

Boletín

DE OBSERVACIÓN TECNOLÓGICA EN DEFENSA

Dirección General de Estrategia e
Innovación de la Industria de Defensa



SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PLANIFICACIÓN, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN
Boletín de Observación Tecnológica en Defensa n.º 87 • 4.º trimestre de 2025

EDF-REACTS: cómo poner en servicio en 72 horas una capacidad espacial
Uso de sistemas de almacenamiento de energía de respuesta rápida en
un entorno naval

THEAMS: estructuras termomejoradas fabricadas de manera aditiva y
optimizadas termomecánicamente





Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

NIPO 083-15-183-4 (edición en línea)

NIPO 083-15-182-9 (edición impresa)

ISSN 2444-4839 (edición en línea)

ISSN 2444-4847 (edición impresa)

Depósito legal M 8179-2009

Autor: Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT), Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDG PLATIN) de la Dirección General de Estrategia e Innovación de la Industria de Defensa (DIGEID). C/ Beatriz de Bobadilla, 3, Madrid. Teléfonos: 91 333 58 68 (dirección), 91 333 58 92 (redacción). Correo electrónico: observatecno@oc.mde.es.

Director: Óscar Jiménez Mateo.

Consejo Editorial: José Agrelo Llaverol, Cte. Carlos Calderón Carnero, Luis Hernández Espinola, María Isabel Pérez-Cerdá Herrero, Sandra Ramos Gutiérrez.

Portada:

Capacidades espaciales de respuesta. Fuente: Imagen creada con IA

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 la 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, suscripciones y dudas:

observatecno@oc.mde.es

Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT) (defensa.gob.es)¹

CONTENIDOS

Editorial

- 4** Capacidades de respuesta espacial de I+T de España en el sector Defensa

Actualidad

- 5** ¿Dónde hemos estado?
- 7** I Jornada de Inteligencia Artificial Responsable en el Ámbito Militar
- 8** JUDAS: el perturbador satelital 100 % español
- 10** EDF-REACTS: cómo poner en servicio en 72 horas una capacidad espacial

Tecnologías emergentes

- 13** THEAMS: estructuras fabricadas de manera aditiva y optimizadas termo-mecánicamente

En profundidad

- 15** Uso de sistemas de almacenamiento de energía de respuesta rápida en un entorno naval

¹ Disponible en: <https://tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/>



Capacidades de respuesta espacial de I+T de España en el sector Defensa

Dentro del ámbito de la Seguridad y la Defensa, uno de los sectores que se ha convertido en crítico ha sido el del espacio, tanto a nivel nacional como internacional. El conjunto de medios, tecnologías, doctrinas y personal que permite a las Fuerzas Armadas utilizar y proteger el espacio ultraterrestre se denomina capacidades espaciales de respuesta en defensa, cuyo objetivo será el garantizar la soberanía, la seguridad y la efectividad de las operaciones militares en todos los dominios conocidos (tierra, mar, aire, cognitivo y ciberespacio).

En un entorno global donde el espacio ultraterrestre se ha convertido en un dominio crítico y altamente congestionado, un pilar fundamental de la estrategia española de seguridad nacional del siglo XXI lo constituye la capacidad de respuesta espacial. Como miembro de la OTAN y de la Unión Europea, España, además, reconoce la necesidad imperativa de proteger sus activos en este ámbito y de garantizar tanto la libertad de acceso como de movimiento en el espacio. El desarrollo de estas capacidades no solo es esencial para la defensa nacional, sino que lo es también para mantener la soberanía e independencia de la nación y el cumplimiento de sus compromisos internacionales.

Las necesidades operativas derivadas de conflictos y crisis humanitarias de finales del siglo pasado y principios de este han marcado la evolución de las capacidades espaciales españolas, en la misma medida que la creciente dependencia en los sistemas espaciales de la sociedad y de la conducción de las operaciones militares—desde comunicaciones seguras y navegación (GNSS) hasta inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR)— la ha llevado a reforzar su estructura organizativa.

La creación de la Agencia Espacial Española (AEE) y del Mando del Espacio (MESPA), integrado en el Ejército del Aire y del Espacio, han marcado un hito crucial en este proceso, lo que manifiesta que este dominio juega una parte importante en la estrategia de seguridad nacional. La AEE, con la responsabilidad de contribuir a la seguridad nacional, promover la investigación científica y la industria espacial española, y coordinar a las instituciones nacionales en este ámbito, es la encargada de diseñar y coordinar la estrategia espacial española. Por su parte, el MESPA tiene la misión de «planificar, coordinar y ejecutar las operaciones relacionadas con el ámbito espacial, asegurando la vigilancia y el seguimiento de las actividades en el espacio ultraterrestre y apoyando el desarrollo de la industria nacional».

Las capacidades de respuesta espacial de España se fundamentan en varios sectores de capacidades estratégicas interconectados:

Vigilancia y Seguimiento Espacial (SST): España participa activamente en el Programa Nacional de Vigilancia y Seguimiento Espacial. Este programa es vital para la concienciación de la situación espacial (SSA, por sus siglas en inglés), permitiendo detectar, catalogar y predecir la

trayectoria de objetos espaciales, desde satélites operativos hasta basura espacial. Esta capacidad es fundamental para prevenir colisiones y mitigar amenazas, tanto para los propios activos españoles como para los de sus aliados.

Sistemas de observación y comunicaciones satelitales: España cuenta con programas nacionales de observación de la Tierra y sistemas de comunicaciones seguras. Estos activos proporcionan información de inteligencia crítica para la toma de decisiones en tiempo real durante operaciones militares y de gestión de crisis. La inversión continua en estos sistemas busca mejorar la resiliencia y la autonomía estratégica del país, en un dominio donde el 60 % de los activos son operados por países de la OTAN o sus empresas.

Cooperación internacional y alianzas: consciente de que la seguridad espacial es un desafío global, España fortalece sus capacidades a través de la colaboración bilateral y multilateral. Es un contribuyente destacado a la Agencia Espacial Europea (ESA), siendo el cuarto país de la UE en aportación. Además, España es un socio activo en las iniciativas espaciales de la OTAN y de la Unión Europea, contribuyendo al desarrollo de una gobernanza tecnológica ética y responsable y a la definición de la futura Ley Espacial de la UE propuesta en 2025. La cooperación permite a España acceder a capacidades que no podría desarrollar en solitario, como lo demuestra su contribución al sistema de defensa contra misiles balísticos de la OTAN con los destructores AEGIS en Rota.

La combinación de tácticas innovadoras y personal altamente capacitado en un enfoque multidimensional, asegura que las capacidades espaciales españolas sean un pilar fundamental de la seguridad y la defensa en las próximas décadas.

El incremento presupuestario para financiar el desarrollo de sus capacidades de defensa, incluidas las espaciales, refleja el compromiso español, buscando alcanzar el objetivo de la OTAN de destinar el 2 % del PIB a defensa, un hito que se prevé alcanzar en el corto plazo. Estas inversiones no solo se destinan a la adquisición de material, sino también al fomento de la industria de defensa y el sector tecnológico nacional, impulsando la I+D+i.

Es imperativo avanzar hacia un control espacial «fundamentalmente de carácter defensivo», basado en la legítima defensa de los sistemas propios, como un área clave de desarrollo futuro. El objetivo es contar con una capacidad de respuesta ágil y soberana ante posibles agresiones en el espacio.

España está inmersa en un proceso de fortalecimiento de sus capacidades espaciales de respuesta. Mediante la creación de estructuras específicas como la AEE y el MESPA, la inversión en tecnología de vanguardia y una activa participación en foros internacionales, el país se posiciona para garantizar su seguridad y la de sus aliados en la que es, sin duda, la última frontera del poder.

Actualidad

¿Dónde hemos estado?

28 al 31
de octubre
de 2025

● Campaña de experimentación táctica Viator

Los Observatorios Tecnológicos (OO.TT) de la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación de la DIGEID asistieron a la Campaña de Experimentación Táctica organizada por el Centro de Estudios Fuerza 2035 de la División de Planes del Ejército de Tierra, que tuvo lugar en la base «Álvarez de Sotomayor» en Viator (Almería).

Durante la misma, numerosas empresas hicieron demostraciones de sus tecnologías, realizando pruebas reales con el apoyo de la Brigada experimental.

Entre las tecnologías que se pudieron ver estuvieron:

- Sistema de UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) controlados por FPV.
- UGV (*Unmanned Ground Vehicle*), que realizaron misiones de rescate, despliegue de minas y de comunicaciones.
- Robots cuadrúpedos armados.
- Estaciones de armas por control remoto.
- Sistemas antidron, tanto *hard-kill* como *soft-fill*.
- Burbujas de comunicaciones 5G.
- Sistemas de guerra electrónica.

La campaña se consideró un éxito, pues cumplió sus dos objetivos principales: por un lado, permitió a las empresas mostrar a las Fuerzas Armadas el estado de la tecnología y las capacidades que pueden ofrecer y, por otro, permitió que las empresas recibieran las necesidades y comentarios por parte de los usuarios finales, información que les permite seguir mejorando sus productos.



17 al 21 de
noviembre
de 2025

● Reunión Junta Directiva MoU RSC

El subdirector general de Planificación, Tecnología e Innovación de la DIGEID presidió la inauguración de la reunión de la junta directiva del Memorandum de Entendimiento (MoU) *Responsive Space Capabilities* (RSC), celebrada entre los días 17 y 21 de noviembre en las instalaciones del Patronato Pro Huérfanos de la Guardia Civil de Madrid.

La reunión se enmarca en las actividades de investigación que se llevan a cabo en el seno de los grupos de trabajo de los que consta el MoU, cuya misión es impulsar la investigación en ciencia y tecnología relativa a las capacidades espaciales de respuesta.

La participación de España en el MoU está coordinada desde el Ministerio de Defensa, a través del representante principal ante el comité director (SB) perteneciente a la SDG PLATIN y su labor cuenta con el apoyo de equipos técnicos y expertos de distintos organismos dependientes del propio Ministerio.

La agenda abordada en la presente convocatoria cobra especial relevancia ante el complejo panorama internacional, donde la innovación en defensa resulta clave para preservar la estabilidad y la seguridad colectiva, estableciendo las líneas maestras para dotar a los Estados miembro de unas capacidades de respuesta adecuadas con las que afrontar los desafíos actuales.



