

Boletín

DE OBSERVACIÓN TECNOLÓGICA EN DEFENSA



SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PLANIFICACIÓN, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN
Boletín de Observación Tecnológica en Defensa n.º 72 • 1.º trimestre de 2022

TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN DEFENSA

SIRAMIS II: Análisis de la respuesta a la firma en sensores multi-influencia

Proyecto SAFEDRONE: Sistema Radar de Alta Resolución Embarcado en Vehículos Aéreos no Tripulados para la Detección de IED Enterrados





Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

NIPO 083-15-183-4 (edición en línea)

NIPO 083-15-182-9 (impresión bajo demanda)

ISSN 2444-4839 (edición en línea)

Autor: Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT), Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDG PLATIN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM). Paseo de la Castellana, 109, 28046 Madrid; teléfonos: 91 395 52 14 (Dirección), 91 395 52 80 (Redacción); observatecno@oc.mde.es.

Director: Óscar Jiménez Mateo.

Consejo Editorial: José Agrelo Llaverol, Cte. Carlos Calderón. Stte. José María Martínez Benítez.

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

Portada: [physics-g357366516_1920](https://www.pixabay.com)

(Fuente www.pixabay.com).

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. Ningún material publicado en esta revista podrá ser reproducido, copiado o publicado sin el consentimiento por escrito de los autores, legítimos propietarios de los contenidos.

Colaboraciones y suscripciones:

observatecno@oc.mde.es

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

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<https://cpage.mpr.gob.es>

Catálogo de Publicaciones de Defensa:

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

 **SOPT**

DGAM
Subdirección General de Planificación,
Tecnología e Innovación

CONTENIDOS

Editorial

Actualidad

- 4 ¿Dónde hemos estado?
- 5 SIRAMIS II: Análisis de la respuesta a la firma en sensores multiinfluencia

Tecnologías Emergentes

- 6 Tecnologías cuánticas de interés en defensa

En Profundidad

- 10 Proyecto SAFEDRONE: Sistema radar de alta resolución embarcado en vehículos aéreos no tripulados para la detección de IED enterrados

VISIÓN TECNOLÓGICA PARA UNA ERA DE COMPETICIÓN

Recientemente, el Departamento de Defensa de EE.UU. ha publicado el documento *USD (R&E) Technology Vision for an Era of Competition*, que se enmarca en los trabajos para desarrollar su nueva Estrategia Nacional de Ciencia y Tecnología para Defensa.

Dicho documento pone el foco en una serie de aspectos que van a condicionar su respuesta ante los nuevos retos presentes en la que denominan «*nueva era de competición*», caracterizada por amenazas complejas y variadas (desde ciberataques a riesgos para las cadenas de suministro, incluyendo amenazas hipersónicas y riesgos biológicos), así como con competidores estratégicos con un nivel de acceso a las tecnologías actuales hasta ahora no conocido.

En este contexto, prevén basar sus actuaciones tecnológicas en tres pilares: aprovechar su enorme potencial de innovación tecnológica para abordar los retos operacionales, de ingeniería y ligados a las misiones militares más complejas; invertir en personas e infraestructuras para modernizar sus capacidades de ingeniería en laboratorios y centros de ensayos para ser capaces de promover de forma continua actividades de prototipado y experimentación; y, finalmente, reforzar la cooperación tecnológica con grandes ecosistemas de innovación, tanto americanos como del resto de países aliados, de forma que sean capaces de innovar a una velocidad y escala muy superior.

Asimismo, dentro del documento se recoge un conjunto de catorce (14) áreas tecnológicas críticas en torno a las que priorizar sus esfuerzos, las cuales se agrupan en tres

categorías complementarias, lo que refleja los distintos enfoques necesarios para lograr los avances tecnológicos requeridos en esta nueva era.

La primera categoría representa áreas que actúan como semilla de oportunidades emergentes, e incluye biotecnología, tecnologías cuánticas, tecnologías inalámbricas de futura generación y materiales avanzados.

La segunda, de mayor madurez tecnológica que la anterior, incluye áreas de adopción efectiva en las que ya existe una intensa actividad comercial: IA confiable y autonomía, red de sistema de sistemas integrada, microelectrónica, tecnologías espaciales, generación y almacenamiento de energías renovables, computación y software avanzados e interfaces hombre máquina.

Finalmente, señalan un conjunto de áreas de interés específico para la defensa, en las que incluyen las armas de energía dirigida, los sistemas hipersónicos y la integración de sensores de banda ancha capaces de operar en la intersección del ciberespacio, la guerra electrónica, el radar y las comunicaciones.

Son solamente pinceladas de un panorama estratégico para las próximas décadas, muy complejo y exigente, planteado también en la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2020), que refuerza la importancia de invertir en avances tecnológicos de aplicación a defensa empleando múltiples enfoques y formas de cooperación, como medio para asegurar la seguridad y el crecimiento del mundo en el que vivimos.

Actualidad

¿Dónde hemos estado?

2 de marzo de 2022

- «Taller con empresas n.º 13 - Fuerza 2035 - Material de campamento»

El taller, en modalidad presencial en el Mando de Ingenieros del ET en Salamanca y de manera remota por videoconferencia, estuvo dedicado al material de ingenieros. En particular, se trataron nueve áreas de interés: amenaza explosiva; desactivación, minas, artificios y explosivos; apoyo a la contra movilidad; sistemas de reconocimiento y búsqueda militar para ingenieros; medios y materiales para trabajo de ingenieros; sistemas de paso de obstáculos y progresión; fortificación, enmascaramiento y ocultación; trabajo y operaciones en el medio anfibio; sistemas de comunicaciones tipo ATAK; castrametación, apoyo al despliegue y a la población.



8 de marzo de 2022

- **Wokshop Electro Optical Sensors Technologies (EOST) - Project Technical Presentations**

El encuentro se celebró de manera remota mediante videoconferencia y su finalidad fue la presentación de diferentes proyectos tanto en curso en el marco de la EDA como propuestas futuras. Las temáticas principales se centraron en tecnologías optoelectrónicas, de los que se destacan los sistemas multiespectrales e hiperespectrales, así como el procesamiento de imágenes y vídeos mediante inteligencia artificial (IA).



16 de marzo de 2022

- **Jornada de presentación del libro 10 mejores artículos DESEi+d 2020 y presentación del DESEi+d 2022**

El 16 de marzo tuvo lugar en las instalaciones de Isdefe la jornada de presentación del libro Los diez mejores artículos DESEi+d 2020 y el anuncio de la celebración de la IX Edición del Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, con las intervenciones del director general de Enseñanza Militar y el consejero delegado de ISDEFE, y donde el general de división D. José Luis Murga Martínez, subdirector general de Planificación, Tecnología e Innovación, ha anunciado que esta edición tendrá lugar los días 15, 16 y 17 de noviembre de 2022 en la Base General Morillo en Pontevedra.



23 y 24 de marzo de 2022

- **Quantum Business Europe 2022**

Este evento, presentado en modo *online*, reunió a empresas, investigadores y usuarios, con el objetivo de llevar los beneficios de las tecnologías cuánticas a las industrias para tratar de cerrar la brecha entre la ciencia, la investigación y los negocios. Se trató de ofrecer claves a las empresas para comprender el ecosistema de la industria cuántica y su estado de madurez actual, evaluar el potencial de negocio y diseñar una hoja de ruta cuántica clara. Entre los sponsors se encontraban representantes del ecosistema cuántico español como *Qilimanjaro Quantum Tech* o *Multiverse Computing*.



SIRAMIS II: Análisis de la respuesta a la firma en sensores multiinfluencia

Autores: Antonio Sánchez García, responsable de I+D+i y Programas Europeos, Francisco Javier Rodrigo Saura, jefe de la Línea de Seguridad Marítima, SAES S.M.E.

Palabras clave: firmas; multiinfluencia; modelos de propagación submarina; MCM: rastreo de minas.

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 2.4.1, 6.1.3.

Introducción

El pasado mes de diciembre de 2021 finalizó la segunda fase del programa SIRAMIS (*Signature Response Analysis on Multi-Influence sensors*), que se ha desarrollado entre los años 2018 y 2021 en el ámbito del programa UMS (*Unmanned Maritime Systems*) de la EDA, enfocado a mejorar las capacidades europeas en aplicaciones navales relacionadas principalmente con medidas contra minas (MCM).

En SIRAMIS II han participado entidades de cinco naciones: Alemania (WTD-71, *University of Duisburg*), España (SAES), Holanda (TNO, DMO, Marin), Noruega (FFI) y Polonia (*Polish Naval Academy*, PNA), habiendo sido el proyecto coordinado por la organización holandesa TNO. Se ha desarrollado sobre la base de los resultados obtenidos en la primera fase del proyecto (SIRAMIS I), derivados de la ejecución de campañas de medidas de buques mercantes y campañas de medida con fuentes calibradas (Figura 1), que permitió recopilar una amplia base de datos de buques mercantes en escenarios relevantes y realistas. Sobre esta base de datos



Figura 1. Medidas con fuente calibrada en el entorno del puerto de Cartagena en el ámbito de SIRAMIS I. (Fuente SAES S.M.E)

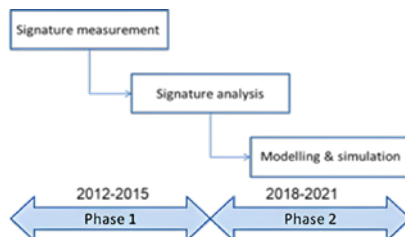


Figura 2. Alcance de las fases I y II del programa SIRAMIS. (Fuente SAES S.M.E)

se llevó a cabo un análisis preliminar de las diferentes influencias evaluadas (acústica, eléctrica, magnética de presión y sísmica) a nivel individual y de correlación entre las mismas.

