Boletín DE OBSERVACIÓN TECNOLÓGICA EN DEFENSA

Dirección General de Armamento y Material
Armamento y Material

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PLANIFICACIÓN, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN
Boletín de Observación Tecnológica en Defensa n.º 71 • 4.º trimestre de 2021

MATERIALES DEL FUTURO

Demostrador Instrumental de Guerra Electrónica (DIGE)

Capacidad de Defensa en desarrollo de motores de avión

Edita:

MINISTERIO DE DEFENSA
SUBSECRETARÍA DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

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: TCol. Juan Manuel González del Campo Martínez.

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

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

Portada: *H2020 FET Projects related to new materials (Fuente: https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/h2020-fet-projects-technologies-new-materials).*

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?

6 Finalizada la primera fase del proyecto DIGE

Tecnologías Emergentes

8 Materiales del futuro

En Profundidad

11 Capacidad de Defensa en el desarrollo de motores de aviación

ROBÓTICA TERRESTRE EN APLICACIONES DE DEFENSA

Un ámbito tecnológico que ha ido capitalizando un progresivo interés y desarrollo en el ámbito de defensa en los últimos años es el de los vehículos no tripulados terrestres (UGV). La posibilidad de realizar misiones con vehículos terrestres controlando la plataforma a distancia supone una ventaja táctica clara en zonas donde existe un nivel de amenaza elevado, al eliminar el riesgo para el personal que participa en la misión. Además, mediante la introducción en las plataformas de crecientes capacidades de adquisición de información y de autonomía de navegación, se mejora la consciencia situacional del operador a la vez que se reduce su carga cognitiva y se incrementa la eficiencia de operación del sistema.

Si bien hay ámbitos que tradicionalmente han tenido un mayor desarrollo, como los relacionados con la detección y desactivación de explosivos, o la defensa NRBQ, existen muchas otras aplicaciones que pueden beneficiarse, tales como la vigilancia de perímetros, el reconocimiento o exploración de áreas, el apoyo logístico al combatiente a pie, la búsqueda y rescate, y apoyo en emergencias, la operación en entornos urbanos o el apoyo a los ingenieros, por citar algunos.

Las tendencias actuales se basan en diseñar nuevos sistemas a partir de plataformas robóticas específicas, o bien en automatizar vehículos tripulados en servicio para su funcionamiento teleoperado o semiautónomo, tanto de forma individual como considerando varios vehículos funcionando cooperativamente (p. ej., en modo convoy), dotándoles de las cargas de pago y los niveles de autonomía necesarios para las aplicaciones a las que se dirigen.

En este contexto, dentro del ámbito de la I+D+i de defensa, se han venido promoviendo en los últimos años algunas actividades dirigidas a desarrollar nuevas soluciones tecnológicas basadas en la automatización de un vehículo táctico (demostrador REMOTE DRIVE) y un convoy de vehículos (demostrador ARCO). Más recientemente, se ha lanzado una temática dentro del Programa COINCIDENTE dirigida a las aplicaciones de apoyo logístico al combatiente a pie y operación en entornos urbanos, se han llevado a cabo jornadas tecnológicas para dar a conocer tanto necesidades operativas como soluciones tecnológicas desarrolladas por la industria (Jornadas sobre Sistemas Autónomos y Robóticos (RAS) - Taller «1» y Taller «11» de la Fuerza 2035), se ha promovido la experimentación técnico-operativa a través del Programa ESCORPIÓN y la industria española participa en un proyecto europeo (iMUGS) para desarrollar una solución modular y escalable aplicada a distintas misiones. Es, asimismo, destacable cómo la industria nacional ha venido promoviendo, por iniciativa propia, ambiciosas actividades de I+D+i aplicadas que están aumentando la disponibilidad de soluciones tecnológicas en el mercado.

De cara a las próximas décadas, todas las agendas y estrategias tecnológicas en el ámbito de defensa (incluida la ETID 2020) destacan el elevado potencial e interés de promover I+D+i en este ámbito, lo que previsiblemente abrirá nuevas oportunidades para el tejido tecnológico nacional. Por otro lado, existe una amplia base tecnológica nacional capaz de abordar los retos tecnológicos presentes en este ámbito y participar en las mencionadas oportunidades, incluyendo a empresas, centros de investigación y universidades. Si bien la mayoría de estas entidades desarrollan su actividad en torno a aplicaciones civiles, el elevado uso dual de este tipo de sistemas hace que su experiencia y capacidades sean fácilmente trasladables a aplicaciones de seguridad y defensa.

Esta combinación de demanda de soluciones tecnológicas, existencia de capacidades y experiencia en el tejido tecnológico e industrial español, y promoción de nuevas oportunidades de cooperación en I+D+i a nivel nacional y europeo, permiten mirar con expectación y optimismo a la robótica terrestre de aplicación a defensa.

Actualidad

¿Dónde hemos estado?

6 - 7 de octubre de 2021

IV EDICIÓN FORO EJÉRCITO-EMPRESAS

Los días 6 y 7 de octubre asistimos a la IV edición del Foro Ejército-Empresas que tuvo lugar en Toledo, pero que se retransmitió por videoconferencia para las personas interesadas en seguir el evento. En él se expusieron las necesidades de ET en cuanto a nuevos equipos y materiales en el marco del objetivo «Fuerza 2035», además de dar a conocer las capacidades y desarrollos del tejido tecnológico nacional para dar respuesta a esas necesidades, todo ello con el objetivo de crear sinergias entre las FAS y la industria española de defensa».

18 a 19 de octubre de 2021

WORKSHOP "Emerging & Disruptive Technologies in Optronics for Defence Applications" de la EDA

El encuentro se celebró de manera remota mediante VTC y su finalidad fue la identificación de tecnologías emergentes con capacidad de disrupción para aplicaciones militares en el ámbito de la optrónica.
Se trataron de forma libre temas como nuevos tipos de detectores, sistemas multiespectrales, sistemas activos o nuevos sistemas ópticos.

27 a 29 de octubre de 2021

PBM del Panel SET de la STO

La 48º edición del *Panel Bussiness Meeting* (PBM) del *Panel Sensors & Electronics Technology* (SET) de la STO se celebró de manera remota mediante VTC.
Se trataron múltiples temáticas de grupos de trabajo relacionadas con radar, radiofrecuencia, sistemas acústicos y sísmicos, o sensores EO/IR, así como novedades de tecnologías emergentes y potencialmente disruptivas como nuevos tipos de Sistemas de Visión Nocturna (SVN) y sistemas multiespectrales y multisensor.

15 a 18 de noviembre de 2021

AEROEND 4.1 2021

Las jornadas tecnológicas AEROEND 4.1 se celebraron conjuntamente en el paraninfo de la Universidad de Castilla-La Mancha, sita en Albacete, y en la Maestranza de Albacete (MAESAL). Se llevaron a cabo ponencias por parte de representantes de los sectores industriales, académicos y militares del ámbito de los ensayos no destructivos aeronáuticos, tratando entre otras cosas la integración de nuevas tecnologías como la inteligencia artificial o la fabricación aditiva.

... entre otros eventos

¿Dónde hemos estado?