19 de
noviembre
de 2025

● Foro Nacional sobre los Nuevos Paradigmas para la Computación Cuántica

El encuentro, que tuvo lugar en el Fórum Evolución de Burgos, fue organizado por el ITCL (Instituto Tecnológico de Castilla y León), centro tecnológico especializado en I+D+i. La cita reunió a investigadores del CSIC, SCAYLE, INCIBE o GMV, entre otras entidades, y líderes tecnológicos como IBM y Microsoft, para analizar la aplicación industrial de la cuántica y sus desafíos en ciberseguridad, así como la necesaria colaboración público-privada.

Más allá de la divulgación técnica, el foro permitió definir estrategias para fortalecer la posición de España en el ecosistema internacional y analizar cómo influirán estas tecnologías en los sectores productivos en el futuro próximo. Además, los expertos en computación cuántica situaron la llegada del ordenador cuántico a partir de 2030, anticipando un salto sin precedentes en capacidad de cálculo y transformación tecnológica.



16 de
diciembre
de 2025

● Jornada de microelectrónica

El 16 de diciembre de 2025 se celebró la Jornada sobre «La transformación tecnológica de España a través de la Microelectrónica y los Semiconductores» en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones de la UPM, organizada por la Fundación Círculo de Tecnologías para la defensa y la Seguridad. En la jornada, participaron las principales entidades del sector y autoridades del Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública, Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial, y la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales (SETELECO).



I Jornada de Inteligencia Artificial Responsable en el Ámbito Militar

Autora: Rosalía Vindel Román,
OT QTEC, SDG PLATIN.

Palabras clave: inteligencia artificial (IA), defensa, responsabilidad y ética, innovación tecnológica, control humano.

Líneas I+D+i ETID relacionadas:
11.4.1, 11.5.1, 11.5.2.



Clausura del evento (Fuente: CESTIC – MDEF).

Introducción

El pasado mes de noviembre, los días 20 y 21, la Secretaría de Estado de Defensa (SEDEF), a través del Centro de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CESTIC), la Dirección General de Estrategia e Innovación de la Industria de Defensa (DIGEID) y la empresa pública ISDEFE, celebró en Jaén la I Jornada de Inteligencia Artificial Responsable en el Ámbito Militar. El encuentro reunió a representantes del Ministerio de Defensa y de las Fuerzas Armadas, expertos académicos y empresas tecnológicas con el fin de avanzar en un enfoque de IA que sea seguro, transparente y alineado con los compromisos internacionales del proceso REAIM (*Responsible AI in the Military Domain*), iniciativa para promover el uso responsable de la IA en el ámbito militar. Celebrar la jornada en Jaén puso de relieve al CETEDEX como centro de innovación estratégico, consolidando su papel en el desarrollo de capacidades tecnológicas clave para la defensa nacional.

La inauguración estuvo a cargo del director general del CESTIC, el teniente general José María Millán Martínez. Durante este día, se realizaron ponencias sobre casos prácticos de IA en defensa, debates técnicos y mesas redondas sobre desafíos tecnológicos y aplicaciones reales en logística, ciberseguridad y apoyo a decisiones.

Ejes estratégicos del evento

Las sesiones se centraron en tres áreas principales, alineadas con la iniciativa internacional REAIM. En

primer lugar, se abordó el aseguramiento técnico de la IA responsable, destacando la necesidad de que los modelos sean comprensibles, los datos trazables y el control humano efectivo, elementos esenciales para un uso seguro de los sistemas inteligentes. También se mostraron aplicaciones prácticas de la IA en logística predictiva, ciberdefensa, mantenimiento avanzado y apoyo a la toma de decisiones, junto con el papel de la simulación operativa y los modelos generativos en la planificación y entrenamiento de las Fuerzas Armadas. Por último, se analizaron la gobernanza y la ética de la IA, revisando marcos internacionales, normas de uso y requisitos de supervisión, con el objetivo de garantizar que su aplicación sea coherente con los compromisos internacionales de España y conforme a principios de seguridad, control humano y fiabilidad operativa.

Innovación abierta y desarrollo tecnológico

El último día del evento, actividades prácticas como el «Prompt-a-thon de IA», organizada por Microsoft, que premió a equipos que presentaron soluciones innovadoras y responsables en IA generativa aplicada a defensa y seguridad, mostraron el potencial de la IA generativa para resolver desafíos operativos reales. También se organizaron exhibiciones de aplicaciones de IA con enfoque responsable, junto con recorridos guiados y oportunidades para el intercambio profesional.

La Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDG PLATIN), junto con el CESTIC, presentó un resumen del evento, resaltando los logros más relevantes y las buenas prácticas, así como la colaboración entre administración, empresas y universidades para promover soluciones de IA responsables y técnicamente sólidas.

El evento fue clausurado por la secretaria de Estado de Defensa, María Amparo Valcarce, y por el presidente de la Diputación de Jaén, Francisco Reyes, contando también con la presencia de la ministra de Defensa, Margarita Robles.

Conclusión

La I Jornada de Inteligencia Artificial Responsable en el Ámbito Militar ha demostrado la importancia de combinar análisis estratégico, ética aplicada y demostraciones tecnológicas para avanzar hacia un uso seguro y fiable de la IA en defensa. La colaboración entre administración, industria y academia refuerza la capacidad de España para desarrollar modelos comprensibles, trazables y sometidos a control humano, asegurando su coherencia con los compromisos internacionales.

Este evento, previo a la III Cumbre Internacional REAIM que España acogerá como anfitriona en 2026, refuerza el liderazgo del país en IA responsable para defensa, impulsa la transformación digital de las Fuerzas Armadas y promueve la innovación tecnológica aplicada a operaciones militares, preparando al país para futuros desafíos complejos.

JUDAS: el perturbador satelital 100 % español

Autor/es: Aicox Soluciones, SAU,
Acorde Technologies S. A.,
Integrasys S. A.

Palabras clave: JUDAS, perturbador,
comunicaciones satelitales, español.

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 2.7.2.

Introducción

JUDAS, *Jammer Universal* Dirigido a Ataques a Satélites, es un prototipo de evaluación de un sistema de perturbación de comunicaciones satelitales (*Jammer SATCOM*) concebido y desarrollado íntegramente en España, con la participación coordinada de Aicox Soluciones, Acorde Technologies e Integrasys, junto con el Ministerio de Defensa a través de la SDG PLATIN (DIGEID) en el marco de la convocatoria del Programa COINCIDENTE 2022 (n.º Expediente 023/SP03390102/00000135E) y con una duración de veintisiete meses. Su objetivo es proporcionar una capacidad soberana para la evaluación y ensayo de interferencias intencionales en enlaces de comunicaciones satélite (SATCOM), aportando una plataforma modular, segura y operable en entornos reales de despliegue. El presente artículo resume los objetivos, el diseño y la validación del sistema, así como los resultados principales de las pruebas finales.

Desarrollo del proyecto

En este proyecto, se ha buscado (i) definir y materializar una arquitectura de perturbación flexible que permita configurar formas de onda y estrategias de emisión adaptadas al escenario; (ii) integrar subsistemas de potencia de radiofrecuencia (RF, control y monitorización con garantías de seguridad y registro, y (iii) validar el desempeño en tanto a nivel de laboratorio como en pruebas reales de campo.

La arquitectura de JUDAS se estructura en tres bloques principales: (a) subsistema de generación de diferentes tipos de señales interferentes, (b) cadena de RF y amplificación de potencia y (c) monitorización y control (M&C) del sistema.

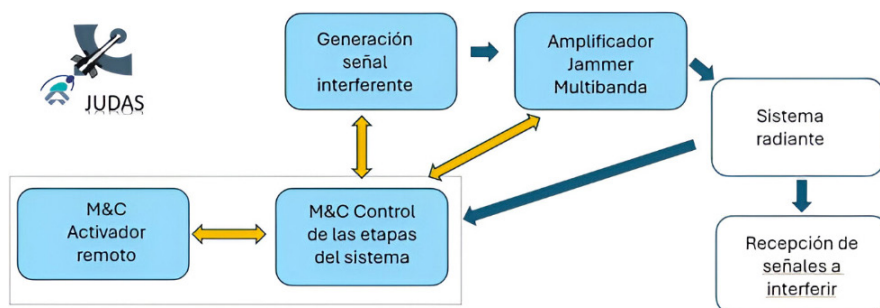


Figura 1. Arquitectura del sistema JUDAS. (Fuente: documentación del proyecto)

El subsistema de generación de interferencias entrega al BUC (bloque *upconverter*) las señales de Onda Continua (CW) o señales moduladas con diferentes anchos de banda y potencia, que se utilizan como señal interferente.

El BUC se encarga de subir la señal interferente generada en banda L a la banda de transmisión y de amplificar la señal de RF en la banda de trabajo, ya sea banda X, banda Ku o banda Ka.

El subsistema de monitoreo y control permite de una forma gráfica muy clara e intuitiva (i) gestionar los usuarios del sistema y sus roles (ii); comprobar el estado de todos los dispositivos activos del sistema: la unidad de control de la antena o ACU, el subsistema de generación de interferencias y los amplificadores y convertidores de subida o BUCs, y (iii) configurar el ataque seleccionando el satélite, banda, portadora y tipo de asalto a emplear.

de la señal a generar o señal interferente, frecuencia de pulsos, velocidad de barrido, etc.), y el módulo de generación de interferencias entrega en su salida correspondiente a la banda a utilizar una señal CW de potencia seleccionable, o un CW que aparece y desaparece (pulsos), o una CW que se mueve en un margen de frecuencias (barrido), o una interferencia basada en una CW modulada en FM (*chirp*), o una señal modulada de engaño, o una señal modulada pseudoaleatoria, o ciertas combinaciones de ellas, según sea la selección previamente realizada.

Por otra parte, el generador de interferencias entrega la señal al módulo de potencia correspondiente a la banda que utiliza la señal a interferir, para su amplificación y emisión por la antena (terminal bibanda o TLB).

Para los casos de la banda X y banda Ka, se ha modificado el diseño de amplificadores basados en arseniuro



Figura 2. Interfaz de usuario del sistema JUDAS. (Fuente: documentación del proyecto)

Para operar con JUDAS, se indica a través de la interfaz de usuario del M&C los datos de ataque que se desean emplear (tipo de interferencia, frecuencia central, ancho de banda

de galio (GaAs) para permitir obtener unos niveles de potencia algo superiores a los convencionalmente utilizados, y en el caso del amplificador de Ku se ha realizado un diseño nuevo

basado en Nitruro de Galio (GaN). Las potencias nominales de los BUC de las bandas X, Ku y Ka son de 200W, 100W y 50W, respectivamente.

Además, desde el subsistema M&C también se centralizan las alarmas y estados de los distintos elementos del sistema y se habilitan las políticas de permisos, registro de eventos, auditoría y modos de operación seguros.