Por su parte, SIRAMIS II ha complementado los resultados obtenidos en la primera fase del programa (figura 2), centrándose en un análisis más exhaustivo basado en técnicas de modelización de las diferentes influencias estudiadas, incluyendo:

- La definición de un formato común para el almacenamiento de los datos de firma.
- Desarrollo (o mejora) y evaluación de modelos de efectos ambientales y predicción de firmas.
- Utilización de las firmas de SIRAMIS I para inversión de los parámetros del modelo y análisis de estos parámetros para determinar leyes de agrupación y escalado con clase/tipo de buques.
- Evaluación de modelos nacionales de simulación con los criterios de evaluación de firma definidos.

Al igual que en la primera fase, SAES ha liderado el paquete de trabajo específico sobre la influencia eléctrica, además de formar parte de los grupos de trabajo centrados en otras influencias como la acústica y magnética.

Los resultados obtenidos en SIRAMIS II han permitido mejorar el conocimiento y entendimiento de las firmas acústica, sísmica, eléctrica, magnética y de presión. En su ámbito se han desarrollado y mejorado modelos de predicción de firma que han sido comparados entre sí empleando datos simulados (figura

3) y experimentales. También se ha demostrado la adecuación de estos modelos para aplicaciones operativas.

En el ámbito de SIRAMIS II se ha llevado a cabo asimismo la conversión de la base de datos de firmas de buques recopilada en SIRAMIS I a un formato de datos común, lo que ha facilitado de forma importante su análisis, el cual ha revelado los niveles de variabilidad de las firmas y las relaciones de escalado y agrupamientos existentes entre firmas y tipos de buques.

Conclusiones

El proyecto ha cumplido los objetivos establecidos, proporcionando datos, conocimiento y modelos útiles para el desarrollo de diferentes aplicaciones operativas, como rastreo de minas y gestión de firmas.

Como continuación de las líneas de trabajo definidas en las dos primeras fases de SIRAMIS, se ha presentado por parte de TNO en el 41st *CapTech Naval Systems (maritime)* de la EDA la propuesta, para evaluación por parte de los países, del desarrollo de una tercera fase del programa (SIRAMIS III), que tendría como base los resultados obtenidos en las dos primeras fases y estaría enfocada a:

- Desarrollar herramientas operativas para mejorar el proceso de toma de decisiones para la operación y navegación segura de buques en el entorno marino (militar y civil), así como sistemas no tripulados ante la presencia de la amenaza mina.
- Expandir el conocimiento sobre firmas submarinas combinadas y correlaciones entre las mismas como apoyo al objetivo previo.

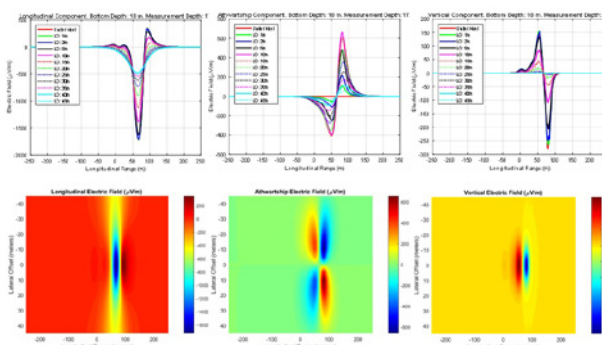


Figura 3. Modelado de las tres componentes de la firma eléctrica submarina en diferentes condiciones operativas. (Fuente SAES S.M.E)

Tecnologías Emergentes

Tecnologías cuánticas de interés en defensa

Autor: Pablo Martínez Mena,
Programas de Plataformas Terrestres,
INDRA

Palabras clave: *qubit*, entrelazamiento, coherencia, fotón, cuántica, disruptivo.

Objetivo tecnológico: Seguimiento de tecnologías emergentes con aplicación futura a defensa.

Introducción

En las últimas décadas se viene gestando lo que se ha denominado *segunda revolución cuántica*¹. Si en los primeros años del s. XX la comprensión de las leyes que gobiernan el mundo a escala nanométrica² no solo cambió nuestra visión de la naturaleza sino que alumbró productos como el láser o el transistor, los progresos recientes en el control de dicho mundo permiten explotar nuevos fenómenos que auguran hitos análogos a la microelectrónica o Internet. El ordenador cuántico persigue superar al ordenador clásico en la velocidad de procesamiento de determinados cálculos gracias al fenómeno de *superposición*³.

Por otro lado, el fenómeno de entrelazamiento (*entanglement*) conecta entre sí partículas cuánticas de forma que los cambios en una de ellas afectan instantáneamente a su compañera, no importa a qué distancia se encuentre, sugiriendo la posibilidad de un Internet cuántico. Si bien la mayoría de estos nuevos desarrollos, agrupados bajo el término *tecnologías cuánticas*, aún se encuentran en niveles bajos de madurez tecnológica, algunas aplicaciones específicas empiezan a introducirse en el mercado. Las altas sumas económicas

¹ El término *cuántico* hace referencia a los paquetes mínimos (*quanta*) mediante los que se transfiere la energía a escala atómica. Este descubrimiento de Max Planck en 1900 marcó el inicio de la primera revolución cuántica.

² Un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro, magnitud próxima al tamaño de los átomos.

³ Fenómeno por el que los *bits* cuánticos o *qubits* pueden encontrarse en distintos estados a la vez.

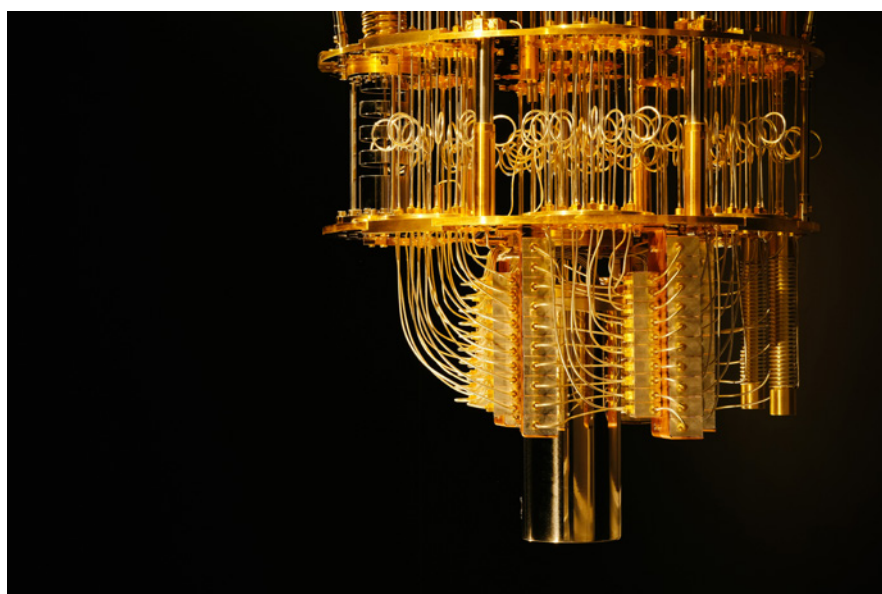


Fig. 1. Ordenador cuántico de IBM. (Fuente: IBM).

que se están invirtiendo en este campo, tanto desde el sector privado como del público, hacen merecedora a esta tendencia de un análisis en cuanto a su aplicación en el sector de la defensa, donde también despierta interés. Las tecnologías cuánticas son un conjunto heterogéneo de equipos y técnicas aplicables a muy distintos casos de uso en dicho sector; en este artículo presentaremos una clasificación de estas tecnologías y analizaremos las aplicaciones de cada categoría más prometedoras para el sector de defensa.

Clasificación de las tecnologías cuánticas y su interés en defensa

Las tecnologías cuánticas suelen clasificarse en cuatro grandes áreas, en función de su aplicación: sensores cuánticos y metrología, comunicaciones cuánticas, computación cuántica y simulación cuántica.

El área de sensores cuánticos y metrología abarca distintos dispositivos y técnicas para medir magnitudes físicas como la radiación electromagnética (imagen o iluminación cuántica), aceleraciones (sensores inerciales basados en interferometría de átomos), campos magnéticos (sensores magnéticos basados en centros nitrógeno-vacante en diamante) o el tiempo (relojes atómicos) [1]. En general, estos sensores hacen uso de los

fenómenos y tecnologías cuánticas para superar la precisión o la sensibilidad de sus contrapartidas convencionales o clásicas. Esta mejora en el desempeño del sensor es la que puede ser aplicada en defensa con el fin de detectar amenazas o disponer de información más precisa sobre el entorno (mejora de la conciencia situacional).

Las comunicaciones cuánticas comprenden las aplicaciones para transmitir información o garantizar la seguridad de la misma, siendo ambas aplicaciones claves en defensa. El ámbito de la criptografía cuántica ha avanzado con rapidez debido a la amenaza que supone la capacidad de proceso del ordenador cuántico para la seguridad de los sistemas actuales de cifrado. Esto ha motivado una carrera por encontrar nuevos métodos de securización de la información, entre los que destaca la distribución cuántica de claves (*Quantum Key Distribution* o *QKD*) [2] y la criptografía poscuántica⁴.

El ordenador cuántico supondría un salto de gigante respecto a la capacidad de cálculo de los ordenadores

⁴ La criptografía poscuántica no es estrictamente una tecnología cuántica; su objetivo es buscar operaciones que no puedan ser eficientemente ejecutadas en un ordenador cuántico para utilizarlas en nuevos protocolos de criptografía.