23 a 24 de noviembre de 2021

2nd EDA AHWG SPACE INDUSTRY WORKSHOP

A raíz del buen resultado del 1er *workshop* con la industria espacial y de la 3ª reunión del AHWG *Space* de la EDA (primera reunión semipresencial del grupo), se decidió celebrar este segundo evento virtual de cuatro días de duración, organizado por dicho grupo de la EDA. El objetivo de este evento fue tratar importantes temas relacionados con el último listado de TBB (*Technology Building Blocks*) que manejaba hasta el momento el AHWG, para recibir el *input* de la industria. Además, se presentaron propuestas de proyecto por parte de la industria que serán de gran utilidad para los integrantes del grupo de trabajo a la hora de elaborar la SRA (Agenda estratégica de investigación). De los diecinueve países que en esta fecha forman el grupo, representados por sus ministerios de defensa, industria, centros de investigación y universidades, cabe destacar la gran participación activa de España, junto con Italia, Francia y otros países, por su elevada presencia y gran número de propuestas, que en el caso de España estaban muy alineadas con la actual ETID 2020. Las empresas españolas participantes fueron Airbus DS España, Thales Alenia Space España, Deimos, Gmv, Indra, Sener, Satlantis, Inster, Aicox y Skydweller.

30 de noviembre al 3 de diciembre de 2021

XV Jornadas *STIC CCN-CERT 2021*

Del 30 de noviembre al 3 de diciembre de 2021 se ha celebrado la XV edición de las Jornadas STIC CCN-CERT, organizadas por el Centro Criptológico Nacional (CCN), tanto en modo *online* como en modo presencial, en Kinépolis (Ciudad de la Imagen, Madrid), con el título «Ciberseguridad 360º. Identidad y control del dato». Este evento ha reunido a profesionales de la materia, administraciones públicas, empresas, centros de investigación y a la universidad en torno a una mesa común para compartir la información más actualizada. Durante estos cuatro días se han realizado múltiples conferencias, distribuidas en varios módulos que se han impartido en paralelo, en donde se han tratado temas como amenazas y tendencias, *Security Operations Centres* (SOC) y cibercrimen, el Esquema Nacional de Seguridad (ENS), control industrial y transformación digital, la implementación de la Directiva NIS 2.0 en Europa, productos o tecnologías, como la criptografía post-cuántica, entre otros temas.

… entre otros eventos

Finalizada la primera fase del proyecto DIGE

Autores: CN José Antonio López Moreno, Fernando Obelleiro Basteiro, Alberto Fontán Correa, Universidad de Vigo.

Palabras clave: guerra electrónica, ESM, ECM, demostrador instrumental, DIGE, RCS, CEMEDEM, Universidad de Vigo, ENM.

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 2.7.1.

Entrega del sistema DIGE en las instalaciones del CEMEDEM en la ENM de Marín. (Fuente: Armada)

Introducción

El Demostrador Instrumental de Guerra Electrónica (DIGE) es un sistema multipropósito que permite realizar la puesta a punto de sistemas de guerra electrónica (ESM y ECM) de las distintas unidades de la Armada, así como la medida de diagramas de antenas de dichas unidades y la medida de su firma radar.

DIGE

El sistema se caracteriza por su gran versatilidad, tanto en sus capacidades operativas, como en su portabilidad y facilidad de uso. El sistema DIGE está montado en un vehículo todo terreno dotado de numerosas protecciones ambientales, lo que le permite operar desde cualquier ubicación. Una vez alcanzado el emplazamiento de medida, el sistema DIGE se puede desplegar en menos de 10 minutos y, gracias a su facilidad de uso, puede llegar a operarse por un único usuario, ya sea en modo local (*in situ*) o de forma remota (mediante una conexión wifi o 4G cifrada y segura). Todos los equipos están protegidos frente a la intemperie y dispone de un potente sistema de refrigeración integrado que le permite operar en un rango muy amplio de temperaturas.

En transmisión, el DIGE permite la emisión de forma controlada de todo tipo de señales radioeléctricas: en onda continua o pulsada, con todo tipo de modulaciones, tanto intrapulso como interpulso, con barridos de frecuencia o a frecuencia fija, en configuraciones de goniometría, o configuraciones *ad hoc* definidas por el usuario, entre otras. En recepción, el DIGE dispone de la capacidad de recibir y analizar las señales emitidas por los equipos electrónicos de una unidad bajo medida o comparar las señales transmitidas a un blanco con la respuesta de las contramedidas electrónicas de este. En su primera fase, el DIGE cubre la banda radar de 2 a 18 GHz, permitiendo cualquier combinación de polarizaciones lineales, dado que sus antenas son de doble polarización. En una segunda fase, que se está desarrollando en la actualidad, las capacidades del

Imagen CAD del DIGE. (Fuente: Armada)

sistema se extenderán a la banda de comunicaciones.

Su funcionalidad de medida de diagramas permite obtener/medir el diagrama de radiación de las antenas de un buque o unidad colaboradora, ya sean antenas fijas o rotatorias.

Por último, su capacidad de medidas de RCS permite obtener la sección equivalente radar (RCS) del buque en todos sus aspectos.

El sistema está dotado de un interfaz gráfico avanzado que permite al operador configurar fácilmente el sistema para cualquier misión, revisar en tiempo real la ejecución de la misma y visualizar los resultados. El *software* del sistema tiene un elevado grado de configurabilidad, adaptándose a las necesidades o preferencias de cada usuario. Ofrece la posibilidad de crear y gestionar las configuraciones de medidas sin necesidad de tener el sistema desplegado, ni siquiera encendido (maximizando el tiempo de adquisición de datos durante una jornada de medida). Además, dispone de avanzadas capacidades de postprocesado de los datos registrados durante las medidas, permitiendo realizar operaciones sobre estos con el fin de generar los informes necesarios en cada caso. DIGE permite recrear *a posteriori* una medida realizada, replicándola como si se estuviese efectuando en tiempo real, para entrenamiento de operadores de guerra electrónica en el aula.

Para simplificar el uso del sistema, DIGE integra un subsistema de seguimiento multimodo que permite el seguimiento automático de todo tipo de blancos: buques, periscopios, helicópteros, aviones o señuelos, entre otros. Dependiendo de las condiciones de medida, del entorno y del tipo de blanco, el seguimiento puede ser radar, GPS, óptico o manual. El rango de distancias para medir un objetivo alcanza hasta el horizonte óptico (aproximadamente, 16 km).

Como accesorio del sistema, el DIGE dispone de una unidad remota embarcada (URE) que, en el caso de unidades colaboradoras, se puede instalar a bordo de la unidad bajo medida. La URE proporciona la posición GPS de la unidad colaboradora, así como información directa de su rumbo, permitiendo su seguimiento (tanto en distancia como en acimut) incluso en las condiciones climatológicas más adversas o en presencia de elementos que puedan enmascarar la señal radar.

Conclusiones

Mencionar finalmente que el sistema DIGE ofrece la posibilidad de ser manejado localmente o mediante operación remota (WiFi y 4G). Una vez desplegado y encendido, el sistema puede controlarse desde una localización distinta a la de su emplazamiento, cumpliendo siempre con requisitos de ciberseguridad y confidencialidad de datos. En este caso, la interfaz de control es exactamente igual a la de operación local, siendo transparente para el usuario el método de conexión al DIGE. En todo caso, el equipo almacena siempre localmente la configuración y los resultados de cada medida para poder maximizar la velocidad de registro de datos durante la medida, siendo necesaria la posterior extracción de estos al medio físico asignado para su almacenamiento seguro.

La primera fase del sistema finalizó el pasado 27 de octubre, siendo entregado a la Armada en las instalaciones del CEMEDEM en la ENM de Marín y, posteriormente, cedido a la Universidad de Vigo para poder llevar a cabo los trabajos de la fase 2 del mismo proyecto, cuya finalización está prevista para junio de 2022.

Despliegue de DIAR, DIFI y Laboratorio móvil del CEMEDEM en Arenosillo (Octubre21). (Fuente: Armada)

Tecnologías Emergentes

Materiales del futuro

Autores: D. Luis Miguel Requejo Morcillo, OT MAT, SDG PLATIN.