Por último, el *software* de M&C se asegura de no lanzar el ataque sin la autorización expresa de un usuario con capacidad para ello, mediante la validación de claves.

El sistema se ha integrado en una plataforma móvil (tipo remolque) que aloja los subsistemas de RF, control y alimentación. Las pruebas de integración han verificado las interfaces, tolerancias mecánicas, así como la compatibilidad entre los distintos subsistemas.



Figura 3. Vista de la implementación del sistema JUDAS.
(Fuente: documentación del proyecto)

Las pruebas finales se realizaron en un entorno real, en el que se realizaron ataques en banda X, banda Ku y banda Ka, con el soporte del MCCE, el CESTIC y la SDG PLATIN.

Se estableció un enlace intrateatro en el que con una misma antena se subía una señal de comunicaciones procedente de un *modem*, y se bajaba y demodulaba con otro *modem* (*Paradyse*). A este enlace se le atacaba con la señal creada por el subsistema generador de interferencias y entregada al TLB del sistema JUDAS.

Los resultados fueron muy satisfactorios pues, por una parte, se consiguieron mejores resultados que en un ataque basado con ruido blanco

en todos los casos y, por otra, se obtuvieron conclusiones acerca de qué tipos de interferencias son más efectivas para desenganchar el oscilador local del *modem* a interferir y cuáles son más eficientes para eliminar un porcentaje de paquetes importante sin llegar a desenganchar el oscilador del *modem* y pasar más desapercibidas en el espectro y, por tanto, más difíciles de detectar.

Las conclusiones técnicas de las pruebas de campo fueron:

1. El nivel de señal interferente para desenganchar el *modem* del enemigo es generalmente inferior en todas las bandas utilizando una señal generada por la algoritmia de JUDAS que utilizando un ruido blanco. Esto implica que, al necesitar menos nivel de señal para interferir, se podrán interferir señales más potentes con JUDAS que con un inhibidor basado en ruido blanco.

2. Como en este proyecto se han optimizado los niveles de potencia de los BUC de X y Ka y se ha desarrollado un BUC en la banda Ku de GaN, se puede conseguir más potencia de salida que con los BUCs de GaAs, usualmente empleados en comunicaciones satelitales para mismo peso y envolvente.

3. En los casos de interferencia por pulsos, por señal de engaño y por señal pseudoaleatoria, se mejora el nivel de relación de señal código/interferencia que hace que se desenganche el oscilador del *modem* (al que se llama *CIR Unlock*) en todas las bandas. Es decir, con esas interferencias se necesita menos nivel de señal interferente para destruir la señal.

4. En todos los ataques, se mejora o al menos se iguala el margen de ocultación, la potencia necesaria para degradar la señal en más del 70 % es igual o inferior a la necesaria para desenganchar los *modems*. Se puede provocar una degradación de la comunicación sin que el operador de las comunicaciones satelitales del enemigo vea que se desengancha el *modem* en la recepción, por lo que le es más complicado detectar que está sufriendo un ataque.

5. Cuanto mayor es el margen de ocultación, mayor es la dificultad de detectar que se sufre un ataque.

6. Los ataques que poseen mejor margen de ocultación son los de frecuencia modulada (o *chirp*), la de engaño, la pseudoaleatoria y las que combinan con uno de esos tres ataques.

7. Los ataques con señales de engaño y pseudoaleatorias también son más eficaces, si se tiene en cuenta que son menos visibles en un analizador de espectros, y, si se tiene en cuenta que es mucho más sencillo eliminar una interferencia si esta sobresale en valor en la representación espectral de la señal, se pueden tomar muestras y reconstruir la señal eliminando lo que sobresale mediante el tratamiento digital de señales.

Conclusión

Del trabajo desarrollado en este proyecto, se puede concluir que los algoritmos de JUDAS han sido muy efectivos, pues todos ellos han eliminado la señal a interferir de una forma inmediata.

Hay que indicar que el proyecto JUDAS se verá mejorado con los resultados del proyecto SDAM4PRD (*Satellite Detection, Analysis, Measurements and Jamming For Proactive and Reactive Defence*, EDF2023, actualmente en curso), pues aportará la inteligencia para decidir el mejor algoritmo de ataque para cada ocasión.

En definitiva, JUDAS consolida una capacidad nacional de perturbación satelital. La validación realizada demuestra su madurez tecnológica y su idoneidad como herramienta de evaluación en escenarios reales (TRL7).

Tecnologías emergentes

EDF-REACTS: cómo poner en servicio en 72 horas una capacidad espacial

Autores: David Marote, José Manuel Fraga, Javier del Castillo, Miguel Piera, Quiterio García, Airbus Defence and Space SAU; María José González, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

Palabras clave: RSS, OTV, A400M, A330MRTT, satélites, SAR, SIGINT.

Líneas I+D+i ETID relacionadas:
2.3.1, 2.3.2, 3.2.1.

Introducción

Concepto REACTS y entorno.

El proyecto «Responsive European Architecture for Space» (REACTS) cuyo objeto es proporcionar a los Estados miembros europeos una nueva capacidad de defensa disruptiva y colaborativa, una red de sistemas espaciales adaptables (RSS) elástica y escalable, totalmente interoperable, capaz de lanzar satélites e iniciar la entrega de datos en un plazo de 72 horas. Dentro del proyecto, se ha definido una arquitectura global basada en las necesidades de los usuarios finales, se ha desarrollado un concepto de operaciones (CONOPS), creado la hoja de ruta para alcanzar el segmento técnico y de gobierno de la red de sistemas RSS, confección de un análisis y una descripción de las normas de interfaz RSS, diseño de una configuración

basada en *software* y simulación de la capacidad de respuesta alcanzable. Es un estudio concebido como una aproximación holística entre las necesidades de los Estados miembros de la UE y las capacidades existentes de la industria.

Para ello, se ha comenzado por la identificación de los casos de uso y de las aplicaciones más solicitadas desde el punto de vista operativo para los Estados miembros que se puede resumir en:

- Visión general instantánea del panorama, capacidades y productos espaciales de Europa.
- Toma de decisiones soberanas: facilitando el acceso a la industria nacional preservando intereses nacionales.
- Resiliente y sostenible: ser la base para el desarrollo de una economía espacial resiliente, sostenible y reactiva en Europa.

Se ha propuesto un Modelo de Agrupación y Compartición (*Pooling and Sharing*) como modelo de inicial para REACTS a nivel europeo. El Modelo de Agrupación y Compartición, ejemplificado por el Mando Europeo de Transporte Aéreo (EATC), implica la integración de recursos y capacidades de múltiples Estados miembros para mejorar la eficiencia y la eficacia operativas. Este modelo se caracteriza por una estructura de mando global, la transferencia de autoridad y el conocimiento y la reserva de operaciones en tiempo real.

Misiones de referencia: Victus Nox y Victus Haze.

A la hora de abordar este desafío se ha tomado como referencia las misiones desarrolladas en EE. UU. Victus Nox (lanzamiento septiembre de 2023) y Victus Haze (CDR pasada en febrero 2025). La preparación del satélite y las verificaciones finales se realizaron en 24 h. El lanzamiento, incluyendo el llenado de tanques de combustible, ensamblaje del satélite y lanzamiento propiamente dicho duró 27 horas y la misión se consideró operativa en 37 horas tras el lanzamiento, para un total de 110 horas, aproximadamente, desde el aviso de alerta al estado operacional. Todos estos tiempos, bajo el gobierno de personal del Ejército, disponibilidad del satélite en la base de lanzamiento, así como todos los trámites administrativos estaban listos de antemano. Si se traslada este caso a un contexto europeo, puede afirmarse que la aproximación inicial elegida del modelo de gobernanza centralizado para dar servicio a un Estado miembro es el punto de partida óptimo, tomando como factor de mérito el tiempo de ejecución.

Vector lanzador: A400M y A330MRTT

Si bien en REACTS se consideran también otros tipos de portadores del lanzador como plataformas terrestres o marítimas, los portadores aéreos son los que inicialmente ofrecen una mayor capacidad de respuesta rápida y flexible por su

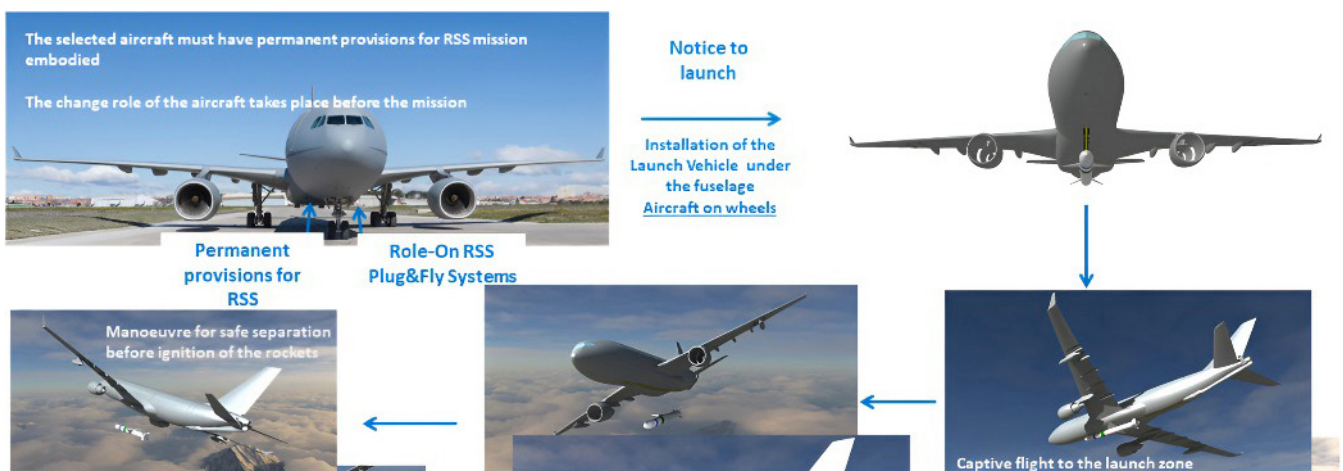


Figura 1. Concepto A330MRTT como portador de lanzador (LEO-VLEO). (Fuente: Airbus Defence and Space SAU)

movilidad dentro del espacio europeo y por su capacidad de alcanzar en pocas horas el punto de lanzamiento óptimo, ubicado normalmente sobre el océano.

Con objeto de maximizar la carga de pago del lanzador, se han propuesto las dos plataformas con ADN europeo y con mayor capacidad de transporte actualmente en servicio como son el A400M, como avión de transporte militar, y el A330MRTT, como avión táctico y multifunción.