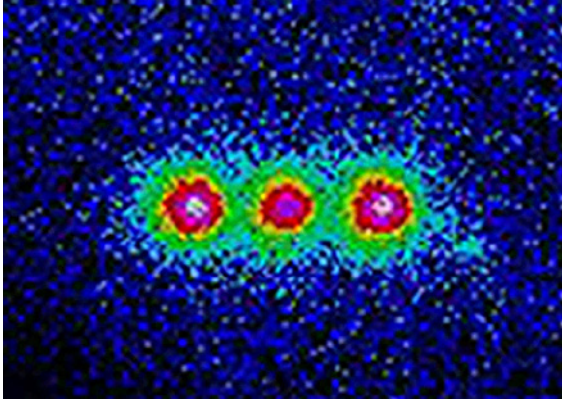


Fig. 2. Tres iones de berilio atrapados. (Fuente: NIST).

actuales [3]. Las primeras propuestas de implementaciones físicas del ordenador cuántico⁵, junto con el desarrollo de algoritmos que permitirían realizar operaciones de forma más rápida que los ordenadores actuales, desataron la carrera por obtener un ordenador cuántico con aplicaciones reales. En la actualidad, hay varias implementaciones de un ordenador cuántico basadas en distintos métodos: trampas de átomos gaseosos ultrafríos, circuitos superconductores, etc. que aún han de superar arduos retos técnicos.

Por último, el área de simulación cuántica pretende comprender el funcionamiento de sistemas complejos mediante el análisis de sistemas cuánticos modelo [4]. Este área es de sumo interés en ciencia básica, pues podría ayudar al progreso en la caracterización de materiales o moléculas. En la industria de defensa, los avances en el área de simulación cuántica podrían aplicarse indirectamente mediante la obtención de nuevos materiales (más ligeros o resistentes), nuevos fármacos (antídotos para agentes de guerra química), etc.

Aplicaciones de sensores cuánticos y metrología

Imagen cuántica y radar cuántico. Las técnicas de imagen cuántica explotan el carácter corpuscular de la luz (es decir, su constitución por partículas llamadas fotones) y el alto control que se ha obtenido sobre los mismos para iluminar los objetos con haces de luz de características especiales que permiten superar los límites a la resolución que encuentran las

técnicas convencionales [5]. Por ejemplo, la disponibilidad de fuentes de fotones individuales, generados a intervalos de tiempo determinados, permite obtener relaciones señal-ruido inferiores al ruido de disparo (*shot noise*) causado por las fluctuaciones en el flujo de fotones y que constituía un umbral mínimo en los detectores de luz y en los sistemas de comunicaciones ópticas.

Otra barrera bien conocida en óptica clásica es el límite de Rayleigh: el comportamiento ondulatorio de la luz convierte fuentes luminosas puntuales en una serie de discos concéntricos e impide distinguir entre sí puntos cuya separación angular sea menor que un valor determinado por la relación entre longitud de onda y la apertura con que se observa. Este límite también ha sido superado gracias al uso de estados cuánticos especiales de la luz en aplicaciones de microscopía o astronomía, aunque se espera que estas técnicas se utilicen también en la mejora de otros equipos ópticos como cámaras visibles o térmicas.

Una técnica que revela las extrañas leyes que gobiernan el mundo cuántico es la denominada *ghost imaging*. En esta técnica se explota la correlación o el entrelazamiento (*entanglement*) entre dos haces de fotones. El entrelazamiento es un fenómeno cuántico que consiste en el vínculo que se establece entre dos partículas (en este caso fotones) en el momento de su generación y que nos permite identificar uno de ellos mediante su compañero. En el *ghost imaging* se envía un primer haz de fotones al blanco, recibiendo en un detector sin resolución espacial (solo tiene un píxel) aquellos que se reflejen en el mismo (es decir, solo detecta si un fotón ha dado en el blanco, pero no en qué lugar del mismo). Simultáneamente, se envía el haz de fotones entrelazados con el primero hacia un segundo detector, este sí con resolución espacial, en el que, al combinarlo con la señal del primer detector, se forma la imagen del blanco. Lo notable es que la imagen la forma el haz que no ha interactuado con el objeto. Esta técnica promete obtener imágenes con niveles tan bajos de iluminación como unos pocos fotones por

pixel, en comparación con las decenas de miles necesarios en los sistemas convencionales [6].

Por último, un desarrollo prometedor, aunque aún en un nivel de TRL⁶ bajo, es el *radar cuántico* [7]. Este se basa también en el entrelazamiento entre parejas de fotones, en este caso en el rango de las microondas, y consiste en emitir un haz de fotones compuesto por uno de los miembros de cada pareja e identificarlos entre la radiación incidente en el receptor gracias a la interacción con su compañero que hemos conservado en el equipo. Aunque se estiman necesarios todavía bastantes años de desarrollo hasta tener un equipo comercial de estas características, los resultados teóricos aseguran una mejora de la relación señal-ruido de 6dB (equivalente a un aumento del 41 % en el rango de detección máximo del radar) frente al máximo teórico obtenible con técnicas clásicas. Además, la detección podría realizarse con un flujo muy pequeño de fotones lo que permitiría permanecer indetectable al blanco.

Sensores inerciales y gravimétricos. Dentro de la capacidad de conciencia situacional, los servicios PNT (*Position-Navigation-Timing*), suministrados habitualmente por sistemas de navegación como el GPS, son básicos para el desempeño de las misiones. Sin embargo, la posibilidad de interferir la señal de GPS (mediante las técnicas denominadas *jamming* o *spoofing*), o su indisponibilidad en entornos cerrados, ha motivado la búsqueda de soluciones independientes de los mismos. En este área,

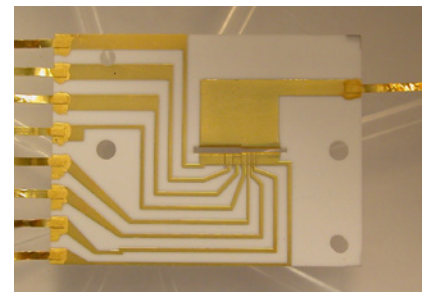


Fig. 3. Trampa de iones. (Fuente: NIST).

⁶ *Technological Readiness Level* es una escala para determinar el grado de madurez de un producto o técnica, abarcando desde niveles de baja madurez (TRL 1-TRL 3) relativos a un estado de idea o prueba de concepto, hasta el TRL 9 consistente en un sistema probado con éxito en entorno real.

⁵ La primera propuesta fue publicada por el físico español J. I. Cirac y el físico austriaco P. Zoller en 1995.

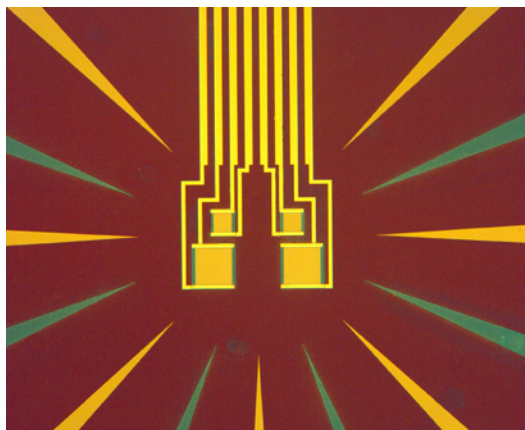


Fig. 4. Detector de fotones individuales. (Fuente: NIST).

algunos desarrollos de sensores cuánticos inerciales o gravimétricos han atraído el interés de organismos de defensa y empresas. Estos sensores se basan en celdas en las que se confina una nube de átomos gaseosos ultrafríos. A temperaturas de unas pocas millonésimas de grado sobre el cero absoluto, los átomos se encuentran en un estado cercano a la inmovilidad (por comparación, a temperatura ambiente la velocidad media de una molécula de oxígeno es de unos 500 m/s) lo que los hace muy sensibles a la inercia o a la gravedad. Esto permitiría utilizarlos como sistemas inerciales de navegación que no requerirían comunicaciones externas, y por tanto serían imposibles de interceptar, mientras que los sensores gravimétricos podrían detectar las anomalías del campo gravitatorio terrestre que previamente mapeadas constituirían una referencia precisa de la posición. Los equipos desarrollados hasta la fecha son muy voluminosos debido a las bajas temperaturas de operación, lo que requiere equipos de criogenia, y aún están en los inicios de su uso comercial, si bien en defensa podrían ser utilizados en el futuro en distintas plataformas (como por ejemplo, navales).

Sensores magnéticos. Un tipo de sensor cuántico que ha despertado mucho interés recientemente son los centros nitrógeno-vacante (NV) en diamante. Estos centros son defectos en la estructura cristalina del diamante en los que dos átomos de carbono son sustituidos por un átomo de nitrógeno, quedando una posición vacante.

El centro NV en diamante constituye un sistema cuántico con una

alta sensibilidad a los campos magnéticos y eléctricos (existen desarrollos con capacidad para detectar campos magnéticos de nanoTeslas), lo que junto a otras características como su facilidad de producción, biocompatibilidad o funcionamiento a temperatura ambiente, lo postula como candidato a ser usado como sensor o *qubit*.

Aplicaciones de comunicaciones cuánticas

Las comunicaciones cuánticas consisten en la transmisión de información por canales habituales, como pueden ser fibra óptica o el espacio libre, si bien se utilizan protocolos o técnicas que aplican propiedades cuánticas de la luz. Una de las aplicaciones más maduras en este campo es la distribución cuántica de claves criptográficas (*quantum key distribution* o QKD), codificadas mediante la polarización de fotones individuales y haciendo uso del protocolo BB84 o el E91, principalmente. Estos protocolos garantizan la seguridad de la información, pues están basados en una propiedad fundamental de los sistemas cuánticos: cualquier observador que intercepte el mensaje lo alterará irremisiblemente, de forma que no podrá dejar de ser advertido por el receptor. Ya se han desplegado y puesto en operación algunas redes de comunicaciones a escala urbana (Madrid desplegó una infraestructura que integra las comunicaciones cuánticas en redes ópticas convencionales, *MadQCI - Madrid Quantum Communication Infrastructure*) e incluso China ha demostrado en 2018 la distribución cuántica de claves mediante su satélite *Micius* [8], consiguiendo generar y compartir claves a distancias superiores a 1.200 km. La distribución cuántica de claves a través del espacio libre, mediante satélite o drones, podría resultar útil en escenarios operativos. A pesar del éxito inicial, estos sistemas siguen teniendo

vulnerabilidades y limitaciones. Por ejemplo, la debilidad de la señal que protege su interceptación también limita su propagación por fibra óptica más allá de pocos centenares de kilómetros, siendo necesario desarrollar repetidores cuánticos.