Palabras clave: materiales, IA, multiescala, jerárquico, arquitectónico.

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 3.2.1, 3.2.2, 9.1.1.

Introducción

Para los ingenieros y científicos dedicados al desarrollo de nuevos materiales, el principal objetivo es la mejora continua de sus propiedades (pesos, prestaciones mecánicas, propiedades físicas, químicas, etc.), pero también hay que considerar otros de especial interés como son la multifuncionalidad, la procesabilidad o el coste, por ejemplo, de cara a conseguir productos de gran calidad a disposición de los usuarios finales.

Uno de los usuarios más exigentes, en cuanto a lo que prestaciones de materiales se refiere, son las Fuerzas Armadas, por su necesidad de incorporar en los sistemas militares tecnologías punteras lo que obedece, en muchos casos, a la búsqueda de una ventaja cualitativa y a la capacidad de disuasión sobre el potencial adversario.

Aunque el margen de mejora de las prestaciones de los materiales considerados como convencionales puede parecer pequeño, la comunidad científica y tecnológica de este sector ha recurrido durante los últimos tiempos a nuevos conceptos y estrategias para lograr saltos cualitativos importantes. Algunos son los materiales arquitectónicos, los jerárquicos, las herramientas de simulación multiescala o las técnicas de aprendizaje automático, que supondrán un avance muy significativo en la ciencia e ingeniería de materiales para lograr los objetivos comentados anteriormente. Este artículo tratará de aclarar qué son estos conceptos y cómo se aplican dentro el ámbito del desarrollo de nuevos materiales.

El aprendizaje automático

La digitalización y la virtualización también son cada vez más importantes en la ciencia de los materiales: la investigación, el desarrollo y la producción de nuevos materiales dependen cada vez más de la disponibilidad de herramientas de simulación y de aprendizaje automático en el que la inteligencia artificial (IA) adquiere y aplica de forma autónoma nuevos conocimientos, pudiendo permitir a los investigadores desarrollar materiales

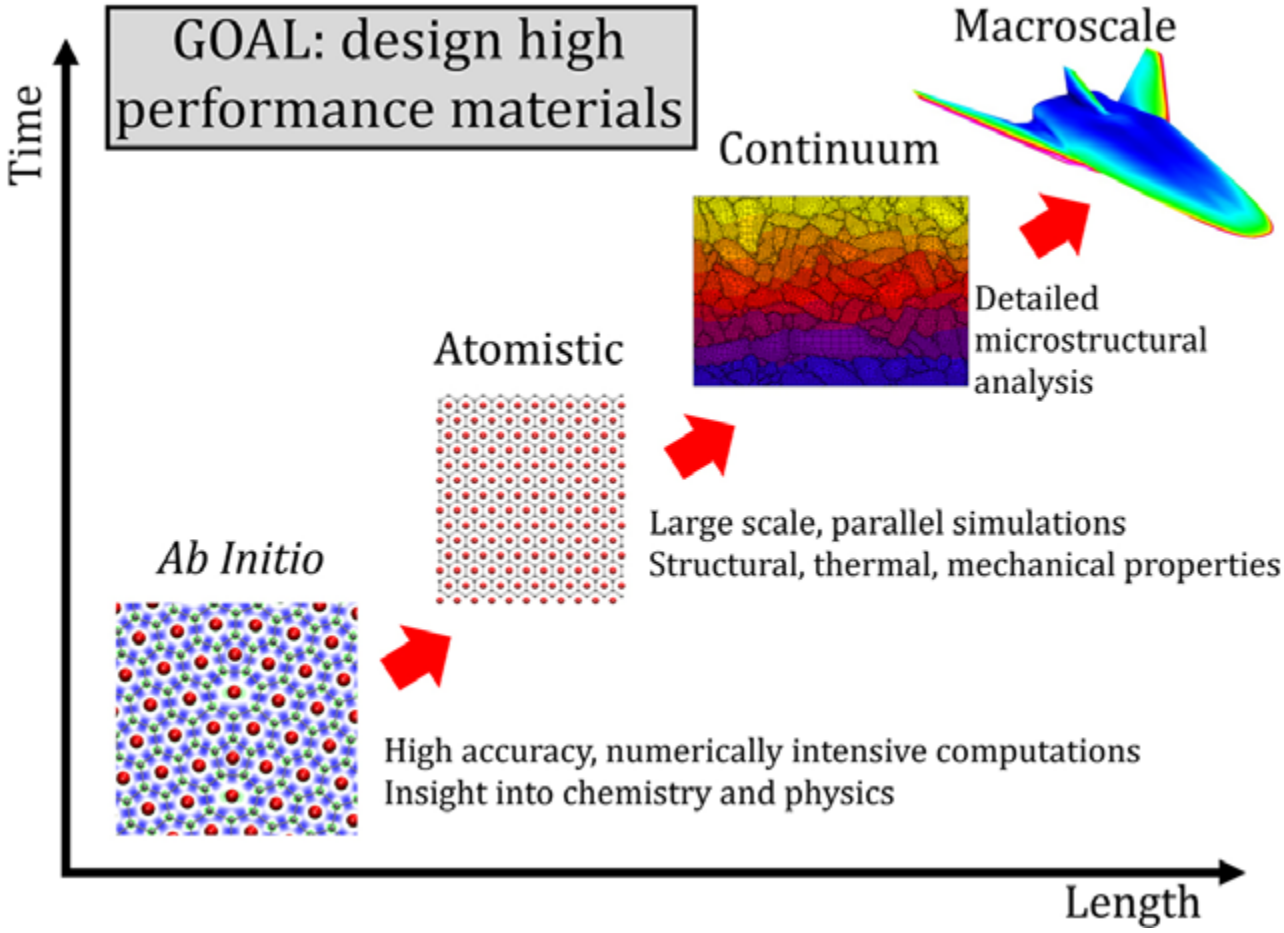


Grafico representativo del modelado multiescala. La química de un material se puede probar con la mecánica cuántica; sus propiedades térmicas y mecánicas, con técnicas atomísticas; y sus propiedades a micro y macroescala, con métodos continuos. El salto de un nivel a otro puede generar un poderoso modelo predictivo. (Fuente: John Lawson, Alexander Thompson, www.nas.nasa.gov)

en un entorno puramente virtual. La IA y los métodos de aprendizaje automático específicamente adaptados a las simulaciones de materiales permiten lograr una importante ventaja de velocidad, en comparación con los métodos de simulación convencionales basados en cálculos clásicos o de mecánica cuántica. Esto redunda en la capacidad de desarrollar sistemas de materiales más grandes y complejos en un entorno puramente virtual, y comprenderlos y optimizarlos hasta el nivel atómico.