En ambos casos, se ha llevado a cabo un análisis de factibilidad de realizar el vuelo con el lanzador dentro de la bodega de carga, en el caso del A400M, y bajo el fuselaje en el caso del A330MRTT, y la posterior entrega aérea en el punto de lanzamiento. No se ha identificado ningún bloqueo técnico en ninguna de las plataformas que impida evolucionar el concepto de solución propuesta a una futura fase de desarrollo y certificación o validación de dichas soluciones.

Los mayores riesgos identificados durante el estudio no son inherentes a la operación del avión, si no a la naturaleza de la carga de pago, siendo esta un sistema «vivo» y lleno de propulsante, lo que lo hace distinta de otras operaciones de entrega aérea. Será crítico el análisis de cargas sobre el lanzador en las distintas fases del vuelo, el análisis de una separación segura antes del encendido de los



Figura 2. Probabilidad global de interferencias RF. (Fuente: ESA: ERMIT-SMOS RFI team)

motores del lanzador, así como el estudio y mitigación de la probabilidad de ocurrencia de los casos de fallo identificados.

Tipos de misiones. Segmento espacio y terreno

Si se centra la atención en el tipo de misiones que se pueden concebir a partir de REACTS, pueden diferenciarse tres tipos de misiones: misiones ISR (Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento), ejemplo SAR, ÓPTICA, SIGINT; misiones SATCOM (incluyendo comunicaciones, Internet de las cosas y QKD) y otras misiones (SSA, Servicios en órbita, PNT). No es el objetivo de este artículo diseminar

prestaciones de misión, pero para los lectores avezados se indica que las resoluciones requeridas en misiones ISR están en el rango de <1 m, con cargas de pago <100 kg y plataforma de satélite adaptable para cubrir las necesidades de las diferentes misiones.

El segmento terreno abarca todos los elementos necesarios para llevar a cabo las funciones de telemetría, seguimiento y comando de la misión (TT&C), dinámica orbital, planificación de la misión, gestión y procesamiento de datos de la carga útil, así como el interfaz con el usuario final. Se organiza habitualmente en tres bloques funcionales: el Segmento de Operaciones de Misión, el Segmento de Gestión de Datos de la Carga Útil y la Estación Terrena.

Resultados y discusión

Uno de los objetivos del estudio es determinar qué pasos son necesarios para garantizar una respuesta en 72 horas desde que se identifica una necesidad o desde que se pierde una capacidad existente. Las primeras conclusiones indican que una cadena de suministro robusta es el primer paso. Es necesario definir un nivel de maduración logística, al igual que se hace con el nivel de madurez tecnológica (TRL). La revisión de los procesos tiene que ser ambiciosa, identificando y reduciendo todas las

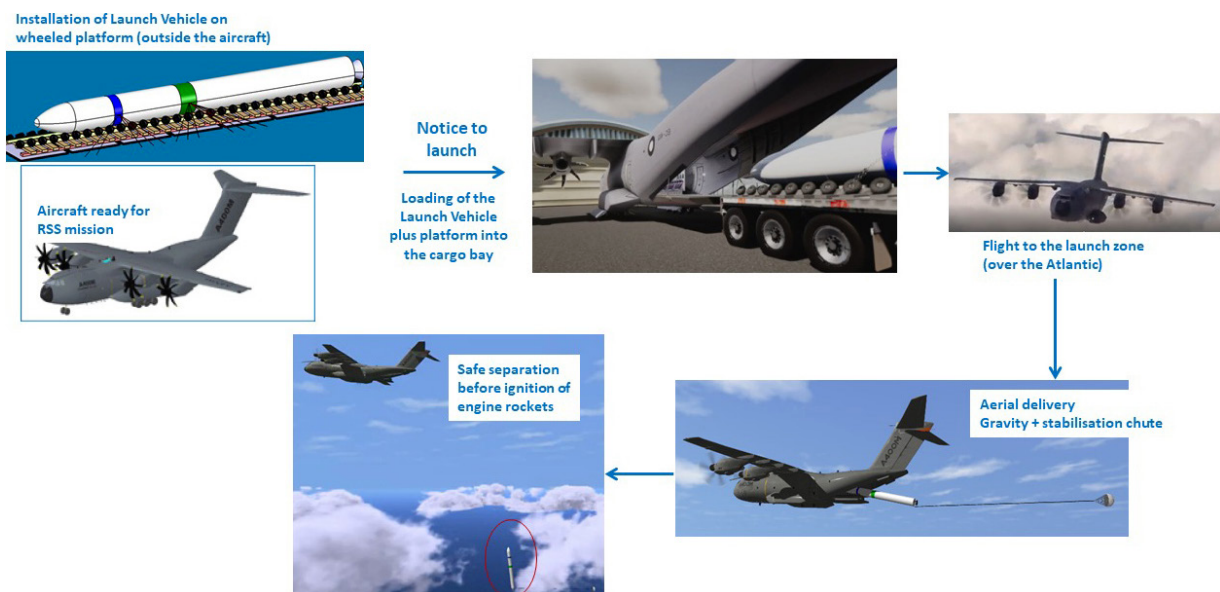


Figura 3. Concepto A400M como portador de lanzador (LEO-VLEO). (Fuente: Airbus Defence and Space SAU)

Tecnologías emergentes

actividades que estrictamente no sean necesarias. Las misiones deben de ser concebidas para cumplir los requisitos del cliente optimizando los recursos internos. La cadena de suministro debe de alcanzar el nivel de madurez requerido.

Conclusiones

La primera conclusión que se podría extraer de este proyecto, es que la realidad geopolítica cambiante hizo necesario una revisión de las ideas conforme se ha desarrollado el proyecto. Siguiendo las recomendaciones del posible modelo de gobernanza propuesto, se considera que una forma de abordar este tipo de actividades es partir de una aproximación focalizada en dar una respuesta para un Estado miembro y extender la colaboración a otros Estados miembros. Con esta aproximación se garantiza que el concepto de soberanía, que cada Estado miembro quiere retener, se tome como punto de partida, dejando la arquitectura preparada (escalable) para extender la colaboración entre Estados miembros para fases siguientes.

Resumiendo, las soluciones habilitadoras al sistema RSS desde el perímetro español se pueden destacar los siguientes puntos:

- El uso de A400M y el A330MR-TT, como elementos vectores de lanzadores, proporcionan flexibilidad, capacidad y disponibilidad, que se consideran necesarias para seguir estudiando en una fase de desarrollo como continuación del REACTS.
- Por el lado de las misiones satelitales estudiadas, y siguiendo los intereses expresados por los diferentes Estados miembros, es conveniente avanzar en el desarrollo de cargas de pago SAR, SIGINT y ópticas, con el propósito de reponer una capacidad perdida o responder rápidamente a una petición urgente. No es objetivo inicial del REACTS la reposición de un recurso estratégico soberano de altas prestaciones.

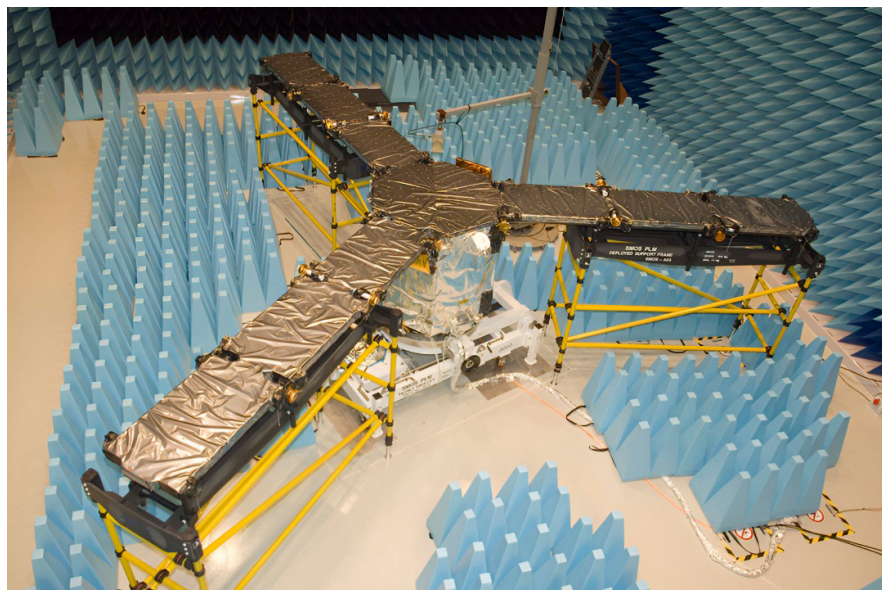


Figura 4. Satélite SMOS (aplicación SIGINT) en campaña de medidas RF.
(Fuente: ESA website)

- Asimismo, el uso potencial de Vehículos de Transferencia Orbital (OTV) en el despliegue de constelaciones de nanosatélites (<30 kg) para etapas superiores sin reencendido, podría reducir el tiempo de puesta en operación de la constelación completa, pasando de típicamente treinta días a tres o cuatro días, mejorando la escalabilidad.
- Para un futuro estudio, podría ser beneficioso ampliar los requisitos de alto nivel iniciales, actualmente hasta 200 kg de masa y a partir de 400 km de altitud, extendiéndolos hasta 500 kg e incluyendo VLEO (Very Low Earth Orbit) con órbitas desde los 250 km.
- Desde el punto de vista del segmento terreno, para alcanzar una arquitectura robusta, resiliente y reactiva (RSS), se requiere una solución común y modular que permita la adaptación a las particularidades de cada misión, basándose en estándares interoperables, tanto a nivel de sistemas de control como de procedimientos operativos. La robustez se garantiza mediante el uso de plataformas virtualizadas, despliegues en la nube y arquitecturas distribuidas que mejoran la tolerancia a fallos y la escalabilidad. La resiliencia se apoya en el diseño redundante, la

capacidad de recuperación ante incidencias y una red de estaciones terrenas que asegure la cobertura requerida para las distintas fases (LEOP, comisión y operaciones nominales). La reactividad se logra combinando un alto grado de automatización de las operaciones, con un equipo de operaciones capacitado, multimisión y orientado a la toma de decisiones en tiempo real, facilitando una respuesta rápida ante eventos, tanto nominales como anómalos.

- La continuidad de REACTS, bien a través de un programa del Fondo Europeo de Defensa (EDF) o bien a través de iniciativas existentes y futuras de Defensa en Europa (MFF 2028-2034), es de interés para la industria y podría ser un catalizador para continuar con la labor de desarrollo e industrialización del concepto.