Aplicaciones de computación cuántica

Los ordenadores cuánticos podrían realizar determinadas operaciones mucho más rápido que un ordenador convencional debido a la característica cuántica de la superposición. Es conocido que los ordenadores clásicos codifican la información mediante *bits*. Cada *bit* puede tener dos valores (1 o 0), que corresponden a la circulación o no de electrones a través de los circuitos electrónicos. Los ordenadores cuánticos, en cambio, codifican la información en *qubits*; cada uno de estos *qubits* es un sistema cuántico que también puede tener dos estados, 0 y 1, o la superposición de ambos estados a la vez. Los *qubits* utilizados pueden ser elementos como un átomo (con un estado de energía en reposo y otro excitado) o un fotón (con dos polarizaciones distintas).

La diferencia entre los *bits* y los *qubits* es que uno de estos últimos pueden encontrarse, en un momento determinado, en una combinación de ambos *a la vez*. Esto es lo que se denomina *superposición* y es un fenómeno

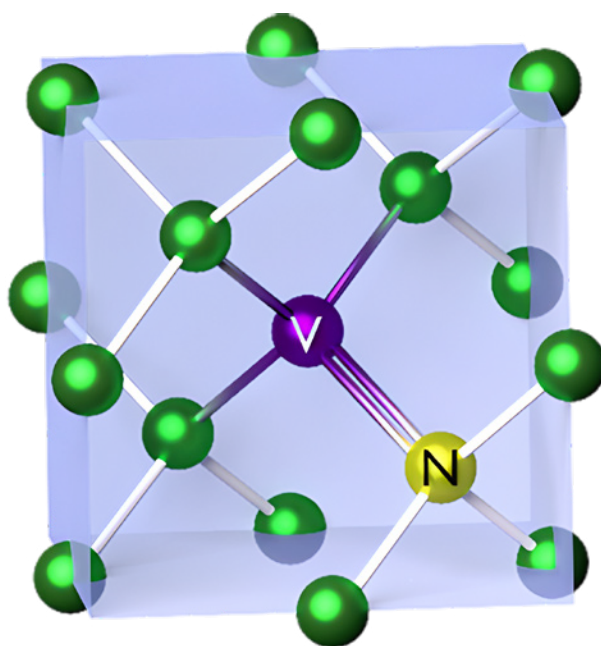


Fig. 5. Centro NV en diamante. (Fuente: NIST).

característico y sorprendente del mundo cuántico. La superposición amplía el número de estados diferentes que se pueden representar con una cantidad de *qubits*. Si con tres *bits* clásicos podemos representar cada vez uno de los 8 estados de tres *bits* posibles (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 y 111), con tres *qubits* podemos codificar los ocho estados simultáneamente. Esto permitirá a los ordenadores cuánticos realizar búsquedas o cálculos de optimización mucho más rápido que los ordenadores convencionales: si un ordenador clásico, para encontrar la ruta idónea entre $N=1.000.000$ caminos, tendrá que ir explorándolos todos sucesivamente hasta encontrar el más corto, con lo que tendrá que efectuar del orden de $N/2$ pasos o iteraciones, (es decir, 500.000 pasos), un computador cuántico con el número adecuado de *qubits* podrá explorar todos los caminos a la vez y solo precisará del orden de $N^{1/2}$ operaciones (1.000 iteraciones).

Algunas de las operaciones para las que se dispone ya de algoritmos implementables en ordenadores cuánticos (aunque a pequeña escala), son:

- El algoritmo de Grover que acelera las operaciones de búsqueda de bases de datos y optimización.
- El algoritmo de Shor que mejora exponencialmente la velocidad de factorización de números respecto a sus contrapartidas clásicas, lo cual es útil en criptografía.
- El algoritmo HHL que resuelve eficientemente algunos cálculos de álgebra lineal que pueden ser útiles en *machine learning*.

Aparte de los beneficios generales que puede suponer la mejora del tiempo de procesamiento en los cálculos citados, y que tendrá aplicaciones en logística, finanzas, inteligencia artificial y el modelado de sistemas complejos también aplicables en defensa, el algoritmo de Shor plantea serias amenazas pues compromete la seguridad de los sistemas de cifrado de clave pública o criptografía asimétrica. En estos sistemas, la clave pública y la clave privada es un número muy grande que se obtiene multiplicando dos números primos entre sí y se utiliza para cifrar el mensaje que solo el poseedor de los

dos factores primos podrá descodificar. La seguridad de esta técnica reside en el largo tiempo que debería emplear un ordenador convencional en hacer el cálculo inverso, es decir, factorizar la clave pública. Pero esta dificultad desaparece para los ordenadores cuánticos. Se estima que un ordenador cuántico de entre 1.500 y 2.330 *qubits* que ejecutara el algoritmo de Shor podría vulnerar toda la criptografía actual (en 2019 Google presentó su ordenador cuántico Sycamore de 53 *qubits*, que ha sido superado recientemente por el Eagle de IBM con 127 *qubits*, aunque las capacidades de este último aún están por demostrar plenamente). Sin embargo, a pesar de la carrera por alcanzar las primeras aplicaciones reales en las que un ordenador cuántico supere a uno convencional, la denominada *supremacía cuántica* [10], las distintas arquitecturas físicas mediante las que se está abordando la construcción de ordenadores cuánticos, se enfrentan a retos técnicos importantes. En general, la sutileza del mundo cuántico hace a los *qubits* muy sensibles a las interferencias del entorno, destruyendo la superposición (*decoherencia*) e introduciendo errores en el procesamiento que han de ser detectados y corregidos mediante el aumento del número de *qubits*.

Conclusiones

Las expectativas sobre las tecnologías cuánticas difundidas por los distintos grupos de investigación y empresas son valoradas a la vez con entusiasmo y cierto escepticismo. Existe el temor razonable de que el largo plazo necesario para que las tecnologías cuánticas se materialicen en productos y usos reales desembogue en una fase de desilusión semejante al denominado *invierno* que atravesó a la inteligencia artificial desde los años 60 del siglo pasado hasta su resurgimiento en el actual [11]. Sin embargo, la diversidad de tecnologías y aplicaciones en desarrollo asegura que, si bien no cumplan

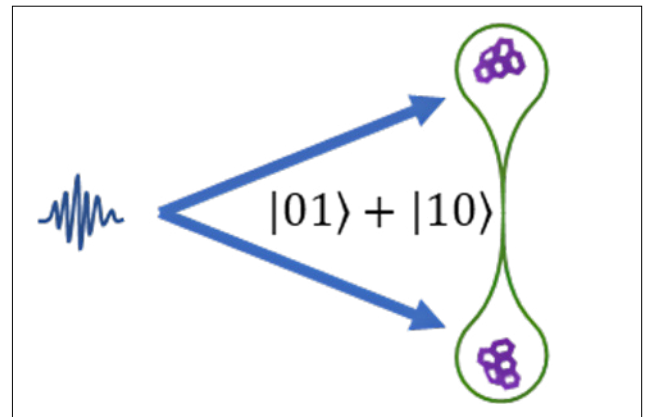


Fig. 6. Representación gráfica del principio de superposición. (Fuente: NIST).

en todos los casos las altas expectativas iniciales, sí serán posibles finalmente numerosas aplicaciones que sin duda encontrarán su lugar también en la industria de defensa.

Referencias

- [1] Degen C.L., Reinhard F. y Cappellaro P. (2017). *Quantum sensing*. Rev. Mod. Phys. 89. arXiv:1611.02427
- [2] Bennett C.H., Brassard G. y Ekert A.K. (1992). Criptografía cuántica. Investigación y Ciencia, diciembre, 14-22.
- [3] Nielsen M.A. y Chuang I.L. (2000). *Quantum computation and quantum information*. Cambridge University Press.
- [4] Morsch O. y Bloch I. (2015). Mundos cuánticos simulados. Investigación y Ciencia, mayo.
- [5] Genovese M. (2016). *Real applications of quantum imaging*. Journal of Optics, 18. arXiv:1601.06066
- [6] Morris, P., Aspden, R., Bell, J. et al. (2015). *Imaging with a small number of photons*. Nat Commun 6, 5913. <https://doi.org/10.1038/ncomms6913>
- [7] Barzanjeh, S., Pirandola, S., Vitali, D. y Fink, J. M. (2019). *Experimental Microwave Quantum Illumination*. arXiv quant-ph/1908.03058v1
- [8] Gibney, E. (2016) *Chinese satellite is one giant step for the quantum internet*. Nature 535, 478-479. <https://doi.org/10.1038/535478a>
- [10] Arute, F., Arya, K. y Babbush, R. et al. (2019). *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor*. Nature 574, 505-510. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
- [11] O. Ezratty. *Mitigating the quantum hype*. (2022). <https://arxiv.org/abs/2202.01925>

En Profundidad

Proyecto SAFEDRONE: Sistema radar de alta resolución embarcado en vehículos aéreos no tripulados para la detección de IED enterrados

Autores: María García-Fernández, Guillermo Álvarez-Narciandi, Yuri Álvarez López, Fernando Las-Heras Andrés, Universidad de Oviedo.

Palabras clave: georradar (*Ground Penetrating Radar, GPR*), vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles, UAV*), radar de apertura sintética (*Synthetic Aperture Radar, SAR*), detección de artefactos explosivos improvisados (*Improvised Explosive Devices, IED*).

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 2.2.2; 2.2.4; 7.4.2; 10.1.1.

Introducción

En el contexto de las campañas de desminado llevadas a cabo en el ámbito civil o militar, la detección precisa, fiable y segura de minas contrapersonal y de artefactos explosivos improvisados (*Improvised Explosive Devices, IED*) es de vital importancia. Dicha capacidad de detección es también fundamental para garantizar la integridad y seguridad de convoyes militares en zonas de conflicto. A tal fin, se ha considerado el uso de diferentes tecnologías y sensores tales como detectores de metal, magnetómetros, cámaras infrarrojas, y georradars (*Ground Penetrating Radar, GPR*).