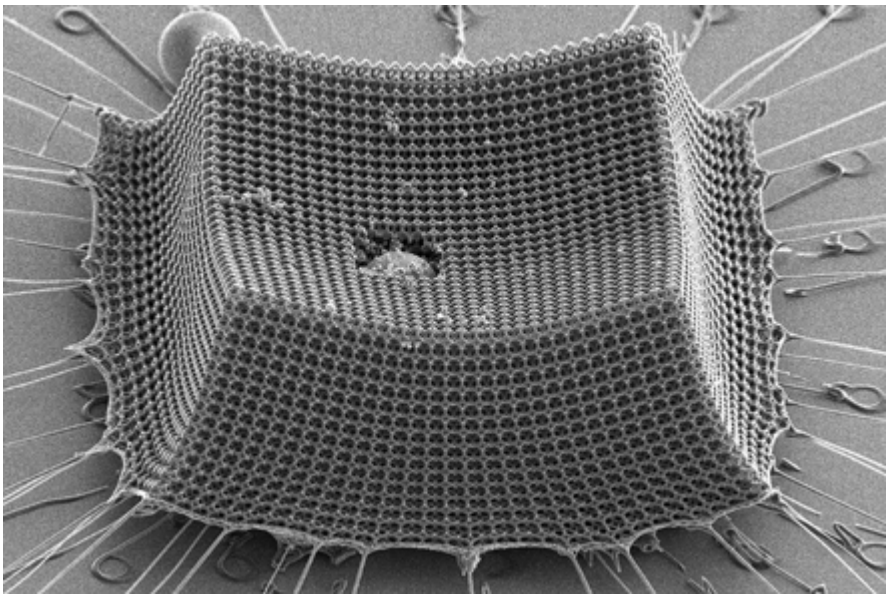
En los principios básicos del aprendizaje automático, utilizado para las simulaciones en la ciencia de los materiales, hay que incluir el proceso de adquisición de datos y los métodos de aprendizaje activo. Los algoritmos de aprendizaje automático no solo permiten a la inteligencia artificial procesar los datos de entrada, sino también encontrar patrones y correlaciones en grandes conjuntos de datos, aprender de ellos, y hacer predicciones y decisiones autónomas.

En cualquier caso, para ampliar las posibilidades de las simulaciones de materiales en el futuro, los expertos en la materia sugieren el desarrollo de métodos híbridos que combinan métodos convencionales y de aprendizaje automático.

El análisis multiescala

Normalmente, en la definición de las prestaciones de los productos futuros se establecen requisitos que superan las capacidades de los materiales que están inmediatamente disponibles. Componentes cada vez más pequeños y ligeros, mejores propiedades mecánicas o mayor número de funcionalidades, entre otros. En definitiva, los científicos e ingenieros deben encontrar soluciones cada vez más complicadas.

Este desafío se extiende más allá de saber elegir qué material o combinación de materiales se podría usar, de sus estructuras o de cómo se fabrica una pieza terminada. Para optimizar su diseño, aprovechar realmente los beneficios que ofrecen los materiales avanzados y entender las relaciones entre su estructura y sus propiedades, se debe adoptar un enfoque «multiescala». Esto consiste en considerar cómo las diferentes escalas de longitud (es decir, desde macroscópicas a microscópicas y nanoscópicas) y las diversas estructuras contribuyen a las propiedades de los productos finales.



Este material arquitectónico, más delgado que un cabello humano, puede absorber los impactos de micropartículas que viajan a velocidades supersónicas. (Fuente: www.caltech.edu)

El comportamiento de los materiales es el resultado de fenómenos fisicoquímicos que ocurren a diferentes escalas. Para entenderlo, es necesario aplicar la técnica de análisis adecuada a la escala en que se origina el comportamiento que se quiere estudiar, hasta llegar a la escala ingenieril, que es en la que se sitúan las piezas, aparatos y sistemas que se pretenden diseñar. Dependiendo de la escala, cada técnica de simulación aporta diferente información de utilidad. Las simulaciones a escala básica ayudan a comprender el origen del comportamiento del material, analizar efectos de refuerzos, aditivos, etc. Conforme se incrementa la escala, la simulación permite evaluar cómo se van acumulando efectos y se va perfilando el comportamiento del material.

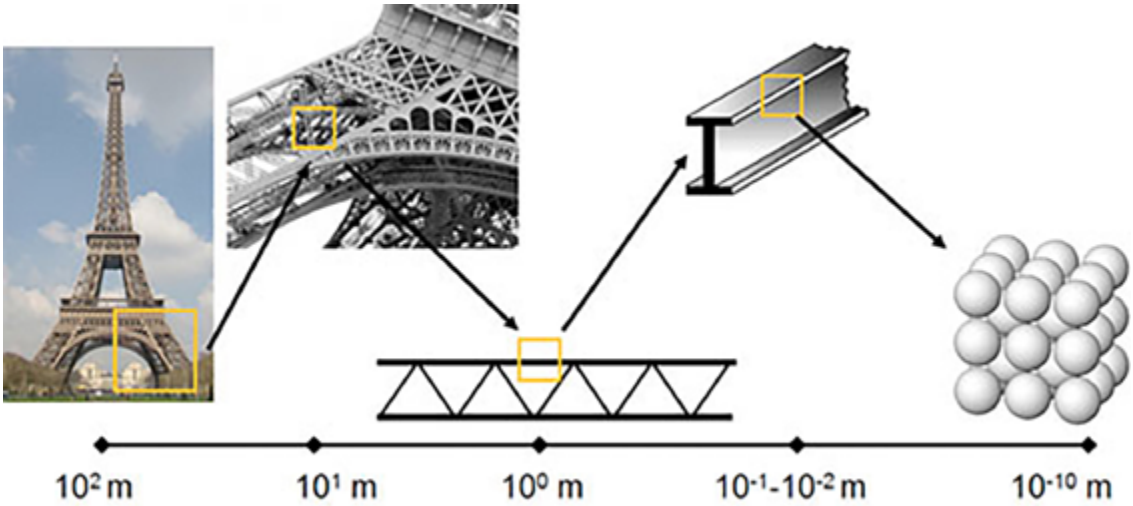
Las simulaciones para el diseño de materiales multiescala son un ámbito científico en rápido crecimiento. Con el aumento de la capacidad de procesamiento de los ordenadores y los métodos numéricos cada vez más especializados, se pueden lograr muy buenas simulaciones de la mecánica de los materiales. Lamentablemente, no existe una fórmula única que pueda describir estos cambios a medida que avanzamos de la subatómica a la macroescala, pero existen herramientas que permiten analizar más rápidamente diferentes combinaciones de materiales y estructuras para optimizar el rendimiento del producto final.

El análisis multiescala permite diseñar con más libertad, permitiendo realizar cambios en los productos en función de múltiples variables y explorar activamente nuevas áreas de investigación de vanguardia y metodologías de materiales que incluyen nanomateriales, materiales arquitectónicos, jerárquicos o los inteligentes, entre otros. Por tanto, los beneficios del modelado y simulación de materiales multiescala mejoran de manera integral la productividad en I + D.

Materiales arquitectónicos

Los materiales arquitectónicos son materiales multifásicos y/o celulares en los que la distribución de las fases se controla y optimiza cuidadosamente para lograr funcionalidades o propiedades específicas. Estos materiales pueden considerarse como un medio homogéneo en el que las propiedades son función de la forma en que la materia está dispuesta en la celda unitaria y de las del material constituyente.

En un principio, la investigación en este campo ha dado como resultado la identificación de una serie de estructuras topológicamente simples, fáciles de fabricar y estables (tipo *honeycombs*), que se han optimizado para obtener una rigidez y resistencia específicas, protección frente a impactos y explosiones, absorción acústica, dispersión de ondas, disipación del calor y combinaciones de todas estas propiedades.