**Funded by
the European Union**

«Financiado por la Unión Europea. Los puntos de vista y opiniones expresados en el artículo son los propios del autor y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea o la Comisión Europea. Ni la Unión Europea ni la autoridad de financiación serán responsables de las mismas».

THEAMS: estructuras fabricadas de manera aditiva y optimizadas termo- mecánicamente

Autores: Judit Mordillo Córdoba,
Borja Cobo López, Patricia Martínez
Bueno, David Orgaz Díaz,
Madrid Space Europe.

Palabras clave: control térmico,
fabricación aditiva, optimización
topológica.

Líneas I+D+i ETID relacionadas:
2.1.1, 3.2.1, 3.2.4.

Introducción

El continuo progreso de la tecnología de semiconductores ha impulsado una tendencia imparable hacia sistemas cada vez más pequeños, compactos y potentes. Sin embargo, esta miniaturización e incremento de potencia conllevan un desafío crítico: la gestión del calor. El control térmico se ha convertido en un factor determinante en la fiabilidad y vida útil de los sistemas electrónicos, ya que las altas temperaturas son una de las principales causas de fallo en los componentes (Anandan y Ramalingam, 2008).

En el ámbito de la Defensa, la optimización del Tamaño, Peso, Potencia y Coste, (SWaP-C, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una pieza clave en el diseño de los sistemas electrónicos. Este enfoque busca alcanzar el máximo rendimiento operativo a través de un equilibrio preciso entre estos factores interdependientes: 1) reducir el tamaño para facilitar la integración en plataformas con espacio limitado; 2) minimizar el peso para mejorar la maniobrabilidad y autonomía; 3) gestionar la potencia como un recurso dual que exige tanto maximizar la capacidad de procesamiento como minimizar el consumo energético; 4) optimizar el coste a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema, priorizando soluciones tecnológicas que ofrezcan una mayor fiabilidad y un menor coste total.

Cada decisión de diseño repercute en la disipación del calor, ya que una mayor densidad de componentes o un consumo energético elevado

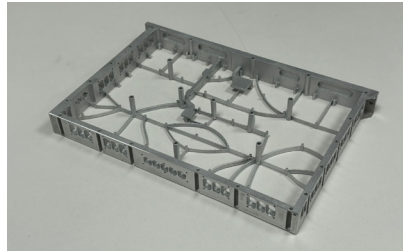


Figura 1. Tecnología THEAMS. (Fuente: elaboración propia)

incrementan la carga térmica del sistema. En este contexto, abordar la gestión térmica desde las primeras fases de diseño es indispensable para garantizar la fiabilidad, eficiencia y longevidad de los equipos electrónicos y más los destinados a aplicaciones de defensa que suelen operar además en entornos hostiles.

Para hacer frente a estos desafíos, nace THEAMS - Estructuras fabricadas de manera aditiva y optimizadas termo mecánicamente (*Thermally Enhanced Additively Manufactured Structures*), una tecnología que combina estructuras resistentes a cargas mecánicas elevadas con sistemas de control térmico integrados, desarrollados mediante fabricación aditiva. A través del uso de impresión 3D y de las técnicas de optimización topológica, THEAMS permite diseñar componentes estructurales que no solo disipan el calor de forma eficiente, sino que también reducen masa, volumen y coste operativo.

Fundamentos de la tecnología

La tecnología THEAMS, protegida bajo la patente internacional PCT/EP2025/066865, se basa en tres pilares primordiales que, combinados, permiten

desarrollar componentes estructurales ligeros, resistentes y con una gestión térmica eficiente. Estos pilares son:

Optimización topológica: es una técnica de diseño avanzado que busca determinar la distribución óptima del material dentro de una pieza para maximizar el rendimiento estructural con el mínimo peso. Durante años, esta metodología se consideró una herramienta prometedora, pero con limitaciones prácticas significativas debido a que las formas resultantes de la optimización solían ser imposibles de fabricar mediante procesos convencionales como el mecanizado o la fundición. No fue hasta la llegada de la fabricación aditiva cuando estas limitaciones prácticas pudieron ser superadas (Brackett, Ashcroft y Hague, 2011).

Fabricación aditiva: también conocida como impresión 3D, ha transformado la manera de fabricar y, por lo tanto, la manera de diseñar los componentes de diversas industrias, incluyendo la defensa, aeronáutica o automotriz. Esta técnica consiste en construir las piezas capa a capa a partir de un modelo digital, lo que permite la fabricación de geometrías complejas.

Caloductos (heatpipes): son dispositivos pasivos y sellados con un fluido de trabajo capaces de transferir grandes cantidades de energía térmica entre dos puntos con una diferencia de temperatura mínima (Jose y Hotta, 2023). El calor se aplica en el evaporador, donde el fluido se calienta y se convierte en vapor. Este vapor viaja rápidamente a la sección más fría, el condensador, donde se enfría, se condensa de nuevo a estado líquido y libera el calor. El

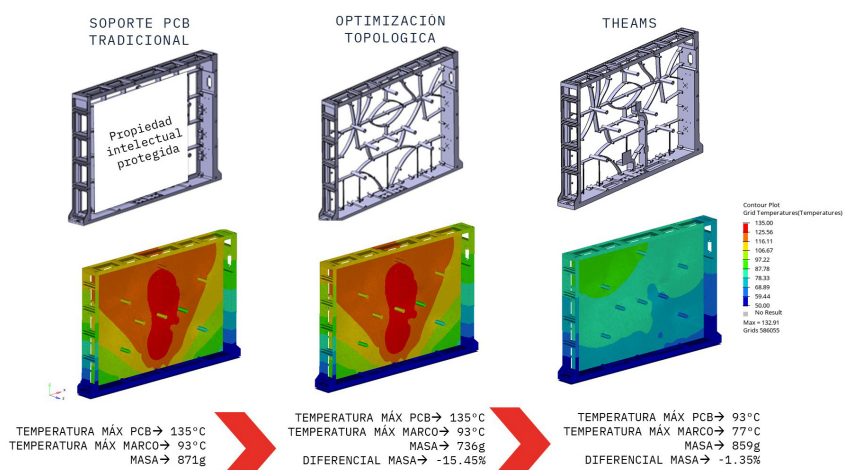


Figura 2. Resultados de THEAMS. (Fuente: elaboración propia)

líquido regresa al evaporador a través de una estructura interna, conocida como mecha (*wick*), impulsado por fuerzas capilares. Este ciclo se repite de manera continua, transportando el calor de forma extremadamente eficiente. La fabricación aditiva también posibilita el diseño y la producción de caleoductos con geometrías internas altamente complejas y mechas personalizadas. Esto permite optimizar la distribución del fluido, reducir el peso del componente y adaptar su configuración a los requisitos específicos de cada aplicación, mejorando en última instancia el rendimiento térmico global (Cobo-López *et al.*, 2023).

Resultados de la tecnología

En el ámbito espacial, la tecnología THEAMS se validó mediante el rediseño de un soporte de tarjeta electrónica (*PCB holder*) sometido a exigentes condiciones térmicas y mecánicas. Como se aprecia en la imagen 2, el modelo de referencia —un marco de PCB convencional sin dispositivos de control térmico— presentaba temperaturas máximas de 125 °C en la propia tarjeta y 93 °C en la estructura, con una masa total de 871 gramos.

A partir de este punto, se evaluaron dos estrategias de mejora. En primer lugar, la optimización topológica del marco permitió reducir la masa hasta 736 gramos, mejorando la eficiencia estructural, pero sin resolver el exceso de temperatura. En segundo lugar, al integrar en el diseño caleoductos embebidos dentro de la estructura optimizada —solución completa THEAMS— se consiguió reducir la temperatura máxima de la PCB a 93 °C y la del marco a 77 °C, con una masa final de 859 gramos.

Este resultado supone una disminución de la temperatura máxima de más de 30 °C y una reducción del 1,35 % en masa respecto de la solución original sin sistema de control térmico. Si, además, se considera que una solución tradicional habría requerido añadir un sistema de refrigeración independiente, la reducción efectiva de masa alcanzaría aproximadamente el 15 %, con un impacto directo en los costes de lanzamiento y la fiabilidad del sistema.

Todo esto se traduce también una reducción de entre el 15 y el 25 % en los costes de lanzamiento y un aumento del 20 al 50 % en el valor del equipo,

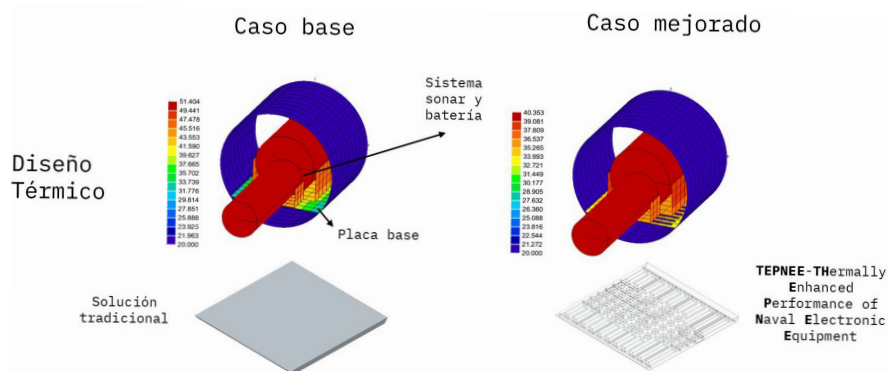


Figura 3. Resultados de TEPNEE. (Fuente: elaboración propia)

gracias al aumento del rendimiento energético. Además, al integrar en una única pieza las funciones estructurales y térmicas simplifican las fases de ensamblaje, integración y pruebas (AIT, por sus siglas en inglés), acortando los tiempos de validación y aumentando la fiabilidad.

Aplicaciones y futuro de la tecnología

THEAMS, diseñado originalmente para el sector espacial, ofrece soluciones eficaces en aplicaciones donde el espacio, el peso y las condiciones operativas son críticos, lo que ha impulsado la transferencia de la tecnología hacia otros ámbitos de la defensa.

En el entorno naval y subacuático, la tecnología se ha desarrollado en el marco del proyecto europeo LEVIATAD, dentro del concepto TEPNEE —Rendimiento Térmico Mejorado de los Equipos Electrónicos Navales (*Thermally Enhanced Performance of Naval Electronic Equipment*)—. En este caso, THEAMS se aplica a estructuras de equipos electrónicos para vehículos submarinos autónomos (AUV), ofreciendo una combinación de robustez estructural, eficiencia térmica y resistencia a la corrosión y presión. Como se puede observar en la imagen 3, la aplicación de la tecnología resultó en una disminución de 11,1 °C y una reducción de la masa en un 17 % con respecto a la solución tradicional.