Los sistemas de detección de minas contrapersonal e IED deben hacer frente a varios retos, entre los que destacan: 1) los objetos explosivos enterrados pueden estar compuestos por diferentes materiales (metálicos y/o no metálicos), presentar geometrías o formas diversas y estar enterrados a diferentes profundidades; 2) deben garantizar la seguridad de los operadores, ofreciendo una distancia de seguridad entre el dispositivo

encargado de realizar el escaneo y el terreno inspeccionado.

La detección de objetos enterrados con poco o ningún contenido metálico se puede realizar empleando un GPR, cuya capacidad de detección está condicionada principalmente por la frecuencia de operación. En concreto, es necesario establecer una relación de compromiso entre la resolución espacial, que se incrementa al aumentar la frecuencia, y la capacidad de penetración de las ondas electromagnéticas en el terreno, que disminuye al aumentar la frecuencia de operación [1,2].

Para garantizar una distancia de seguridad suficiente con la zona escaneada típicamente se han empleado sistemas *stand-off*, donde las antenas GPR apuntan hacia el suelo con un ángulo muy rasante. Sin embargo, estos sistemas presentan un rango dinámico limitado, dado que no se produce reflexión especular de las ondas electromagnéticas en los objetos enterrados.

En los últimos años, los avances tecnológicos y el incremento de las prestaciones de los vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles, UAV*) junto con las mejoras de los sistemas radar, han posibilitado la integración de sistemas GPR en UAV, permitiendo realizar el escaneo de una determinada zona sin entrar en contacto con el suelo. La mayoría de los prototipos de GPR embarcado en un UAV (véase [3-8]) operan en bandas de frecuencia comprendidas entre 400-600 MHz y 4-5 GHz, dado que así se logra un buen equilibrio entre profundidad de penetración y resolución espacial.

En este contexto, el proyecto SAFEDRONE constituye el primer proyecto de I+D dedicado exclusivamente al desarrollo de prototipos de GPR embarcados en UAV para la detección precisa y segura de minas contrapersonal e IED en España, siendo además pionero a nivel mundial. El proyecto SAFEDRONE ha

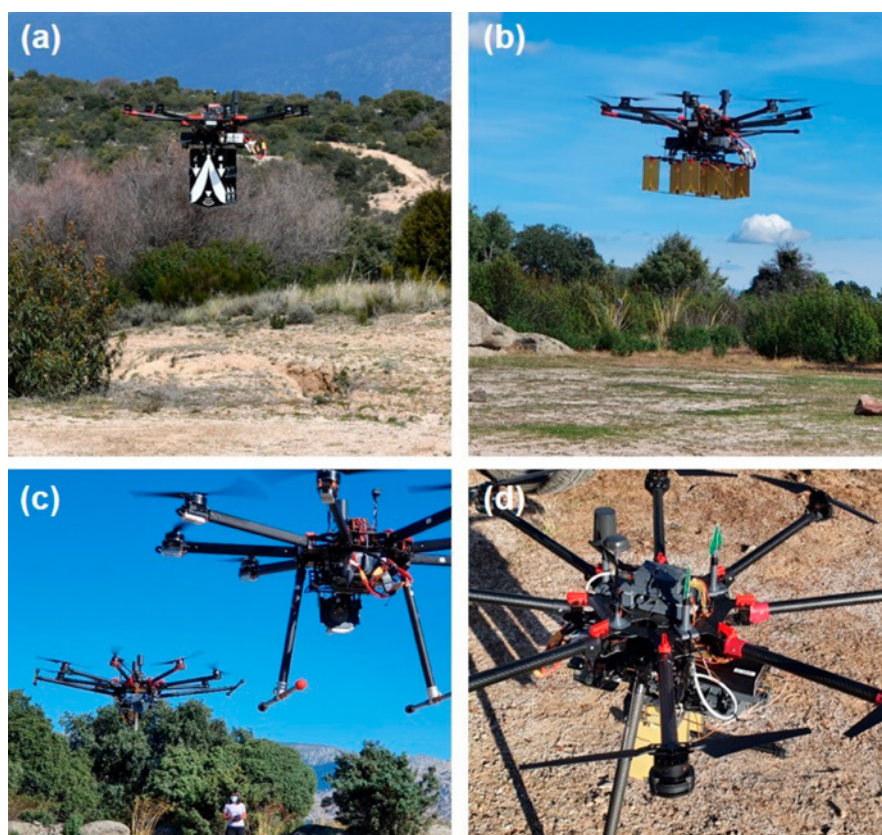


Fig. 1. Fotografías de los prototipos desarrollados en el proyecto SAFEDRONE durante las pruebas de validación finales (octubre de 2021). (a) Arquitectura DL-GPR. (b) Arquitectura DL-GPR con *array* de antenas. (c) Arquitectura FL-DL-GPR. (d) Prototipo con módulo radio de largo alcance para las pruebas BVLOS. (Fuente propia).

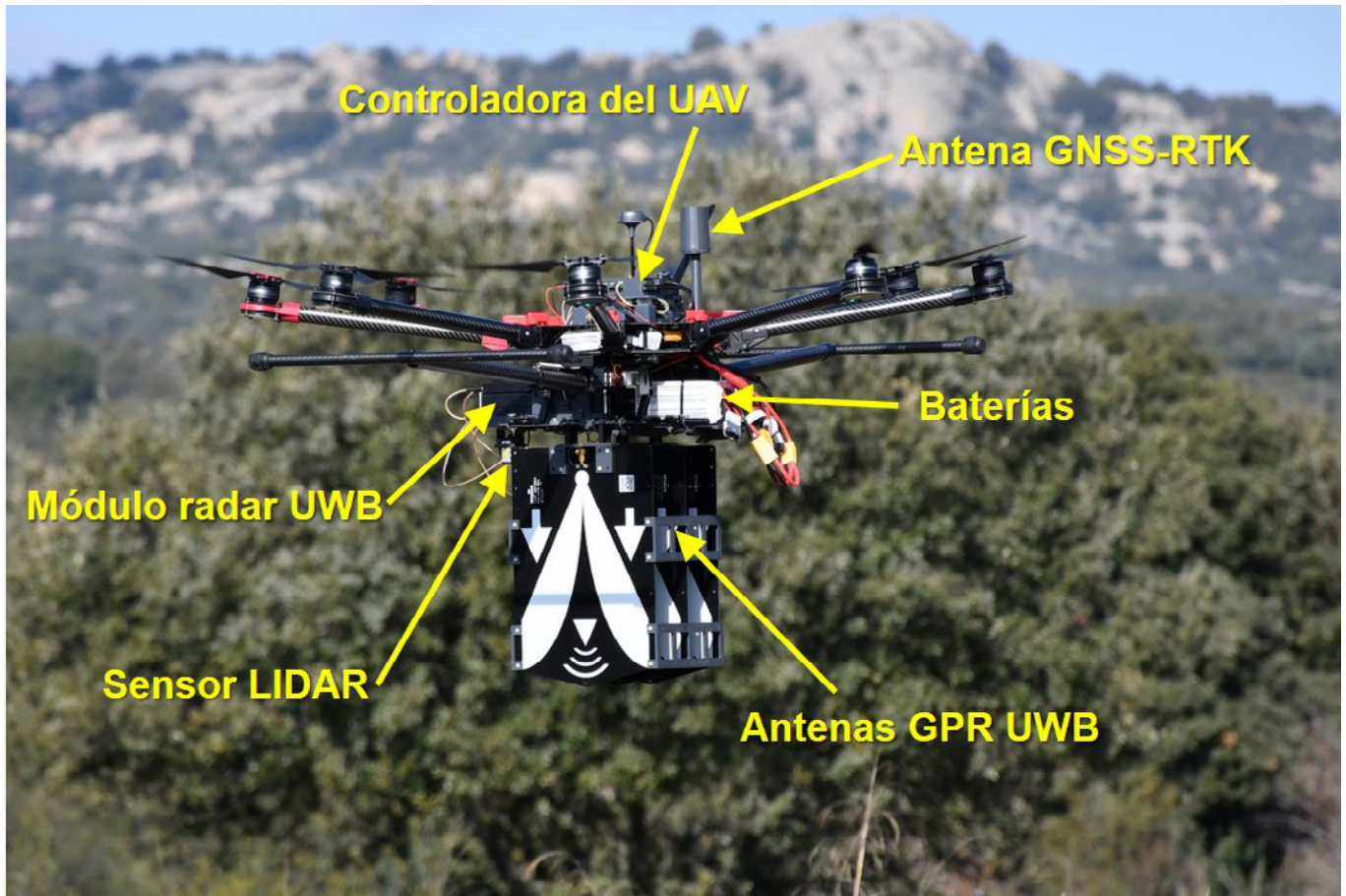


Fig. 2. Fotografía del prototipo con la arquitectura DL-GPR, detallando los principales elementos del mismo. (Fuente propia).

sido seleccionado por el Ministerio de Defensa dentro del programa de I+D COINCIDENTE (Cooperación en Investigación Científica y Desarrollo en Tecnologías Estratégicas) en su convocatoria de 2018, siendo el contratista principal la Universidad de Oviedo. La cuantía financiada ha sido de aproximadamente 470.000 EUR, aportando el 80% el Ministerio de Defensa y el 20% la Universidad de Oviedo.

Objetivos del proyecto SAFEDRONE

El proyecto SAFEDRONE ha tenido como principales objetivos los indicados a continuación:

- Desarrollo de un sistema georradar embarcado en un UAV capaz de proporcionar imágenes del subsuelo y de los objetos enterrados en el mismo con resolución centimétrica. Este objetivo se ha logrado mediante la integración de subsistemas y sensores capaces de proporcionar posicionamiento y georreferenciación con precisión igual o mejor a 2-3 cm, y el empleo de un subsistema radar

de gran ancho de banda (*Ultra Wide Band*, UWB), junto con el desarrollo de técnicas de radar de apertura sintética (*Synthetic Aperture Radar*, SAR). Estas técnicas se complementan con técnicas de mitigación de *clutter* radar con el fin de maximizar la probabilidad de detección de minas e IED enterrados.