Estructura jerárquica de la Torre Eiffel. Tiene más de 300 metros de altura, con una base cuadrada de 100 metros por lado. La estructura más grande está compuesta por una celosía donde vigas diagonales con dimensiones del orden de decenas de metros conectan elementos entre sí. Cada viga individual tiene dimensiones de sección transversal de centímetros, compuestas de un material de hierro con una estructura atómica de átomos de hierro, carbono, silicio y manganeso en una estructura de celosía en la escala Angstrom (10^{-10} metros). (Fuente: Laboratorio de Mecánica y Biología Ósea, Universidad de Indiana-Universidad de Purdue en Indianápolis)

En los últimos años, los grandes avances en las técnicas de fabricación (fundamentalmente las tecnologías de fabricación aditiva) y el desarrollo de las nuevas herramientas de modelado multifásicas, y multiescala e IA, han permitido la obtención de nuevos materiales arquitectónicos con geometrías más complejas y un control más preciso sobre la distribución de las fases sólidas y los huecos, desde la escala nanométrica hasta la macrométrica. El resultado son materiales celulares con propiedades como la densidad, rigidez, resistencia, absorción de energía, permeabilidad o reactividad química, no alcanzadas anteriormente. Además, existe la multifuncionalidad, que promete avances importantes en áreas tecnológicas como, por ejemplo, en el caso de los recubrimientos funcionales.

Algunas de las líneas de investigación más interesantes en este campo son la exploración de los efectos del tamaño en el desarrollo de materiales nanoestructurados para la obtención de mejores propiedades, la investigación de celdas unitarias geométricamente complejas con respuestas mecánicas más eficientes, métodos de fabricación novedosos con mayor resolución y escalabilidad, y el desarrollo de herramientas de optimización de diseño mejoradas.

Materiales jerárquicos

Los materiales jerárquicos son materiales organizados en estructuras de múltiples tamaños; es decir, contienen elementos estructurales que, a su vez, tienen estructura. El orden jerárquico de una estructura o de un material puede definirse como el número n de niveles de escala con estructura reconocida. Por ejemplo, un sólido que se componga de varias capas de distinto grosor, o que tenga cavidades tubulares y concéntricas ocupadas por átomos, se puede considerar una estructura jerárquica. Esta jerarquía estructural puede desempeñar un papel importante en la determinación de las propiedades del material a nivel de producto.

La comprensión de los efectos de la estructura jerárquica puede orientar la síntesis de nuevos materiales con propiedades físicas que se adaptan a aplicaciones específicas. Estos materiales son materiales extremos y se puede, por ejemplo, lograr una relación resistencia/peso extremadamente grande. El desarrollo de este tipo de materiales es un tema interdisciplinario que incluye conceptos de ciencia de los materiales, química, nanotecnología e incluso la biotecnología, debido a su naturaleza bioinspirada. La naturaleza utiliza una jerarquía de escalas de tamaño y unas estructuras escalonadas para construir materiales ligeros y resistentes desde un punto de vista mecánico.

Estos materiales se utilizan en aplicaciones como la protección, infraestructuras, monitorización de la salud estructural y autorreparación.

Conclusiones

El modelado y la simulación están transformando la ciencia de los materiales, hasta tal punto que se ha convertido en una herramienta indispensable para acelerar y optimizar el descubrimiento de nuevos materiales que cubran los requisitos cada vez más exigentes en cuanto a prestaciones y multifuncionalidad que los futuros sistemas de defensa necesitan.

Nuevos materiales, como los denominados arquitectónicos o los jerárquicos, han despertado un enorme interés porque muestran comportamientos nuevos y personalizados mediante la interacción entre las propiedades del material y la geometría.

Durante los próximos años, se espera un gran progreso en la optimización de las propiedades mecánicas y multifuncionales. Paralelamente, también se contemplan progresos en la mejora de las herramientas de simulación y aprendizaje automático ya que, a día de hoy, no se tiene constancia de la existencia de un algoritmo o herramienta que brinde la capacidad de diseño de materiales y estructuras con comportamientos no lineales, sin olvidar las técnicas de fabricación escalables que permiten la producción rápida de materiales a gran escala con características controladas a micro y nanoescala.

En Profundidad

Capacidad de Defensa en el desarrollo de motores de aviación

Autor: D. Carlos Garrido Sánchez, OT ENEP, SDG PLATIN.

Palabras clave: propulsión, ensayo, datos, emisiones, contaminantes.

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 3.4.3, 3.4.4, 7.2.1, 7.2.2.

Introducción

Una de las más insospechadas, interesantes y quizás desconocidas capacidades nacionales es el desarrollo de prototipos de motores de aviación para uso militar o civil, a pesar de no disponer actualmente a nivel nacional de ninguna empresa capaz de diseñar, fabricar y comercializar un motor completo.

Por lo tanto, puede resultar extraño que dentro del Ministerio de Defensa exista esta capacidad tecnológicamente puntera, la cual se ha convertido en un referente mundial por excelencia, eficacia y profesionalidad. Y todo dentro del sector público español.

Junto con el principal actor privado nacional, ITP AERO, líder en el desarrollo de nuevos materiales, procesos de fabricación y diseño de módulos de motores aeronáuticos, España está a la cabeza en cuanto al desarrollo de una de las más complejas tecnologías presentes en el mundo para afrontar los retos de los desarrollos del futuro.