En el ámbito aeronáutico, se está trabajando a través del programa *Spark Funding*, para adaptar THEAMS a equipos embarcados en aeronaves, con el objetivo de mejorar la disipación térmica pasiva, reducir el peso de los sistemas electrónicos y aumentar su fiabilidad en vuelo.

Además de estos sectores, sus principios de diseño también son

transferibles a plataformas terrestres y a sistemas embarcados complejos —radares, sensores o equipos de comunicaciones— donde la densidad electrónica y las limitaciones térmicas son cada vez mayores.

Conclusiones

En resumen, THEAMS representa una tecnología dual, escalable y flexible y responde de manera directa a los desafíos actuales de la defensa. Al integrar el control térmico directamente en el diseño estructural desde las primeras fases de desarrollo, THEAMS no solo optimiza el rendimiento térmico y reduce la masa de los sistemas, sino que también simplifica el proceso de integración y validación, lo que reduce tiempos y costes operativos. Esta tecnología tiene el potencial de transformar la manera en que se diseñan y operan los sistemas de defensa, fortaleciendo las capacidades tecnológicas y estratégicas en el futuro próximo.

Referencias

- Anandan, S. S. y Ramalingam, V. (2008). Thermal management of electronics: A review of literature. *Thermal Science*. Belgrado, Serbian Society of Thermal Engineers. 12(2), pp. 5-26.
- Brackett, D., Ashcroft, I. y Hague, R. (2011). *Topology optimization for additive manufacturing*. 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference (SFF 2011), pp. 348–362.
- Cobo-López, B. *et al.* (2025). A novel methodology to characterize the thermal performances of additively manufactured heat pipes. *Applied Thermal Engineering*. Amsterdam, Elsevier. Vol. 273, art. 126356.
- Jose, J. y Kumar Hotta, T. (2023). A comprehensive review of heat pipe: Its types and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. Amsterdam, Elsevier. Vol. 42, art. 101860.

Uso de sistemas de almacenamiento de energía de respuesta rápida en un entorno naval

Autores: Fernando de Miquel Moral, Alejandro Luna García-Valenzuela, Iván Felis Enguix, Centro Tecnológico Naval.

Palabras clave: almacenamiento de energía, respuesta rápida, baterías convencionales, supercondensadores, volantes de inercia, almacenamiento cinético de energía (KESS), energía magnética superconductora (SMES), sistemas híbridos, navegación naval, integración de sistemas, viabilidad económica, análisis LCC (Costo del Ciclo de vida), salinidad y humedad, proyecto Poseidon, tecnología marina, innovación energética.

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 2.1.3, 2.2.6, 3.3.1, 3.3.5, 4.2.1, 4.2.2.

Introducción

El uso de baterías convencionales conlleva un problema a la hora de usar estos sistemas en aplicaciones donde aparecen altos picos de demanda en momentos puntuales de la operación. Para evitar estos sobreesfuerzos en las baterías, que las degradan y reducen su ciclo de vida, existen dos soluciones: trabajar con un factor de protección de la batería que limite la potencia máxima demandada a un 80 % de la potencia máxima o combinar estas con sistemas de almacenamiento de respuesta rápida que sean capaces de reducir ese pico de demanda hasta no superar el 80 % de su potencia máxima.

El proyecto Poseidon, financiado con el programa de Horizonte Europa para proyectos de investigación, nace de esta necesidad para evaluar la viabilidad de la integración de tres sistemas de almacenamiento de energía de respuesta rápida y estudiar la capacidad de estos sistemas de aportar energía durante la operación normal de un barco.

Para llevar a cabo esta tarea el consorcio europeo será multidisciplinar y abarcará diferentes áreas de conocimiento. El equipo está compuesto por once empresas que estudian modelos de las tecnologías de almacenamiento

(como CERN, CIEMAT o Cyclomed), integradoras y fabricantes de los prototipos finales (EFESTO, ANTEC y OCEM), expertos en el ámbito naval y requerimientos de los barcos (como TPH, CTN y UPM) y operadoras que den información acerca de la operación de los buques a estudiar (como DAMEN y Balearia).

Sistema de almacenamiento de energía cinética

Los sistemas de almacenamiento de energía cinética (KESS, por sus siglas en inglés) se basan en almacenar energía en una masa giratoria, según la ecuación $E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$, donde J es el momento de inercia de la masa y ω su velocidad angular. La aceleración y desaceleración de la masa se consigue inyectando y extrayendo potencia de una máquina eléctrica cuya parte móvil gira solidariamente (acoplamiento mecánico) con el volante. La potencia de la máquina eléctrica determina la potencia del sistema de almacenamiento. De esta forma, la potencia y la energía se desacoplan en los volantes de inercia.

En cuanto a la potencia objetivo de diseño del KESS, se ha fijado en 20 kW. Este valor, asociado a la máquina eléctrica, se ha seleccionado basándose en la experiencia

del consorcio en el diseño de máquinas para este tipo de aplicaciones y porque se considera un valor adecuado para un módulo unitario para la evaluación de un prototipo de pequeña escala.

Como se mencionó al principio de este punto, la máquina eléctrica requiere un convertidor de potencia que permita la activación y desactivación de las fases.

El uso de volantes de inercia giroscópicos en barcos es algo que ya existe y que se instala para contrarrestar los movimientos de balanceo del casco de un barco proporcionando una navegación más estable y reduciendo el balanceo por efecto de las olas y el viento. Cuando el barco empieza a inclinarse, la gran masa del giroscopio, junto con la alta velocidad de giro que lleva, se resisten a cambiar de orientación creando una fuerza estabilizadora.

La aplicación de volantes de inercia para almacenamiento de energía es algo que aún está en desarrollo, pero que ya tiene aplicación en ambientes terrestres para dar estabilidad a la línea de suministro eléctrico. Un ejemplo de esto es la conexión de un sistema de almacenamiento de energía de volante de inercia a la red eléctrica en Changzhi [1], que consiste

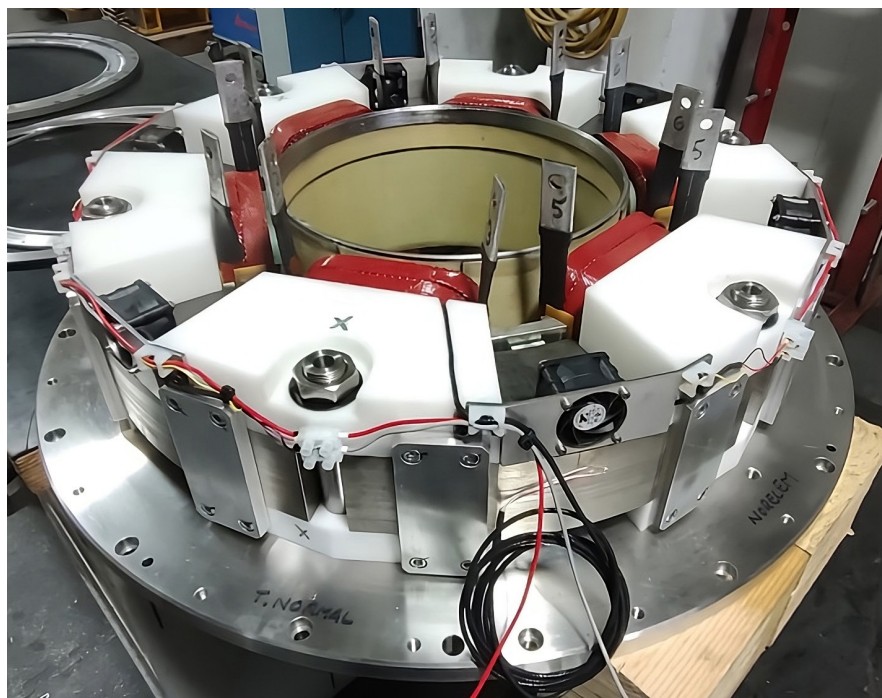


Imagen 1. Estator KESS. (Fuente: propia).

En profundidad

en ciento veinte volantes de inercia con capacidad de producir entre 100 y 2000 W cada uno que permiten un almacenamiento en torno a 30 MW con la que se podría abastecer de energía eléctrica hasta dos mil hogares durante año. Con el proyecto Poseidon se buscará estudiar la viabilidad económica de instalar estos sistemas en barcos y los peligros que puede conllevar el uso de estos sistemas en un ambiente con alta salinidad y humedad.

El sistema de almacenamiento basado en supercondensadores (SC) está compuesto principalmente por un convertidor CC/CC bidireccional conectado a una línea nominal de 750 V CC, donde hay un conjunto de celdas SC conectadas en serie. El sistema seleccionado tiene una oscilación de tensión entre 750 y 300 V, lo que proporciona una cantidad de energía útil de 3 MJ. El sistema es capaz de proporcionar una potencia máxima de 120 kW cuando está completamente cargado.

El convertidor CC/CC cargará inicialmente el armario de SC antes de la operación hasta un voltaje de carga fijo, máximo 750 V; durante la operación, el banco de SC se descargará/cargará siguiendo la referencia de potencia o corriente suministrada por el sistema de control principal, indicado como «Energy Dispatcher» (distribuidor de energía). El controlador garantiza que, durante el funcionamiento, la tensión SC se mantenga entre la tensión mínima (≥ 300 V) y la máxima (≤ 750 V). Esta variación de tensión permite intercambiar una energía neta del 84 % de la energía total almacenada en el armario SC.

El armario de SC no se puede descargar completamente durante el funcionamiento, ya que cuanto más cae la tensión, más corriente pasa por el supercondensador a través de un contactor normalmente cerrado. La resistencia está dimensionada para disipar toda la energía del SC. Asegura una disminución exponencial de la tensión del SC, de modo que se alcanza lentamente una tensión cercana a cero. Esto protegerá las celdas individuales del SC, que están conectadas en serie, de la inversión de tensión que podría producirse si

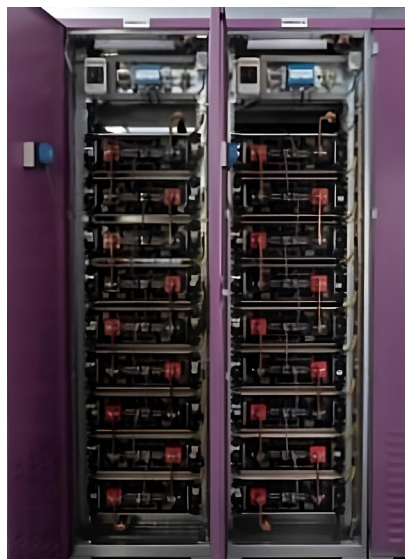


Imagen 2. Armario supercondensadores.
(Fuente: propia).

la tensión del SC se redujera bruscamente a cero.