- Diseño e implementación de diferentes arquitecturas de georradar embarcado en un UAV, con el fin de evaluar sus prestaciones y limitaciones en términos de capacidad de detección y área inspeccionada. Las arquitecturas desarrolladas, mostradas en la figura 1, fueron: i) sistema GPR con las antenas perpendiculares al suelo (*Down-Looking GPR*, DL-GPR), figura 1 (a); ii) sistema DL-GPR que emplea un *array* de antenas, figura 1 (b); y iii) sistema GPR formado por dos UAV, portando uno de ellos la antena transmisora, que ilumina el suelo con incidencia casi rasante, y ubicándose la antena receptora, perpendicular al suelo, en el otro UAV (*Forward Looking-Down Looking GPR*, FL-DL-GPR), figura 1 (c).

- Validación de los prototipos desarrollados en el proyecto SAFEDRONE en escenarios realistas, de forma lo más similar posible a las condiciones operativas. A tal fin, se han considerado diferentes tipos de escenarios en los ensayos de validación realizados durante el proyecto SAFEDRONE, tales como terrenos pedregosos, caminos, zonas húmedas, terrenos en pendiente, etc. Asimismo, durante los ensayos el equipo investigador a cargo del manejo de los prototipos y la detección de potenciales amenazas desconocía la posición de las distintas minas e IED, que fueron enterrados con anterioridad por expertos del Centro de Excelencia contra IED (C-IED CoE) y del Ministerio de Defensa.

- Implementación e integración de un subsistema de comunicaciones de largo alcance para permitir la transmisión de datos más allá de la línea de visión (*Beyond Visual Line of Sight*, BVLOS) entre el UAV y la estación terrestre que recibe y procesa las medidas.

En profundidad

Arquitecturas desarrolladas

Arquitectura Down-Looking GPR (DL-GPR)

Con anterioridad al proyecto SAFEDRONE, el grupo de investigación Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Oviedo (TSC-UNIOVI) había desarrollado un primer prototipo de GPR embarcado en un UAV [9] el cual operaba en la banda de 3 a 5 GHz. En el diseño e implementación de dicho prototipo se seleccionó una arquitectura DL-GPR dado que, de esta forma, se incrementa el rango dinámico, pudiendo captar señales de baja intensidad reflejadas en los objetos enterrados. Como contrapartida, esta arquitectura presenta un nivel de *clutter* elevado debido a la reflexión en la interfaz entre el aire y el suelo.

En el marco del proyecto SAFEDRONE se mejoró la arquitectura DL-GPR desarrollada por el grupo TSC-UNIOVI, tanto en términos de *hardware* como de *software*. En la figura 2 se muestra una fotografía del prototipo DL-GPR implementado, indicándose sus principales componentes y subsistemas. En lo referente al subsistema GPR, se ha integrado un nuevo módulo radar y antenas UWB que permiten abarcar la banda

de frecuencias de 600 MHz a 6 GHz. Dicho módulo radar dispone además de 2 canales receptores con lo que, al poder emplear dos antenas receptoras y combinar coherentemente las medidas recibidas en ambas (es decir, disponer de diversidad espacial), se consigue una mayor reducción del nivel de *clutter* [6].

En un sistema GPR las antenas constituyen el elemento más crítico en lo que a capacidades de detección se refiere. Por ello, una de las tareas llevadas a cabo en el proyecto SAFEDRONE ha sido el análisis e intercomparación de diferentes tipos de antena UWB con el fin de evaluar su impacto en las capacidades de detección del sistema. Los resultados obtenidos se pueden consultar en [8].

Otro elemento diferenciador de los prototipos desarrollados en el proyecto SAFEDRONE es el uso de subsistemas de posicionamiento con precisión centimétrica, que han permitido la implementación de técnicas de procesado GPR-SAR. Los prototipos desarrollados hacen uso de un receptor *Global Navigation Satellite System - Real Time Kinematics (GNSS-RTK)* multi constelación de triple banda, que tiene una precisión aproximada de 0,5 cm en el plano horizontal, y de

1 cm en el plano vertical. El receptor GNSS-RTK se complementa con un sensor láser para la medida precisa de la altura del UAV sobre el terreno. El microcontrolador del UAV se encarga, entre otras tareas, de georreferenciar las medidas proporcionadas por el subsistema radar con la información de posicionamiento, enviando en tiempo real las medidas georreferenciadas a la estación base.

La conectividad inalámbrica entre el UAV y la estación base se realiza mediante una red wifi desplegada *ad-hoc*, siempre que se pueda operar en condiciones de línea de visión (*Line of Sight, LOS*).

Mejoras en la velocidad de escaneo

Los prototipos desarrollados en proyecto SAFEDRONE realizan el escaneo en base a la definición de una trayectoria en zig-zag sobre la zona de interés. Para poder llevar a cabo el procesado GPR-SAR cumpliendo el criterio de muestreo de *Nyquist*, que garantiza que se realiza un muestreo adecuado de la zona bajo investigación, los barridos longitudinales han de estar equiespaciados una distancia no superior a media longitud de onda a la máxima frecuencia de trabajo. En el marco del proyecto SAFEDRONE se

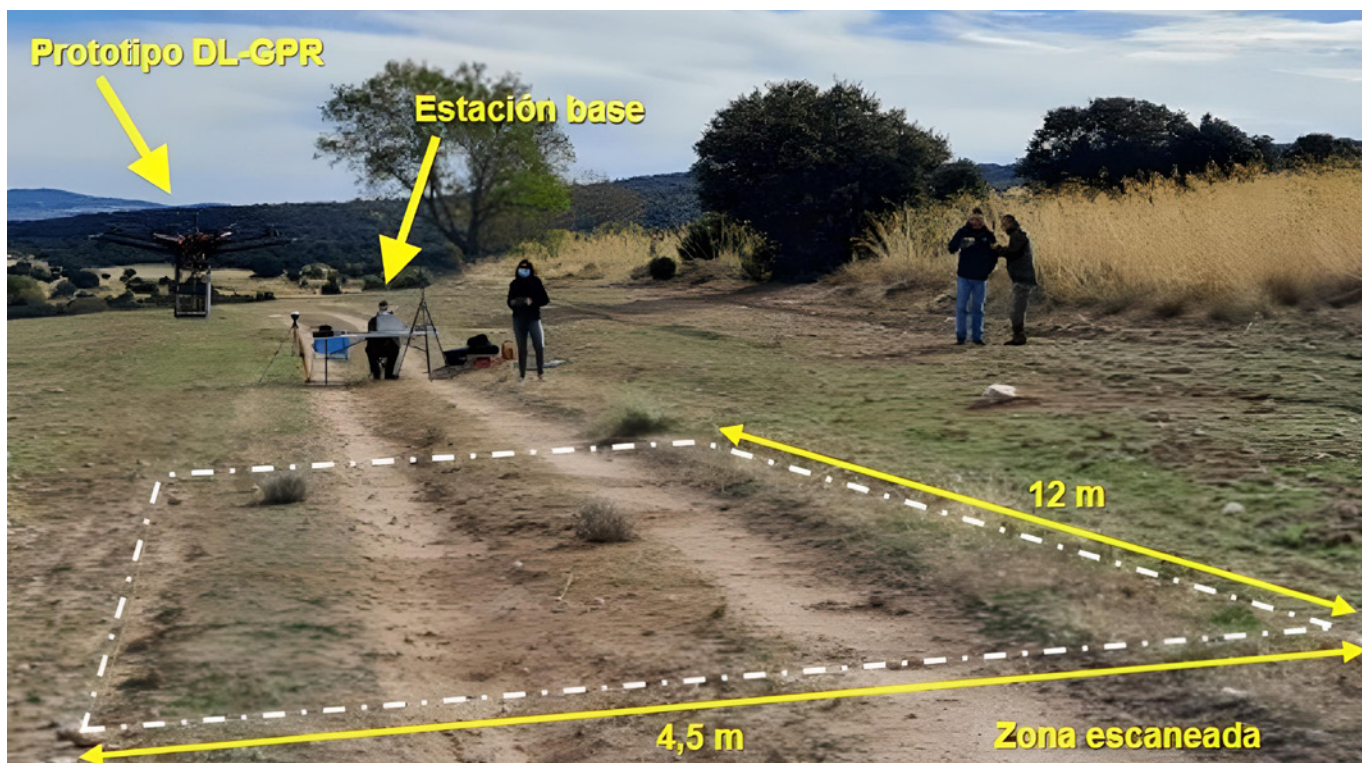


Fig. 3. Fotografía de una de las zonas seleccionadas para la evaluación de los prototipos del proyecto SAFEDRONE, situado en una zona llana de una pista de tierra. (Fuente propia).