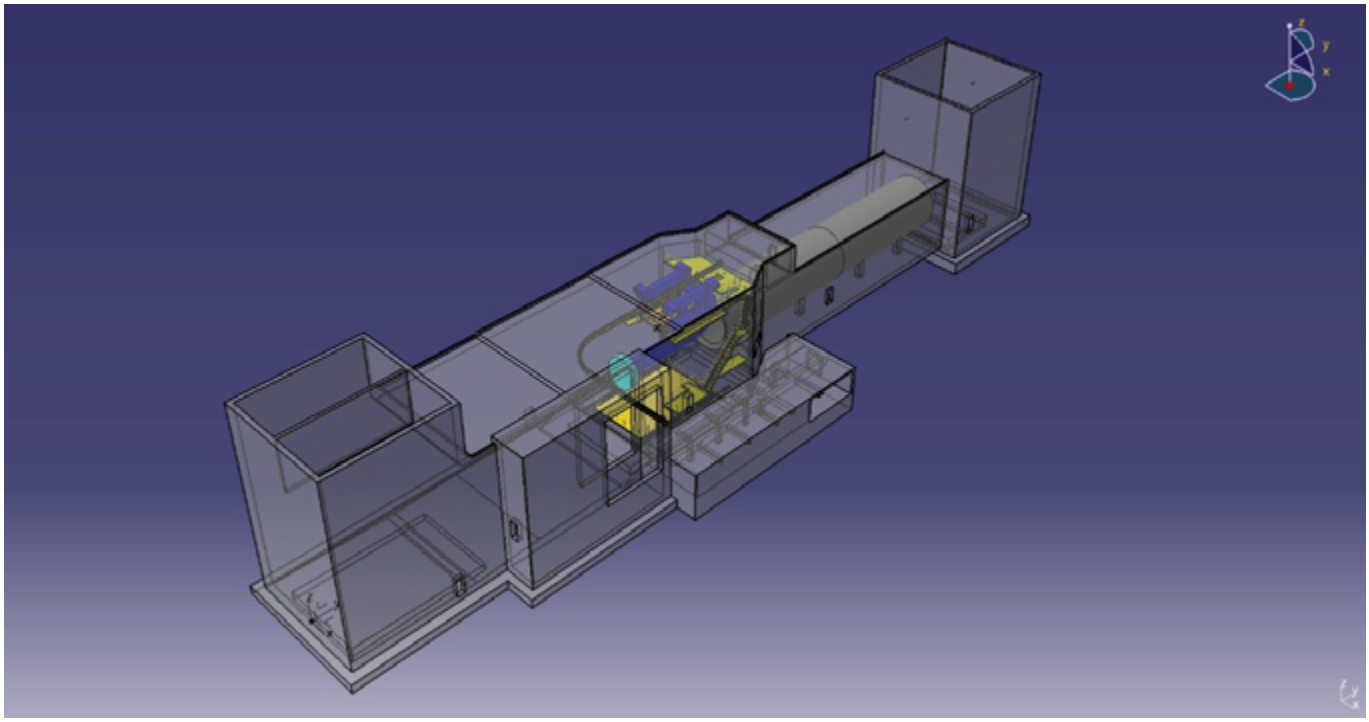
Antecedentes

En el año 1995, S. M. el rey D. Juan Carlos I inauguró en las instalaciones del INTA, en Torrejón de Ardoz, una celda de ensayos de prototipos de motores de avión tecnológicamente puntera a nivel mundial, dotada de los más modernos equipos disponibles en ese momento y de mayor tamaño en el mundo. Fue creada a imagen y semejanza de la celda 56 que existía en Inglaterra, propiedad de Rolls-Royce, grandes líderes mundiales de fabricación de motores de aviación junto con General Electric, con unas dimensiones imponentes: 14,5 x 14,5 m de sección cuadrada de ensayo, más de 100 m de longitud, capacidad para medir hasta 140 000 lb de empuje y más de mil canales de medida de parámetros, tanto analógicos como digitales, entre los que se encontraban temperaturas, presiones de gases, y líquidos o vibraciones. Además, incorporaba un novedoso diseño aerodinámico para optimizar el flujo de aire dentro de la celda y el equilibrado de presiones antes y después de la sección de ensayo, minimizando los riesgos estructurales de la instalación.

Inicios

La inauguración de la celda se produjo con lo que se denomina un ensayo de correlación. Este ensayo consiste en hacer un ensayo a un motor específico en una celda caracterizada aerodinámicamente, es decir, que se conoce el comportamiento aerodinámico del aire y su influencia, y repetir

Turbofan de alto índice de derivación dentro de la celda de ensayos. (Fuente: INTA)



Modelo 3D de celda de ensayos. (Fuente: INTA)

el mismo ensayo con el mismo motor en otra celda desconocida para poder comparar los resultados obtenidos y deducir la influencia de esta instalación en el motor. El resultado son los denominados parámetros de correlación propios de esa instalación y que deben ser revisados periódicamente con un calendario establecido de ensayos de correlación.

El primer ensayo como tal se produjo con un motor militar EJ200, que es el que equipan en la actualidad los cazas de combate *Eurofighter Typhoon*, el cual fue un éxito y al que le han seguido más de cincuenta ensayos de motores tanto de Rolls-Royce, principal socio tecnológico durante estos años, como de General Electric. Además, se han realizado ensayos de programas europeos con demostradores tecnológicos que incorporaban tecnologías de TRL muy bajos (programas ANTLE y POA) y, por primera vez en la historia, se midió físicamente la distribución de temperaturas reales dentro de la cámara de combustión de un motor Rolls-Royce TRENT 900, que es el que equipa el AIRBUS 380 en la actualidad.

Tipos de ensayos de un motor

El desarrollo de un nuevo tipo de motor lleva implícitos muchos tipos de ensayos para asegurar no solo que el motor cumple con las distintas misiones para las que se ha sido diseñado, sino que además es seguro en su operación para no poner en riesgo la vida de los tripulantes ni de la aeronave. Estos tipos de ensayos se pueden clasificar, sin ser muy exhaustivos, en varios tipos:

- Ensayos de desarrollo: destinados a desarrollar tanto tecnología novedosa como solucionar aspectos relativos al uso en servicio. Un ejemplo de este último han sido los ensayos derivados de las grietas encontradas en las carcasas de los motores TRENT 1000 de Rolls-Royce en servicio, las cuales han necesitado de ensayos ideados específicamente para entender qué fenómeno las causaba, su rediseño, fabricación y ensayos de validación para asegurar que se ha subsanado este defecto. Como puede imaginarse, este tipo de ensayos son complejos tanto por los fenómenos físicos que los producen como por las capacidades de ensayo necesarias. Conviene mencionar otros ejemplos de estos ensayos de desarrollo, como son los de pinturas térmicas aplicadas a los álabes del compresor o turbina para ver físicamente las líneas de corriente del flujo de aire en funcionamiento. En estos ensayos solo hay una oportunidad para hacerlos bien ya que, de lo contrario, se estropea el dibujo que deja el flujo de aire sobre las superficies a las que se le aplica la pintura.

Otro tipo de ensayos de desarrollo son los que se realizan cuando se diseña un módulo nuevo del motor para aprovechar las innovaciones tecnológicas presentes. Esto incluye la incorporación de nuevos materiales más avanzados, nuevos procesos de fabricación, o modelos de diseño o de cálculo matemáticos avanzados, entre otros.

- Ensayos de certificación: el objetivo de estos ensayos es proporcionar evidencias de cumplimiento de la normativa vigente, siendo la superación de todos ellos el requisito para obtener el certificado de tipo del motor, lo que a partir de ese momento imposibilita la modificación del diseño. Entre estos ensayos se encuentran los de *maturity* o «ETOPS», cuyo objetivo es simular el deterioro del motor con el uso para asegurar que la pérdida de rendimiento es inferior a un cierto límite especificado y no se producen daños que puedan comprometer la seguridad de uso. Para ello se somete al motor a una serie de ciclos repetitivos con maniobras mucho más exigentes que las permitidas dentro de la envolvente de vuelo que aceleran el deterioro del motor completo, de tal manera que en un par de meses de ensayo se puede ver el deterioro acumulado real que tendría ese mismo motor después de años de servicio.

- Ensayos de producción: consisten en asegurar un nivel mínimo de rendimiento del motor según los parámetros preestablecidos en los contratos con los operadores de las aeronaves. Son ensayos del tipo pasa-no pasa, y son los menos complicados y exigentes de todos.

Todos estos tipos de ensayos, a su vez, pueden dividirse en ensayos destructivos o no destructivos, atendiendo a cómo se realizan. Sirvan de ejemplo de ensayos destructivos los ensayos de ingestión de aves o los de suelta de álabes, ensayos absolutamente necesarios para certificar el motor.

Todo este abanico de ensayos implica, además, necesidades operacionales, de infraestructura e instalaciones dedicadas, lo que hace que se deban dimensionar adecuadamente. Unos datos representativos de esto son que, para acometer los ensayos de certificación de los grandes motores civiles presentes en el mercado realizados en el Banco de Ensayos del INTA, se realizan tres turnos para asegurar veinticuatro horas de operación ininterrumpida hasta seis días a la semana, con una duración estimada de entre dos y tres meses por ensayo, y una capacidad de almacenamiento de combustible de aviación (JET A-1) de quinientos mil litros, los cuales se consumen a un ritmo medio de más de cien litros por minuto de funcionamiento del motor.

