural o piezas fijas que no sufran desgaste excesivo.

En las pruebas realizadas para la elección del material de base polimérica, el polipropileno ha demostrado un comportamiento adecuado para este producto: bengala iluminante para granada de mortero de 81mm, tanto en las pruebas de carga, como en las pruebas de fuego en estático así como la reducción en el número de etapas en dicho proceso, y, consecuente un aumento en la calidad del producto. Gracias a la reducción de peso del elemento de carga de pago de la granada, el producto final podrá implementar otra serie de composiciones internas que permita mejorar las características actuales del producto en tiempo de luminosidad efectivo e incluso alcance de la granada.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a todos los compañeros que trabajan y colaboran en el grupo Expal. En especial, a los compañeros del departamento de I+D/Tecnología de Expal Systems y a los compañeros de Expal Ordnance, donde se han realizado los prototipos y pruebas mostradas en este artículo. Mención especial para los compañeros del Taller de Prototipos de I+D/Tecnología, Taller de Expal EOR, Health & Safety Expal EOR, Quality Assurance Expal EOR, Ingeniería de Fábrica Expal EOR y los compañeros que trabajan en los pabellones de pirotecnia de Expal EOR, ya que han aportado su granito de arena y su experiencia durante todos los años que hemos compartido con el objetivo de mejorar la seguridad en los procesos y la calidad de todos nuestros productos.

Referencias

[1] Plásticos-Situación en 2017: Un análisis de los datos sobre producción, demanda y residuos de plásticos en Europa. https://www.plasticseurope.org/application/files/1415/2092/9775/Plastics_the_facts-2017-Spanish-web_13032018.pdf

[2] STANAG 4147 Edición 3. Mayo de 2013.

[3] Blay N J, Dunstan I. Compatibility and stability testing of explosives and solid propellants. *Explosives research and development establishment technical report*. 1970.

[4] Shidlovskiy A A. Principles of pyrotechnics. Third edition. *AFN: American Fireworks News*; 1964.

[5] Akhavan J. The chemistry of explosives. *RS·C: Advancing the chemical sciences*. 2004.

[6] Ellern H. Military and civilian pyrotechnics. *Chemical publishing company inc.* 1968.

[7] Military pyrotechnics series. Part two-safety, procedures and glossary. *AMC Pamphlet*. 1963.

[8] Safety standard for explosives, propellants, and pyrotechnics. *National Aeronautics and Space Administration*. 1993.

Boletín de Observación Tecnológica en Defensa

Disponible en

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