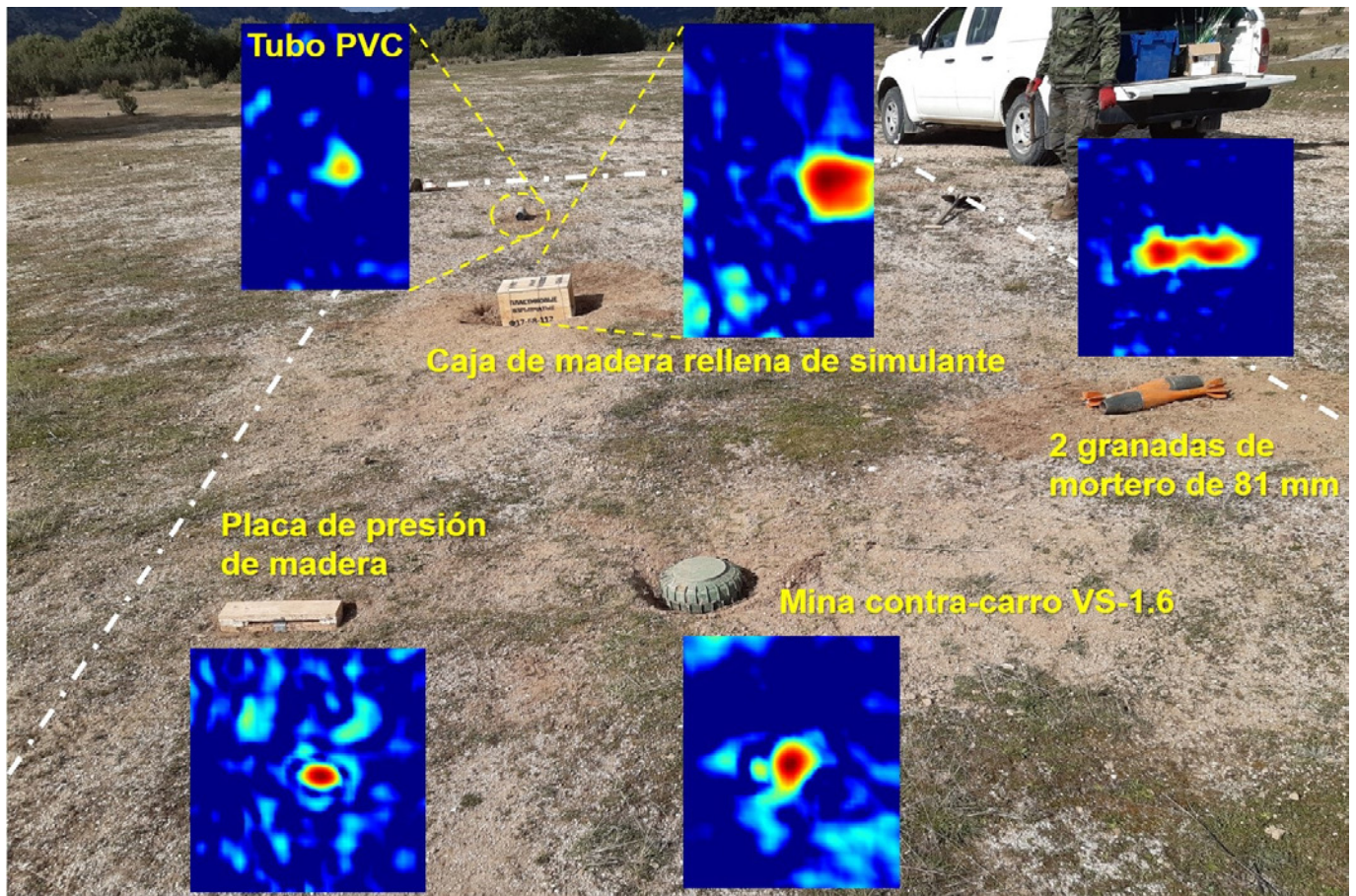


Fig. 4. Fotografía de algunos de los objetos enterrados en una de las zonas seleccionadas para la evaluación de los prototipos. Sobreimpresa a la fotografía se muestran partes de la imagen GPR-SAR obtenida tras el procesado de las medidas realizadas con el prototipo DL-GPR. (Fuente propia. Fotografía tomada por personal del C-IED CoE).

ha considerado una máxima frecuencia de procesado de las medidas de 3 GHz, por lo que el espaciado entre barridos longitudinales debe ser igual o inferior a 5 cm. Ello implica que, para escanear un área de 4,5 m x 12 m, se necesitan 91 barridos longitudinales de 12 m cada uno, lo que limita la autonomía del UAV.

Con el fin de aumentar la capacidad de escaneo del sistema, se decidió emplear un *array* de antenas. Teniendo en cuenta las restricciones en cuanto a peso y tamaño para la integración del *array* a bordo del UAV, el diseño resultante del *array* consistió en un *subarray* de 3 antenas transmisoras, y otro *subarray* de 4 antenas receptoras (véase Figura 1 (b)). El uso de este *array* permite aumentar el espaciado entre barridos longitudinales de 5 cm a 20 cm (se aumenta la capacidad de escaneo por 4).

Técnicas de procesado GPR-SAR

Otro de los ámbitos abarcados por el proyecto SAFEDRONE ha sido

el desarrollo de nuevas técnicas de procesado GPR-SAR, para mejorar tanto las capacidades de detección como para minimizar la probabilidad de falsas alarmas. Los sistemas GPR embarcados en los UAV desarrollados en el proyecto SAFEDRONE hacen uso del procesado GPR-SAR para obtener imágenes con resolución centimétrica del subsuelo y de los posibles objetos enterrados. Este tipo de procesado es posible gracias a que el subsistema de posicionamiento permite georreferenciar las medidas del GPR con precisión suficiente como para combinar coherentemente las medidas adquiridas en el escaneo de la zona de interés [6], [8]. Es importante destacar que otros sistemas GPR embarcados en los UAV (por ejemplo, los presentados en [4],[5]) no incorporan procesado GPR-SAR, con lo que las imágenes proporcionadas por dichos sistemas tienen una resolución significativamente peor que la que proporcionan los prototipos desarrollados en el proyecto

SAFEDRONE (lo que dificulta la identificación de los objetos enterrados).

Uno de los factores que más contribuye al *clutter*, que limita la capacidad de detección del sistema, es la reflexión de las ondas electromagnéticas emitidas por el radar que tiene lugar en la interfaz aire-suelo. Dicha reflexión puede enmascarar las reflexiones de las señales en objetos enterrados superficialmente, como es el caso de muchas minas e IED.

Para minimizar el *clutter* proveniente de dicha reflexión en la interfaz aire-suelo, en el proyecto SAFEDRONE se han desarrollado técnicas de filtrado basadas en descomposición de valores singulares (*Singular Value Decomposition*, SVD) [10].

Arquitectura Forward Looking-Down Looking GPR (FL-DL-GPR)

En el proyecto SAFEDRONE se ha implementado y validado una arquitectura GPR totalmente disruptiva, consistente en la combinación de

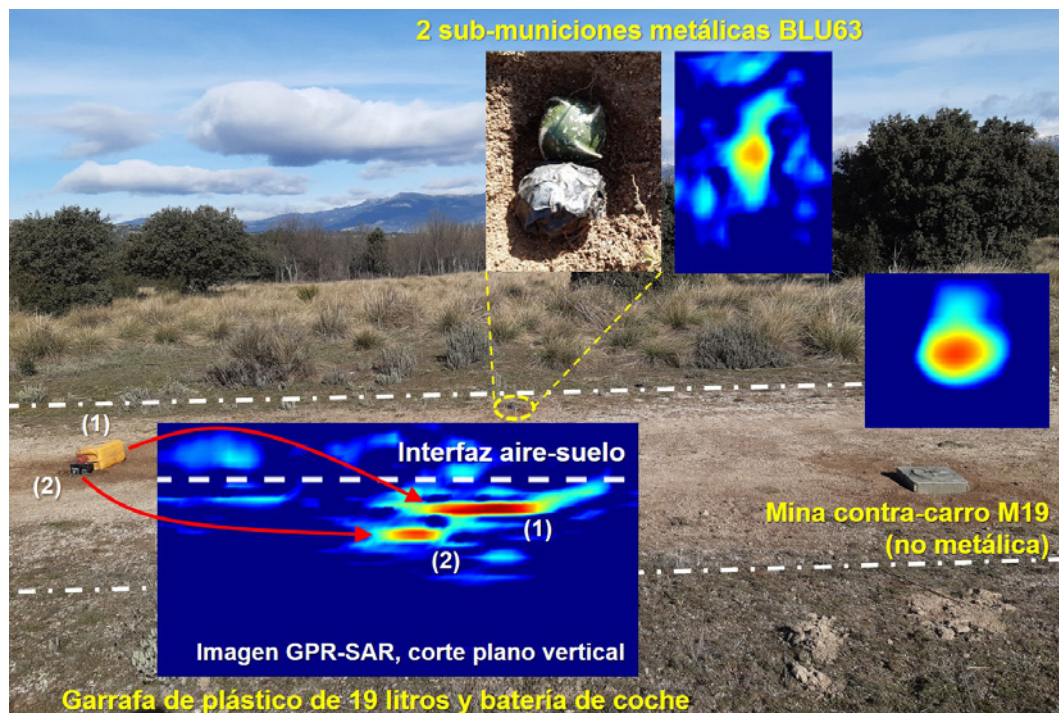


Fig. 5. Fotografía de algunos de los objetos enterrados en una de las zonas seleccionadas para la evaluación de los prototipos, situada en un tramo llano de la pista de tierra. Sobreimpresa a la fotografía se muestran partes de la imagen GPR-SAR obtenida tras el procesamiento de las medidas obtenidas con el prototipo DL-GPR. (Fuente propia).

las arquitecturas FL-GPR (empleada típicamente en sistemas GPR embarcados en vehículos terrestres) y DL-GPR. La arquitectura FL-GPR permite minimizar el *clutter* proveniente de la reflexión aire-suelo al evitar la reflexión especular de las ondas electromagnéticas en dicha interfaz, mientras que la arquitectura DL-GPR proporciona mayor rango dinámico. A lo largo del proyecto SAFEDRONE se realizó una campaña exhaustiva de evaluación de la arquitectura FL-DL-GPR, presentándose algunos resultados obtenidos en la publicación [11]. Se comprobó que, efectivamente, esta arquitectura híbrida minimiza la contribución del *clutter* proveniente de la interfaz aire-suelo.

Una característica de esta arquitectura es el empleo de dos UAV, tal y como se observa en la figura 1 (c), embarcándose un módulo radar y la antena transmisora en un UAV, y otro módulo radar y la antena receptora en el otro UAV. Ambos módulos radar se sincronizan inalámbricamente.