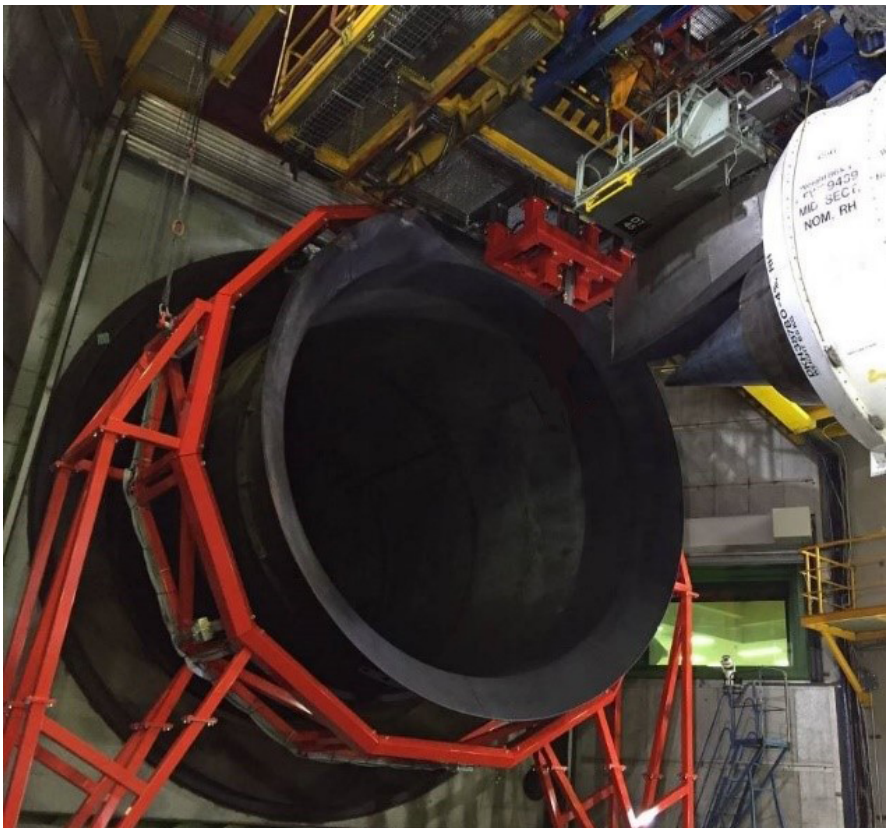
Capacidad de Defensa

Defensa tiene una extraordinaria capacidad para realizar todos (o casi todos) los ensayos no destructivos necesarios de una planta propulsiva; es decir, los de desarrollo, certificación y producción, lo que es una ventaja estratégica nacional al no estar en manos de ninguna empresa privada y, por tanto, no depender de sus prioridades empresariales.

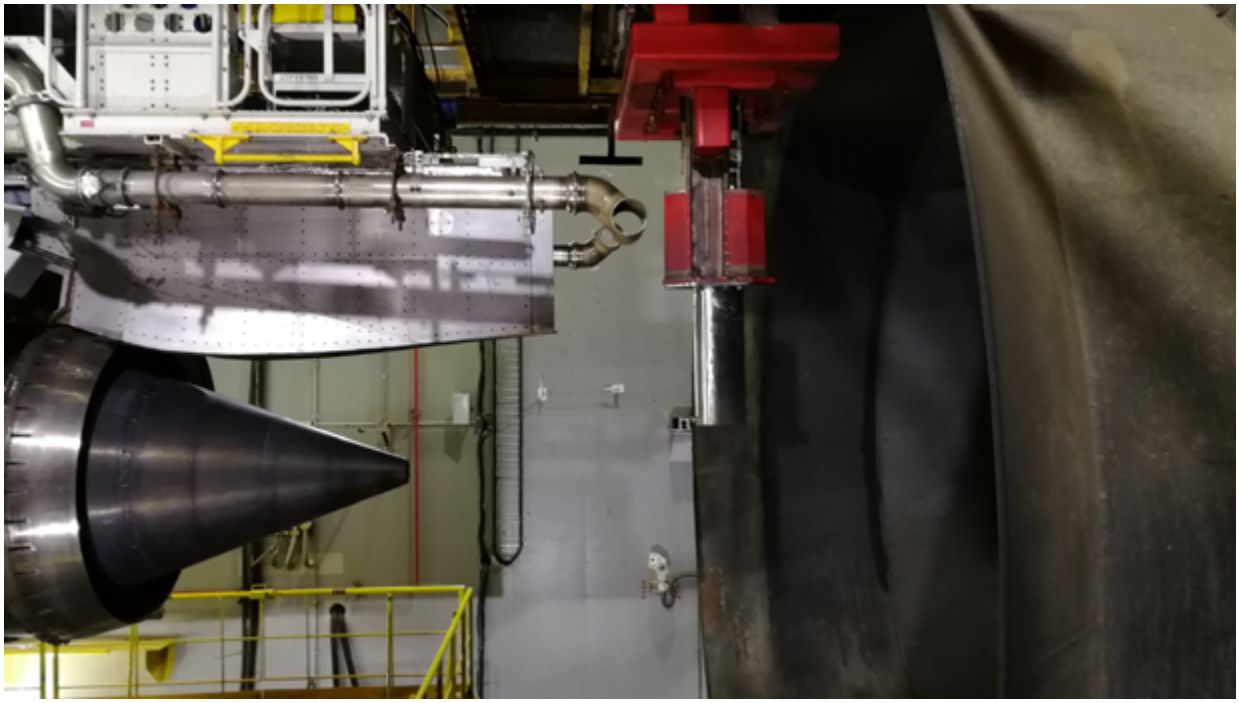
Para tener esta enorme capacidad de ensayo es necesario poseer varios elementos esenciales, los cuales están presentes dentro de las capacidades del Ministerio de Defensa y se detallan a continuación.

El primero, y con diferencia el más importante y difícil de obtener de todos, es contar con un grupo humano suficientemente amplio de personal de ensayo (ingenieros y mecánicos) con suficiente experiencia y conocimiento técnico en ensayos, monitorización y operación de prototipos de motores. Se necesitan muchos años de entrenamiento del personal de operaciones para ser capaces de manejar estos ensayos, ya que el hecho de manejar prototipos de motores, normalmente únicos, de enorme valor económico y grandes periodos de producción, en caso de fallo hace que haya incertidumbre en la operación del sistema, lo que puede traducirse tanto en una pérdida de rendimiento del sistema (problema menor y esperable que conlleva el análisis de los datos de ensayo, rediseño y más ensayos futuros de validación) como en problemas de seguridad de uso. Si ocurre lo segundo aumentan las probabilidades de fallo del sistema, el cual, con una alta probabilidad, será catastrófico debido a que son sistemas de alta energía. En este caso es responsabilidad de la tripulación de ensayo llevar el motor a una condición de funcionamiento seguro previa al fallo, priorizando en orden decreciente de operación evitar pérdidas humanas, preservar la integridad de la instalación y, finalmente, el prototipo ensayado. Esto se consigue únicamente con personal de operaciones muy experimentado con gran capacitación técnica y operativa, con muchos años de experiencia en ensayos, creciente en función de la complejidad del ensayo (no es lo mismo hacer ensayos para validar un rediseño de un soporte de una tubería de combustible del motor que el de un nuevo tipo de inyector de combustible), siendo los de desarrollo y los de certificación los más complejos de todos seguidos, por último, de los de producción.

El segundo aspecto clave es la capacidad de obtención y análisis de los datos de ensayo capturados en tiempo real durante la operación del motor. Esta capacidad es tanto mayor a medida que el ensayo a realizar aumenta su complejidad. Típicamente, para un ensayo de desarrollo de certificación, podemos estar hablando de grabar, procesar y almacenar del orden de mil temperaturas, quinientas presiones y cien vibraciones, aunque estos datos suelen ser sensiblemente mayores en ensayos de desarrollo. Los ensayos de producción son, con diferencia, los menos exigentes desde este punto de vista. Todos estos datos normalmente se dividen entre datos estáticos o dinámicos, y conllevan la calibración de todo el sistema de adquisición de datos, normalmente



Anillo óptico de emisiones. (Fuente: INTA)



Sonda intrusiva de emisiones. (Fuente: INTA)

con calibraciones del tipo *end to end* (desde el instrumento de medida hasta el equipo de adquisición), para asegurar la exactitud, precisión e incertidumbre de los datos medidos.