El sistema de control se encarga de controlar la corriente suministrada, así como de realizar el diagnóstico y la protección tanto del convertidor CC/CC como del armario de SC.

En la actualidad, se están usando sistemas de almacenamiento basados en supercondensadores está muy limitado a funcionar de forma híbrida, ya que la capacidad de potencia que pueden suministrar de momento es inferior a la que son capaces de suministrar las tradicionales baterías químicas. Existen actualmente estudios de nuevos materiales para usar en estos supercondensadores que permitan aumentar su eficiencia como el que llevaron a cabo dos ingenieros australianos [2] de un material basado en carbono y que podría llegar a aportar la misma energía que las baterías tradicionales, pero aún está en proceso de desarrollo.

Hoy en día, existen sistemas de almacenamiento basados en supercondensadores en el mercado especialmente adaptados para ser usados en buques, pero es necesario más investigación para conocer con más profundidad las medidas de seguridad necesarias a tomar para asegurar, que sistemas de mayor capacidad de almacenamiento de energía validados en ambientes terrestres no generan riesgos adicionales al trabajar en un ambiente con gran humedad y salinidad como el que se puede encontrar a bordo de un buque.

Sistema de almacenamiento de energía magnética superconductora

Un sistema almacenamiento de energía magnética superconductora (SMES, por sus siglas en inglés) típico consta de tres componentes principales: un imán superconductor, junto con su sistema de refrigeración, y el sistema de acondicionamiento de energía (PCS), que sirve de interfaz entre el imán y la red eléctrica.

Este sistema almacena energía eléctrica dentro del campo magnético generado por la corriente continua (CC) que fluye a través de la bobina superconductora, que ha sido sometida a un enfriamiento criogénico a una temperatura inferior a su temperatura crítica superconductora. Normalmente, cuando la corriente fluye a través de una bobina, la energía eléctrica se disipa en forma de calor debido a la resistencia del cable. Sin embargo, si la bobina está fabricada con un material superconductor como el mercurio o el vanadio y se encuentra en estado superconductor (por lo general, a una temperatura extremadamente baja), presenta una resistencia nula, lo que permite almacenar energía eléctrica con pérdidas mínimas.

La optimización del sistema es una tarea compleja que requiere varias iteraciones. Normalmente, las principales restricciones impuestas a un SMES provienen de la aplicación de potencia, es decir, la energía y la potencia requeridas, la tensión del enlace de CC y la respuesta dinámica. Sin embargo, existen restricciones adicionales para su uso en aplicaciones acuáticas, que podrían clasificarse en tres categorías:

- **Físicos:** temperatura, humedad y niveles de salinidad.
- **Mecánicos:** movimiento relativo con respecto al suelo, que produce aceleraciones lineales y angulares, o vibraciones.
- **Electromagnéticos:** límite del valor del campo magnético para la compatibilidad EMI y la seguridad de las personas.

Las características electromagnéticas del SMES dependen de la geometría del imán, las propiedades

de la cinta superconductora y las condiciones de funcionamiento. La elección de la geometría definitiva implica maximizar la energía específica por metro de cinta superconductora, lo que suele dar lugar a bobinas de mayor diámetro. Sin embargo, en el caso del SMES POSEIDON, las dimensiones máximas estaban limitadas por las restricciones físicas de la aplicación prevista. En consecuencia, el tamaño de la bobina estaba predeterminado, dejando la distancia de separación entre las bobinas como la única variable disponible para la optimización.

Se desarrolló un modelo COMSOL parametrizado para el proceso de optimización. En el caso de los imanes HTS, la dependencia angular de la corriente crítica de las cintas HTS hace necesario evaluar la curva de carga no solo en el radio interior, sino en todo el imán. La distancia entre bobinas disminuye de 15 mm en las bobinas exteriores a solo 2 mm entre las bobinas interiores, lo que produce una energía máxima de 275 kJ.

El sistema de refrigeración empleará refrigeración por flujo, utilizando convección forzada de gas helio para la refrigeración. La razón por la que se ha optado por este sistema radica en su capacidad para funcionar de forma autónoma, su rentabilidad, su diseño compacto y su capacidad para disipar el calor localmente. Además, ofrece la flexibilidad de funcionar dentro de un rango de temperaturas de entre 4,2 K y 77 K. Este concepto

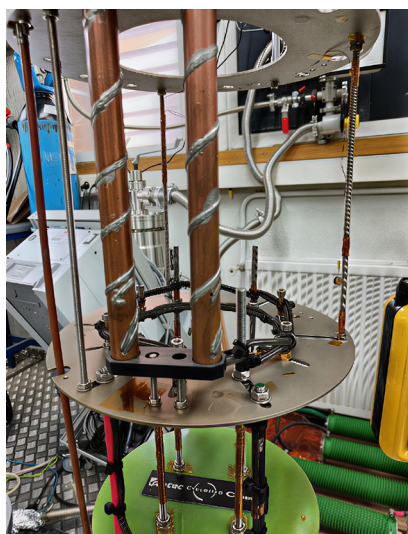


Imagen 3. Prueba bobina SMES.
(Fuente: propia)..

ya ha sido probado con éxito en otras aplicaciones superconductoras y se conoce como sistema de suministro criogénico (CSS) [3].

Estos sistemas magnéticos tienen una gran eficiencia, ofrecen un amplio rango de operación y tienen bajo mantenimiento, pero, para conseguir que operen correctamente, los costes de fabricación son altos y al tener que trabajar a bajas temperaturas para conseguir las propiedades superconductoras de los materiales la operación de este tipo de sistemas se hace muy compleja. Este sistema cuenta con una gran proyección, pero es necesaria más investigación en materiales superconductores para que puedan ser aplicables en entornos terrestres y, una vez validados estos modelos, en ambientes marinos.

Solución en contenedor para la integración de FREES

Una vez que todos los sistemas estén terminados y probados individualmente, se integrarán en una infraestructura común que, en este momento, se prevé que sea un contenedor marítimo de veinte pulgadas. Esta solución en contenedor proporciona tanto protección del medio marino como una estructura de soporte para garantizar un embarque y una conexión rápidos y fáciles al barco.

Uno de los principales objetivos de la introducción de un conjunto de dispositivos de almacenamiento de energía de respuesta rápida es ajustar mejor los requisitos de potencia y energía de la carga al sistema de almacenamiento de energía y reducir el envejecimiento de las baterías compartiendo la potencia demandada por la carga eléctrica a bordo.

La contribución de potencia de cada subsistema se determina mediante un algoritmo de optimización del control, que tiene en cuenta, por un lado, las mediciones de las variables de funcionamiento de los diferentes sistemas de almacenamiento, tales como: temperatura, corriente y estado de carga (SoC) de las baterías y los tres dispositivos de respuesta rápida. Una de las misiones fundamentales de esta fase será, por tanto, probar este algoritmo de control.

Uso de sistemas de almacenamiento de respuesta rápida en el sector militar

En los últimos años, se ha estudiado [4] el uso de supercondensadores en la industria militar, estos sistemas se han demostrado realmente útiles en para aplicaciones con sistemas de iniciación láser ya que estos sistemas requieren una alta demanda de energía y alta potencia con un tamaño muy pequeño. Los superconductores, al tener una potencia específica estimada entre 1 y 10 kW/kg, son perfectos para estas aplicaciones. Se ha estudiado que el uso de estos superconductores adaptados a entornos militares reduce el tiempo de inicio de operación de los sistemas de iniciación láser de decimas a centésimas de segundos, lo cual puede llegar a ser crítico. Además, estos sistemas de almacenamiento de energía de respuesta rápida son capaces de resistir impactos y trabajar a bajas temperaturas lo cual hacen que sean óptimos para las características de operación a las que se encontrarán sometidos los sistemas eléctricos montados a bordo.

Las otras dos tecnologías, aun permitiendo también un gran suministro de energía en poco tiempo, se encuentran limitados para estas aplicaciones debido a las grandes dimensiones de estos sistemas, posibilidad de pérdida de eficiencia en condiciones inestables.

Viabilidad técnica de los FREES

Normalmente, las baterías tradicionales de plomo-ácido tienen una energía específica entre 33 y 42 Wh/kg, con una densidad energética entre 60 y 110 Wh/L. Las baterías de ion de litio, que pueden ser más comunes hoy en día, tienen una energía específica con valores entre 100 y 165 Wh/kg y una densidad energética de entre 250 y 730 Wh/L.

En cambio, tanto el sistema KESS como el sistema SMES que se ha visto, aunque suministran energía con gran rapidez, suelen tener una baja energía específica aportada. Se estima para el sistema KESS una energía específica de 64 Wh/kg y una densidad energética de 300 Wh/L.

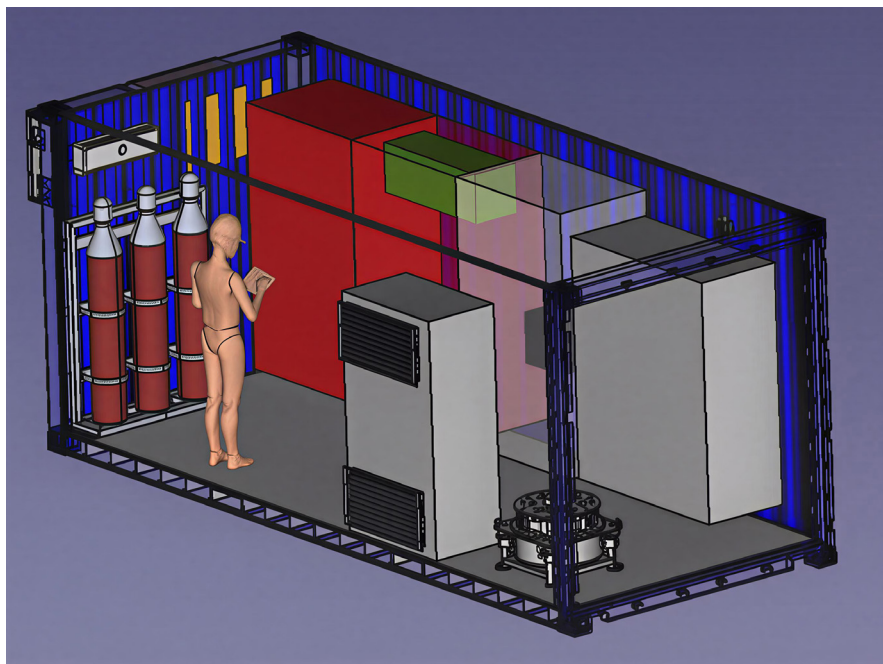


Imagen 4. Disposición FRESS en container (Fuente: propia).