Validación de los prototipos

En el marco del proyecto SAFEDRONE se han realizado varias campañas de validación para evaluar las prestaciones de los prototipos desarrollados en

condiciones lo más similares a escenarios de operación reales.

La selección y preparación de los escenarios de validación ha sido realizada por el personal del Centro de Excelencia contra IED (*Counter IED Center of Excellence*, C-IED CoE) y del Ministerio de Defensa. Las pruebas de validación se realizaron en marzo y octubre de 2021, en el Campo de Maniobras y Tiro de El Palancar, situado en Hoyo de Manzanares (Madrid).

En las primeras pruebas de validación (marzo de 2021), se seleccionaron siete zonas de 12 m de largo por 4,5 m de ancho, situadas en diferentes escenarios. Dos de las zonas se ubicaron en secciones planas de una pista de tierra (véase figura 3), otras dos en secciones irregulares y en pendiente de dicha pista de tierra, y las tres zonas restantes en terrenos más o menos planos, sin y con cubierta vegetal.

Se enterraron aproximadamente 80 objetos consistentes en IED, minas contracarro y contrapersonal, placas de presión, granadas de mortero, y obuses. Algunos de los objetos enterrados en una de las siete zonas se muestran en la figura 4 y en la figura 5.

En las pruebas de marzo se evaluó el prototipo con la arquitectura DL-GPR (figura 2). Una vez realizadas las medidas, el equipo investigador del grupo TSC-UNIOVI procesó los resultados y procedió a la identificación de los posibles objetos enterrados en las imágenes GPR-SAR obtenidas. Con el fin de ilustrar de forma cualitativa la resolución del sistema GPR embarcado en un UAV, en la figura 4 y en la figura 5 se muestran ejemplos de cómo se ven algunos objetos enterrados en las imágenes GPR-SAR, en las que las zonas con colores cálidos indican áreas con una alta reflectividad, es decir, zonas en las que se detecta una anomalía que podría corresponder con un objeto enterrado.

En el caso de la figura 5, se incluye un corte vertical de la imagen GPR-SAR centrado en la posición del IED formado por una garrafa plástica (etiquetada como (1) en la figura 5) con una batería de coche adosada (etiquetada como (2) en la figura 5). En dicha imagen se aprecia claramente la reflexión que se produce en la parte superior de la garrafa y de la batería.

En las pruebas de validación finales (octubre de 2021) se seleccionaron 6 zonas, puesto que, además de la arquitectura DL-GPR, también se evaluaron los prototipos con las arquitecturas DL-GPR con *array*, FL-DL-GPR y el prototipo equipado con los módulos radio para las pruebas en condiciones BVLOS.

En todas las pruebas de validación se siguió un procedimiento de evaluación de las capacidades de detección de tipo *doble-ciego*. La posición de los objetos enterrados era únicamente conocida por el personal del C-IED CoE y del Ministerio de Defensa. Una vez procesadas las medidas y analizadas las imágenes GPR-SAR, el equipo investigador del grupo TSC-UNIOVI remitió al personal del C-IED CoE y del Ministerio de Defensa un listado con los objetos detectados en dichas imágenes, comparándolas con la ubicación

real de los objetos enterrados. Finalmente, el C-IED CoE y el Ministerio de Defensa remitió al personal investigador del grupo TSC-UNIOVI un informe de resultados en el cual se indicaban las probabilidades de detección, de falsa alarma y de pérdida, alcanzadas en las diferentes pruebas y escenarios.

Tras el análisis de las capacidades de detección de las diferentes arquitecturas desarrolladas en el proyecto SAFEDRONE, se pueden extraer las siguientes conclusiones: para objetos de tamaño mediano o grande (garrafas de plástico, minas contracarro, granadas de mortero, obuses de artillería) se ha conseguido una probabilidad de detección ligeramente superior al 90 %, que era el objetivo perseguido al inicio del proyecto. En lo que se refiere a falsas alarmas, la probabilidad fue del 27 % en las pruebas de validación de octubre, cifra que constituye una mejora significativa con respecto a las pruebas de validación de marzo (> 60 %).

Conclusiones

El proyecto SAFEDRONE ha constituido un importante hito para la I+D española en el ámbito del desarrollo de sistemas GPR de alta resolución embarcados en UAV. Los prototipos desarrollados incorporan, tanto a nivel de *hardware* como de *software*, elementos altamente innovadores que permiten obtener imágenes del subsuelo con resolución centimétrica, pudiendo afirmar que dichos sistemas GPR embarcados en los UAV se encuentran entre los más avanzados de su categoría a nivel mundial para detección de IED a fecha de finalización del proyecto (diciembre de 2021).

Algunos aspectos a desarrollar en futuros proyectos de I+D como continuación del SAFEDRONE son, entre otros, la mejora de los algoritmos de mitigación de *clutter* de las imágenes GPR-SAR obtenidas, la integración de otros sensores para mejorar la probabilidad de detección de objetos pequeños a la vez que se reduce la ratio de falsas alarmas y el desarrollo de técnicas de reconocimiento de blancos para automatizar el proceso de detección. Asimismo, también existe margen de mejora en lo referente a la autonomía de la plataforma aérea, así como en lo que respecta a los sistemas de comunicaciones para operar a mayores distancias.

Parte de la tecnología y propiedad intelectual empleada en el desarrollo del proyecto SAFEDRONE se encuentra protegida por la familia de patentes citada en [12].

Otros aspectos del proyecto SAFEDRONE

El coronel José Luis Mingote Abad se ha encargado de la coordinación y asesoramiento técnico del proyecto SAFEDRONE por parte del C-IED CoE.

El director técnico del proyecto SAFEDRONE por parte de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) del Ministerio de Defensa ha sido el capitán Santiago García Ramos.

El capitán Santiago García Ramos y el coronel José Luis Mingote Abad, junto con el personal del C-IED CoE, se han encargado de la planificación y preparación de las pruebas de validación del proyecto SAFEDRONE en el Campo de Maniobras y Tiro «El Palancar», así como de la revisión *doblegada* de los resultados de detección proporcionados por el equipo investigador TSC-UNIOVI.

El diseño y fabricación del *array* de antenas se subcontrató a la Universidad de Vigo, y el diseño y configuración del sistema de comunicaciones de largo alcance en condiciones BVLOS se subcontrató a la empresa Instster Tecnología y Comunicaciones S.A.U.

Referencias

- [1] Daniels, D. J.. (2006). *A review of GPR for landmine detection. Sensing and Imaging: an International Journal*. Volume 7, pp 90-123.
- [2] Jol, H. (2008) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Amsterdam, Elsevier Science.
- [3] García-Fernández, M. y otros (2º trimestre de 2018). Sistema de GPR embarcado en un UAV para la detección de objetos ocultos enterrados, Sección en profundidad. *Boletín de Observación Tecnológica en Defensa*. N.º 57.
- [4] Schreiber, E., Heinzl, A., Peichl, M., Engel, M. y Wiesbeck, W. (2019). *Advanced Buried Object Detection by Multichannel, UAV/drone Carried Synthetic Aperture Radar*. En: *European Conference on Antennas and Propagation* (13th. 2019. Krakow, Poland). *Proceedings of the 2019 13th European Conference on*

- Antennas and Propagation (EuCAP)*. Piscataway (U.S.A.), IEEE. Pp. 1-5.
- [5] Šipoš, D. y Gleich, D. (2020). *A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection*. *Sensors*. Vol. 20, p. 2234, DOI: 10.3390/s20082234
- [6] García-Fernández, M, Alvarez-Lopez, Y., Las-Heras, F. (2020). *Airborne multi-channel ground penetrating radar for improvised explosive devices and landmine detection*. *IEEE Access*. Volume 8, pp. 165927-165943.
- [7] Burr, R., Schartel, M., Grathwohl, A., Mayer, M., Walter, T. y Waldschmidt, C. (2021). *UAV-borne FMCW InSAR for focusing buried objects*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, pp. 1-5.
- [8] García-Fernández, M., Álvarez-Narciandi, G., Arboleya, A., Vázquez-Antuña, C., Las Heras, F., Álvarez-López, Y. (2021). *Development of an Airborne-Based GPR System for Landmine and IED Detection: Antenna Analysis and Intercomparison*. *IEEE Access*. Vol. 9, pp. 127382-127396.
- [9] García Fernández, M. y otros. (2018). *Synthetic Aperture Radar Imaging System for Landmine Detection Using a Ground Penetrating Radar on Board a Unmanned Aerial Vehicle*. *IEEE Access*. Vol. 6, pp. 45100-45112.
- [10] García-Fernández, M. y otros. (2017). *SVD-based clutter removal technique for GPR*. En: *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation* (2017. San Diego, U.S.A.). *Proceedings of the 2017 IEEE AP-S Symposium on Antennas and Propagation*, pp. 2369-2370.
- [11] García-Fernández, M., Álvarez-Narciandi, G., Álvarez-López, Y. y Las Heras, F. (2021). *Analysis and Validation of a Hybrid Forward-Looking Down-Looking Ground Penetrating Radar Architecture*. *Remote Sensing*. Vol. 13, p. 1206.
- [12] Gonzalez, B., Álvarez, Y., Arboleya A., Vaquero, Y.R., García, M., Las-Heras, F. y Pino, A.G. (2017). Sistema aerotransportado y métodos para la detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados y la caracterización de la composición del subsuelo. Familia de patentes: ES2577403B2, EP3407007B1, CN109073348B, y US10895636B2. [Consulta: 2022]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/ES2577403B2/es>

Boletín de Observación Tecnológica en Defensa

Disponible en

[http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/es-es/Contenido/Paginas/Publicaciones.aspx?cat=BOLETINES TECNOLÓGICOS](http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/es-es/Contenido/Paginas/Publicaciones.aspx?cat=BOLETINES%20TECNOLÓGICOS)

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



 **SOPT**
SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE DEFENSA

SUBSECRETARÍA DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

SUBDIRECCIÓN GENERAL
DE PUBLICACIONES
Y PATRIMONIO CULTURAL