Los datos estáticos son los que, durante un cierto intervalo de tiempo, se capturan de los sensores a una cierta frecuencia y se hace la media de ellos, dando un único valor por parámetro. Entre estos parámetros se encuentran normalmente temperaturas, vibraciones o presiones. Los datos dinámicos, típicamente vibraciones o deformaciones, por el contrario se capturan durante un cierto tiempo y se reconstruye la señal aplicando métodos matemáticos, normalmente transformada rápida de Fourier o diagrama de Campbell, para llevarla al dominio de la frecuencia y poder analizar fenómenos complejos, como pueden ser fallos mecánicos, efectos de interacción con las paredes de la celda (típicos de las últimas etapas de las turbinas de baja) o aeroelásticos, como los de flameo de los álabes del fan. Estos últimos, de enorme complejidad, obligan además a instrumentar los álabes del fan con galgas extensiométricas conectadas a equipos de telemedida para poder ver en qué momento empieza a producirse el fenómeno. La velocidad de actuación de las tripulaciones de ensayo es crítica, ya que el tiempo máximo de respuesta para llevar el motor a una condición de funcionamiento segura es de un segundo (el fenómeno es fuertemente divergente en el tiempo). Todos estos fenómenos son generalmente mucho más relevantes para la seguridad del motor que los estáticos, ya que anticipan el fallo del sistema, por lo que es imprescindible tener personal específicamente formado en la operación, monitorización y análisis de estos sistemas.

Toda esta capacidad de captación, monitorización en tiempo real y análisis de datos se hace con equipos informáticos de gran capacidad mediante el uso de tarjetas dedicadas, y grandes capacidades de almacenamiento y procesado de datos, los cuales, a su vez, son encriptados y enviados al fabricante empleando conexiones seguras.

El tercer aspecto clave son los sistemas de control, tanto del motor como de la instalación. Los sistemas de control de motor y de la instalación necesitan comunicarse e interactuar con los propios del motor, proporcionándole todas las entradas o salidas de señales, o alimentaciones eléctricas, neumáticas o hidráulicas que el motor tendría si estuviese montado en la aeronave, ya que de otro modo no funcionaría (por ejemplo, hay que darle la señal de que la aeronave está en tierra o en vuelo, la cual se consigue situando un interruptor en la pata de morro de la aeronave, que no tiene al estar el motor instalado en una celda de ensayos). Así, el sistema de control de la instalación debe permitir actuar sobre el comportamiento del motor ya que, para muchos de los ensayos, se requiere intervenir sobre el propio control del motor mediante la modificación de ciertos parámetros que gobiernan el comportamiento del motor (por ejemplo, la modificación de la apertura o cierre de ciertas válvulas a demanda del usuario) en tiempo real, además de ciertas PLC (*Programable Logic Controller*) dedicadas a ciertas tareas repetitivas, esencialmente las relacionadas con los ciclos de ensayo mencionados al principio y que actúan sobre la palanca de gases del motor de una manera autónoma. Esta responsabilidad de operación recae nuevamente en la experiencia de la tripulación de ensayo, puesto que se fuerza al motor a funcionar fuera de los parámetros conocidos de funcionamiento y protección del motor.

En cuarto lugar está la instalación, que es tanto más compleja como sean los ensayos a realizar. Típicamente consta de un sistema de combustible para asegurar la alimentación del suficiente caudal y presión de combustible al motor, el cual varía según su régimen de funcionamiento, un sistema de aire comprimido para arrancar o alimentar

diversos sistemas secundarios (válvulas o caudales de refrigeración, o consumo de sistemas auxiliares del motor) o de arranque eléctrico, en caso de que el motor lleve este tipo de sistema, un sistema de preservación para proteger el motor durante los periodos de inactividad, un sistema eléctrico para alimentar todos los sistemas y de almacenamiento de energía eléctrica en caso de corte del suministro para asegurar la parada controlada del motor en cualquier circunstancia de emergencia, todo tipo de elementos auxiliares para instalar, montar, manejar, desmontar o desinstalar el motor en la instalación, y un sistema de monitorización y extinción de incendios que permita apagar un posible fuego y evacuar la instalación en caso de necesidad en tiempos suficientemente cortos. Por último, hay un apartado especial de equipos e instalaciones necesarios para ejecutar ciertos ensayos que se utilizan según la necesidad. La misión de estos equipos es simular la condición de contorno que tiene el motor en su condición para alimentar algunos sistemas. Nos estamos refiriendo a la capacidad de generación de energía hidráulica para mover las partes móviles de la aeronave (flaps, alerones, etc.), la generación de potencia eléctrica, de suministro de aire de cabina para consumo humano, o de ingestión de arena o agua, por mencionar los principales. Por poner un ejemplo, para la generación de energía hidráulica existen equipos que cierran el circuito hidráulico y provocan las pérdidas de carga reales que tendría que vencer el sistema en un uso real como consecuencia de la actuación por parte del piloto sobre el timón de profundidad o cualquier otra superficie aerodinámica móvil de la aeronave.

Finalmente, existen una serie de capacidades adicionales del Banco de Ensayos de Motores del INTA relacionadas con proyectos de I+D+i, que añaden capacidades especiales a las de ensayo. Estas capacidades están enfocadas a la medición de los contaminantes emitidos durante la operación del motor, siendo una de las pocas instalaciones en el mundo con este tipo de tecnología. Por un lado, cuenta con una sonda invasiva en el chorro de gases de escape que recoge muestras para analizar los contaminantes que se están generando, pudiendo caracterizarlos en cuanto a las emisiones de CO_2. Al ser invasiva e introducirse físicamente en el chorro de escape, modifica el comportamiento del motor produciendo acoplamientos aeroelásticos en el motor, pudiendo provocar fallo catastrófico en el mismo. Además, debe situarse suficientemente cerca del plano de salida de los mismos para cumplir con la normativa de la OACI, lo que lleva a que sea capaz de soportar grandes esfuerzos. Otra sonda de medida, esta no invasiva, consiste en un anillo de láseres alineados por parejas (emisores y receptores) basados en la refracción del láser al encontrarse con ciertas partículas. Este anillo se sitúa más alejado que la sonda invasiva del plano de salida, lo que permite ver la formación de otras especies, pudiendo diferenciar los NOx o los SOx, entre otras, sin afectar al comportamiento del motor, ya que se hacen pasar los gases de la combustión producidos a través de dicho anillo. En función de la distancia y de la cinética química de las reacciones de los gases de escape, se podrán medir las concentraciones finales emitidas a la atmósfera en funcionamiento real cuando la aeronave está volando en altura de crucero. Finalmente, también cuenta con capacidad para analizar los gases emanados por el *breather* del motor, altamente contaminantes por la presencia de partículas de aceite, fundamentalmente aromáticos y partículas no volátiles, especialmente nocivas cuando la aeronave está en tierra.

Motor con SPTE (Special Test Equipment) instalado en la celda de ensayos. (Fuente: INTA)

Futuro

Debido a toda esta enorme capacidad tecnológica, España, y más concretamente el Ministerio de Defensa, está en disposición de enfrentarse a un reto tecnológico de primer nivel, como es nuestra participación en el programa NGWS, más específicamente en lo relativo al desarrollo de la planta propulsiva. Este programa supondrá no solamente un incremento de la capacidad de nuestras FF. AA., sino que contribuirá a la sostenibilidad y mejora de nuestras infraestructuras tecnológicas, clave para afrontar otros retos de futuro (p. ej., propulsión mediante H2 criogénico). La posición privilegiada que tiene el Ministerio de Defensa para afrontar estos retos de altísima tecnología es un orgullo nacional y una seguridad de éxito internacional.

Boletín de Observación Tecnológica en Defensa

Disponible en

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

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

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE DEFENSA

SUBSECRETARÍA DE DEFENSA

SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN PERIFÉRICA