Para el SMES, ya que es una tecnología que está en un estado de desarrollo algo menor, los valores de energía específica y densidad energética son algo bajos, de 0,2 Wh/kg y 0,1 Wh/L, respectivamente, en la fase de diseño, pero con idea de que se consiga escalar este sistema para obtener valores mayores.

Para los sistemas basados en supercondensadores (EES), al ser más extendidos hay una mayor gama de opciones en función del uso que se le vaya a dar entrando en una horquilla de entre 10 y 30 Wh/kg para la energía específica pero donde realmente se encuentra la diferencia es en su reducida densidad energética que se encuentra en valores de entre 1 y 10 Wh/L.

Análisis económico LCC de estas tecnologías

Para evaluar la viabilidad de instalación de estas tecnologías en el proyecto POSEIDON se llevó a cabo un análisis del coste del funcionamiento de los diferentes sistemas de almacenamiento si se instalaran en un barco, para el cual se estima una vida útil de veinticinco años. Basándose en presupuestos obtenidos durante la fase de desarrollo de producto del proyecto, estimaciones futuras para evaluar el coste que va a suponer

deshacerse de los sistemas de almacenamiento una vez agotada su vida útil y la siguiente fórmula se ha evaluado el coste total durante todo el

$$C = TIC + \sum_{i=1}^n \frac{O\&M}{(1+i)^n} + \sum_{i=1}^n \frac{E_{in} * C_E * N}{(1+i)^n} + RC_{n,c}$$

ciclo de vida del barco:

donde TIC significa «coste total de inversión», O&M significa «coste operativo y de mantenimiento», i es un parámetro denominado «tasa de descuento», n es el número de años del análisis, E_{in} significa «electricidad almacenada», C_E expresa el «coste de la electricidad» tomando un valor

medio, N significa «número de ciclos» de carga y descarga que sufre el sistema, $RC_{n,c}$ significa «coste de las piezas sustituidas» y D&R significa «coste de eliminación y reciclaje».

Evaluando los costes provenientes del KESS se puede ver que la mayor parte del presupuesto durante todo el ciclo de vida del KESS es el capital invertido en diseño y fabricación de este. Una cosa que se ha visto de este sistema es la gran cantidad de presupuesto de costes operativos, esto se debe a que el sistema tiene grandes pérdidas de electricidad debido a posibles rozamientos del volante y otras partes de la estructura durante su funcionamiento. Debajo se puede ver un gráfico porcentual de donde proviene cada coste para nuestro modelo de prototipo.

En cambio, los supercondensadores, al ser un sistema que ya ha sido más estudiado y que ya está siendo comercializado, tienen los gastos de diseño más bajos y los de fabricación también se ven reducidos. En el gráfico de abajo, se puede ver cómo gran parte del gasto es relativo a la propia electricidad que se consumirá, lo que es nuestro objetivo; ya que es gasto que realmente se aprovechará. El problema de los supercondensadores es que tienen una vida útil estimada de veinte años, por lo que, para poder cumplir con el ciclo de vida de operación de un barco, será necesario llevar a cabo un recambio completo del sistema de supercondensadores instalados. En la siguiente figura, se puede ver un gráfico porcentual

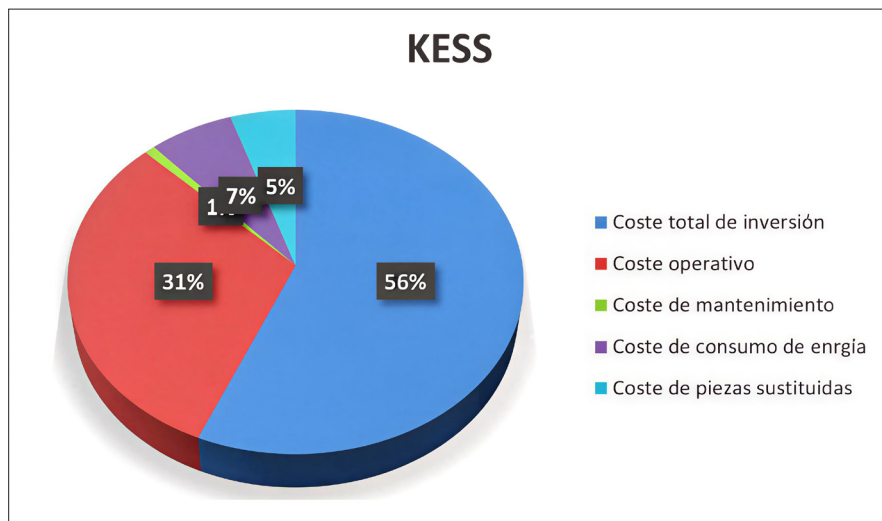


Imagen 5. LCC del KESS (Fuente: propia).

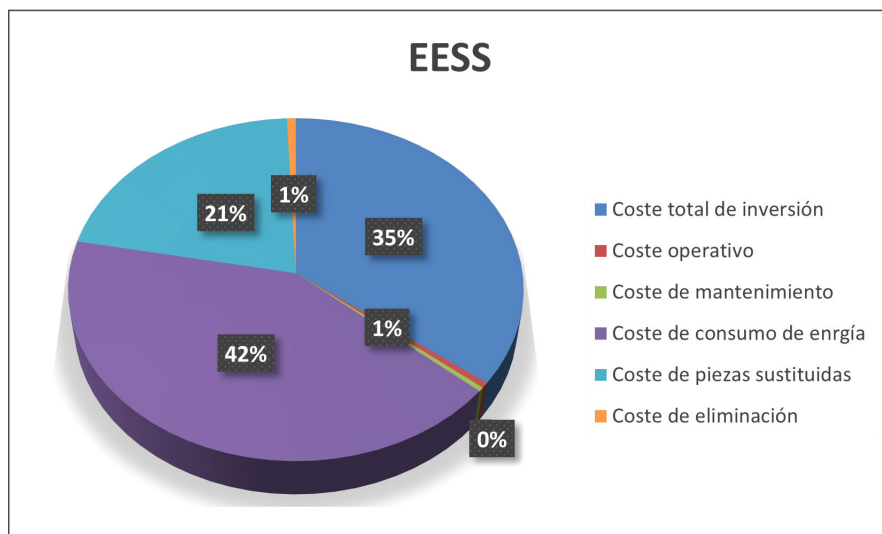


Imagen 6. LCC del EESS. (Fuente: propia).

de donde proviene cada coste para nuestro modelo de a aplicar en el proyecto Poseidon.

Por último, el sistema de almacenamiento de energía basada en un campo magnético, al ser una tecnología que aún está en desarrollo tienes unos altos costes de inversiones por la gran cantidad de tiempo requerida para llevar a cabo el diseño del producto final y porque los materiales, al tratarse de materiales que deben tener propiedades superconductoras, tienen un coste muy alto. Este sistema, sin embargo, tienes unos costes de

mantenimiento prácticamente nulos, quedando los costes operativos derivados del sistema de reducción de temperatura para poder alcanzar las propiedades superconductoras de los materiales usados. Como se ha nombrado anteriormente, este modelo es un pequeño prototipo y, por tanto, la cantidad de energía que va a poder almacenar se estima que será baja, pero se prevé que esta aumente al escalar el sistema en versiones posteriores. En la siguiente figura, se puede ver un gráfico porcentual de donde proviene cada coste para nuestro modelo de prototipo.

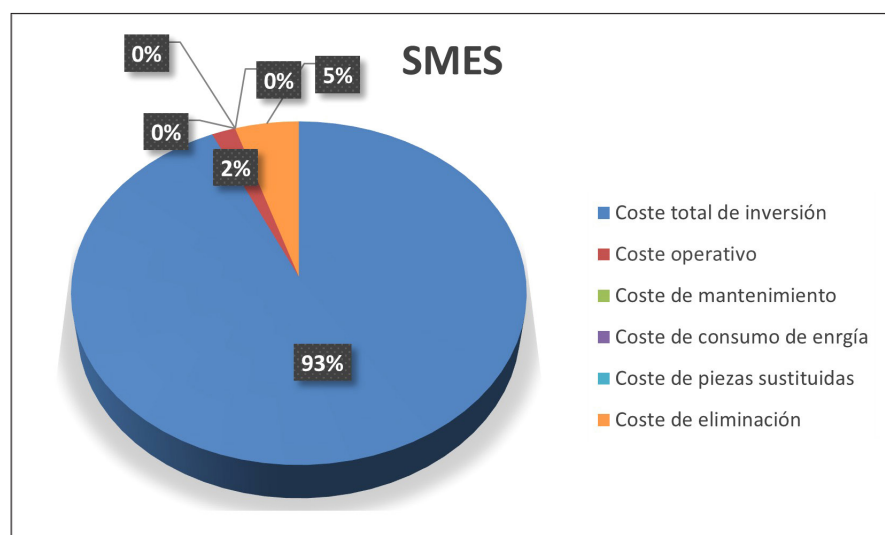


Imagen 7. LCC del SMES. (Fuente: propia).

Referencias

- [1] Thompson, M. (2024). China conecta a la red el mayor proyecto de almacenamiento de energía con volante de inercia del mundo [en línea]. *Sigmaearth*. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://sigmaearth.com/es/china-connects-worlds-largest-flywheel-energy-storage-project-to-the-grid/>
- [2] Roca, J. A. (2025). Ingenieros australianos desarrollan una nueva tecnología de supercondensadores que podría almacenar suficiente energía para reemplazar baterías [en línea]. *El periódico de la energía*. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/ingenieros-australianos-desarrollan-una-nueva-tecnologia-de-supercondensadores-que-podria-almacenar-suficiente-energia-para-reemplazar-baterias/>
- [3] Munilla, J. et al. (2021). *Commissioning of an Autonomous Cooling System for a Compact Superconducting Cyclotron Devoted to Radioisotope Production*. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 31(5), pp. 1-4. DOI: 10.1109/TASC.2021.3070118
- [4] Yu, D. et al. (2025). *Power supply for the projectile-borne electromechanical system: A review*. *Green energy and Intelligent Transportation*. 4(5).

Boletín de Observación Tecnológica en Defensa

Disponible en

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

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



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA