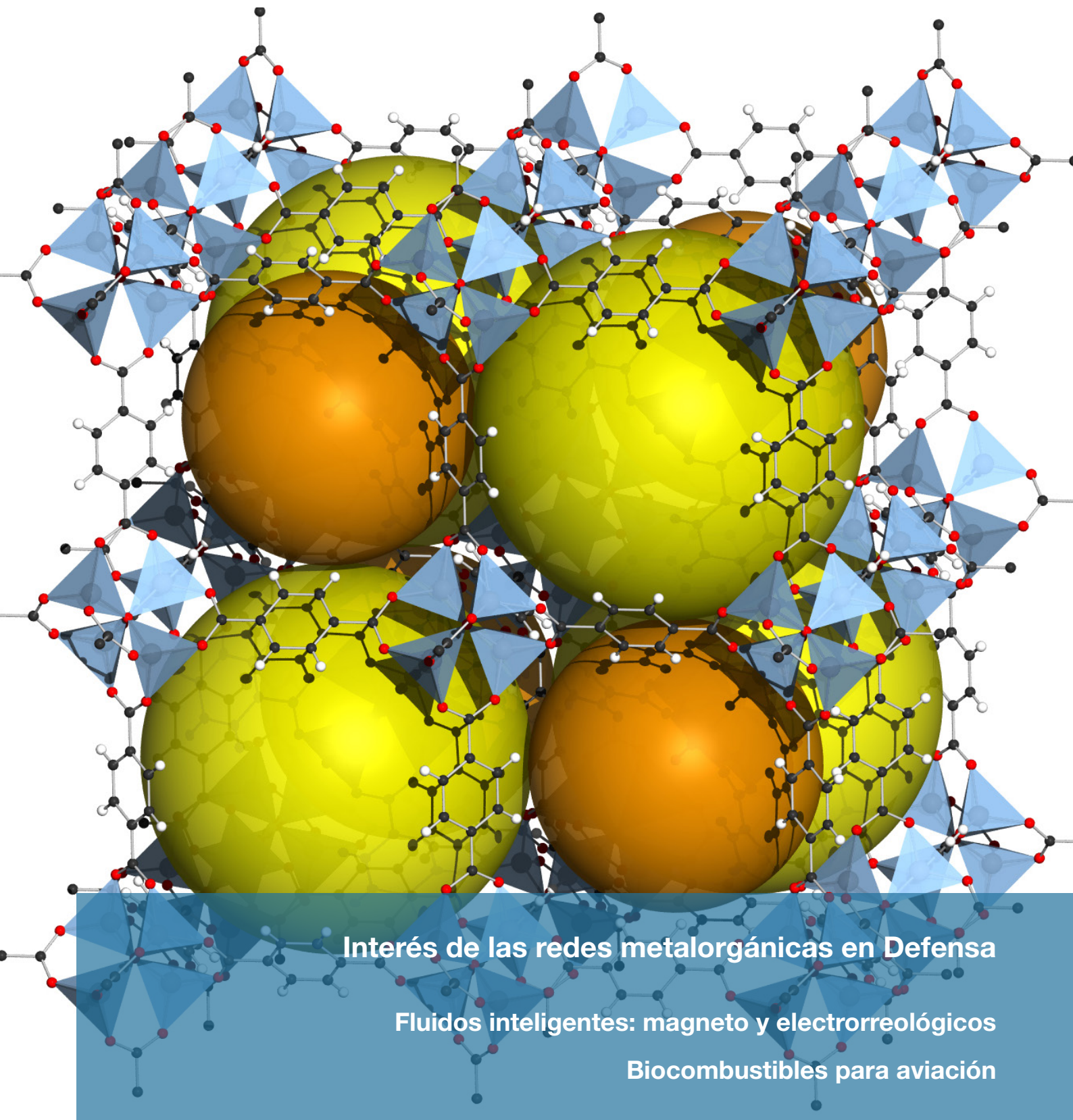


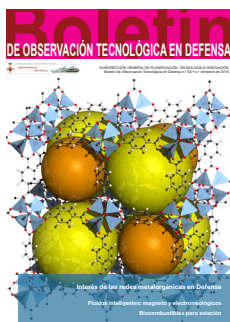
Boletín

DE OBSERVACIÓN TECNOLÓGICA EN DEFENSA



SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PLANIFICACIÓN, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN
Boletín de Observación Tecnológica en Defensa n.º 63 • 4.º trimestre de 2019





Edita:



NIPO en línea: 083-15-183-4

NIPO impresión bajo demanda: 083-15-182-9

ISSN edición electrónica: 2444-4839

Autor: Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT), Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM). 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. Bgda. José María Martínez Benítez, Ángel Nicolás Bellido Vivas.

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 Albuerno; 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: Ocho celdas de MOF-5 (Fuente: Tony Boehle - Wikimedia Commons).

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

Colaboraciones y suscripciones:

observatecno@oc.mde.es

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



DGAM
Subdirección General de Planificación,
Tecnología e Innovación

CONTENIDOS

Actualidad

- 4 ¿Dónde hemos estado?
- 6 Asamblea MATERPLAT 2019
- 7 Foro Consultivo sobre Energía Sostenible en Defensa - Fase II

Tecnologías Emergentes

- 9 Fluidos inteligentes: magneto y electrorreológicos
- 12 Biocombustibles para aviación

En Profundidad

- 15 Interés de las redes metalorgánicas en Defensa

TECNOLOGÍA DISRUPTIVAS EN DEFENSA

El contexto de cambio y ritmo acelerado de avance de las tecnologías que ha venido produciéndose en la última década ha hecho que exista un creciente interés, tanto en el ámbito civil como en el defensa, por las denominadas *tecnologías o innovaciones disruptivas*, es decir, aquellas cuya aparición supone un cambio radical en la forma de hacer las cosas y los hábitos de vida de las personas y cuya ocurrencia y efectos son difíciles de prever. En el ámbito militar, su introducción supone un cambio profundo en la manera en que los ejércitos llevan a cabo sus misiones, logrando prestaciones difícilmente alcanzables mediante innovaciones incrementales.

Ejemplos de plena vigencia son el uso de aeronaves tripuladas remotamente (RPAS), la fabricación aditiva, o la inteligencia artificial, que en unos años prometen aportar capacidades muy importantes en aplicaciones como la explotación automática de datos de sensores, el mantenimiento de plataformas o los sistemas de apoyo a la decisión, entre otras.

Si bien hay que tener en cuenta que la incorporación de estas innovaciones puede llevar asociadas importantes incertidumbres y vulnerabilidades, relativas tanto a aspectos puramente técnicos (p.ej. falta de claridad sobre la lógica detrás de las decisiones de los sistemas basados en IA), a otros de tipo ético y legal (p.ej. avances en biotecnología, armado de sistemas autónomos) o su aprovechamiento por organizaciones terroristas que pueden acceder a medios de bajo coste para causar terror y destrucción, las ventajas que pueden llegar a aportar en términos de libertad de acción para las FAS hace que vayan a adquirir un papel destacado en la nueva versión de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID).

Una pregunta que subyace es si la manera en que se ha venido abordando el avance tecnológico desde la I+D+i de defensa es la adecuada para favorecer la adopción de estos avances disruptivos en los próximos años o décadas. En este sentido, algunos autores apuntan a que, frente a planteamientos más tradicionales (p.ej. correcciones y mejoras de sistemas en servicio, evoluciones incrementales de sistemas más tradicionales...), que en general implican riesgos más acotados y menores posibilidades de causar disrupción, interesa dedicar esfuerzos en I+D+i hacia soluciones tecnológicas que todavía no existen, las cuales presentan una mayor capacidad para redefinir el mercado pero que a su vez implican un elevado riesgo de fracaso. Se trata de actuar de forma proactiva en dos direcciones:

a) Uso innovador de tecnologías ya maduras. Implica poner en práctica una idea novedosa que combina diferentes tecnologías maduras, causando un enorme impacto en el sector en el que se aplica. No implica actuaciones

en investigación radicalmente nuevas ni complejas, ni tampoco grandes inversiones, obteniéndose los resultados en el corto o medio plazo. Es el tipo de innovaciones que más están impactando en distintos sectores del ámbito civil (transporte, comunicaciones...) y el que también utilizan los grupos terroristas, que aprovechan la tecnología disponible comercialmente para causar la máxima destrucción.

b) Avances asociados al desarrollo de tecnologías emergentes. Se trata de avances fundamentados en ideas muy complejas que utilizan tecnologías todavía poco maduras, lo que implica mucha incertidumbre, pero que prometen aportar prestaciones radicalmente nuevas o revolucionarias (p.ej. tecnologías cuánticas, armas de energía dirigida, biología sintética, vehículos hipersónicos...). Exigen esfuerzos intensivos en investigación, con inversiones que solamente pocos países o corporaciones son capaces de abordar. Los resultados llegan en el largo o muy largo plazo, lo que puede ayudar a adelantarse a ellas. No obstante, entender completamente las posibilidades de estas tecnologías todavía emergentes o los plazos en los que realmente se consolidarán es muy difícil.

En relación a la primera vía, en los últimos años numerosos países y organizaciones internacionales vinculadas a defensa (p.ej. NATO *Innovation Challenge*; EDA *Innovation Prize*...) han utilizado enfoques innovadores para tratar de promover concursos abiertos de prueba de soluciones tecnológicas frente a escenarios realistas o simulados de elevada complejidad (*challenges*), concursos de ideas, unidades específicas dedicadas a identificar la disrupción en los ecosistemas más innovadores o el desarrollo rápido de prototipos que puedan probarse en condiciones cercanas a las operativas.

En relación a la segunda, su desarrollo hace necesario involucrar al conjunto de grupos de investigación a nivel nacional, así como promover proyectos de I+D que permita a estos grupos disponer de suficiente nivel de capacitación tecnológica como para participar en proyectos de cooperación internacional dirigidos a defensa, en los que se aborden esas novedosas soluciones de elevada complejidad y coste.

La puesta en marcha de iniciativas en ambas direcciones a nivel nacional, complementando los enfoques más tradicionales de abordar la I+D+i, pueden ser elementos que ayuden a adelantarse a las disrupciones que ya se están produciendo o que están por venir. Adicionalmente, en el ámbito internacional, en los próximos años se prevé que el Fondo Europeo de Defensa (EDF) dedique una parte relevante de su financiación a promover el desarrollo de este tipo de tecnologías, lo cual abrirá oportunidades muy interesantes para el tejido tecnológico nacional.

Actualidad

¿Dónde hemos estado?

1, 2 y 3 de octubre de 2019

● Cuarta edición del C-IED Technology Workshop

Durante los días 1, 2 y 3 de octubre de 2019 tuvo lugar en Madrid, en el Hotel NH Madrid Ventas, la cuarta edición del encuentro *C-IED Technology Workshop*, bajo el lema “Soluciones adaptables frente a las amenazas emergentes de explosivos improvisados”, que en esta ocasión fue organizado por el centro de excelencia de la OTAN C-IED CoE (*C-IED Centre of Excellence*).

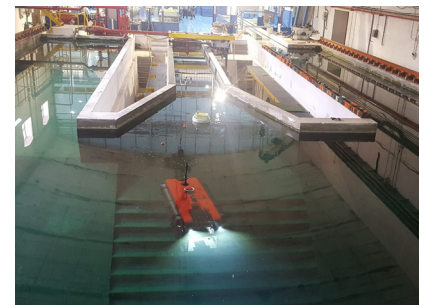
Este evento, que se celebra con carácter bianual, reunió a la comunidad internacional en el ámbito de la lucha contra artefactos explosivos improvisados (*C-IED, Counter Improvised Explosives Devices*), que compartió sus experiencias en cinco paneles destinados a iniciativas de I+D, soluciones C-RPAS relativas a incidentes IED, tecnologías de detección a distancia y neutralización, explotación y mitigación de amenazas.



22, 23 y 24 de octubre de 2019

● Programa BARRACUDA - Fase I

La SDGPLATIN lanzó el pasado mes de octubre el Programa BARRACUDA, con objeto de conocer el estado del arte de la capacidad nacional industrial relativa al diseño y operatividad de plataformas submarinas no tripuladas. Durante los dos primeros días se probaron varias de estas plataformas en el canal de aguas tranquilas de El Pardo (CEHIPAR), mientras que durante el último día se celebró una jornada de presentación de plataformas, desarrolladas tanto por entidades españolas como por la industria internacional.



22, 23 y 24 de octubre de 2019

● Congreso “Ejército, Empresa y Conocimiento: Una Alianza Estratégica para el Horizonte 2035”

El Mando de Adiestramiento y Doctrina del Ejército de Tierra (MADOC), la Universidad de Granada y el Consejo Social organizaron este evento, que tuvo lugar en la ETS Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (Granada) y cuyo objeto era exponer las necesidades de investigación del Ejército de Tierra, así como las capacidades de la universidad e industria sobre tecnologías de doble uso, fomentar la interacción entre todos los organismos implicados y explorar las diferentes vías de financiación. La DGAM participó en el panel “Las nuevas iniciativas en el ámbito de la Investigación y Desarrollo en proyectos de Defensa”, donde se presentaron las posibilidades de financiación de proyectos tanto en DGAM como a través de nuevas iniciativas europeas.



... entre otros eventos

¿Dónde hemos estado?

4, 5 y 6 de septiembre de 2019

- **VII Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad (DESEI+d 2019)**

El VII Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad (DESEI+d 2019), organizado por la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación de la Dirección General de Armamento y Material, la Dirección General de Reclutamiento y Enseñanza Militar, junto a los Centros Universitarios de Defensa e Isdefe (Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España), fue celebrado en esta ocasión en la Escuela de Suboficiales de la Armada, ubicada en San Fernando, contando con gran participación de personal civil y militar y sirviendo como foro y punto de encuentro de todos los agentes relacionados con la I+D en el ámbito de la Defensa y la Seguridad, donde se tuvo la oportunidad de presentar y difundir los resultados de las últimas investigaciones y trabajos realizados en alguna de las áreas temáticas relacionadas.



26 de noviembre de 2019

- **Asamblea Plataforma MATERPLAT 2019**

La Plataforma MATERPLAT celebró su asamblea anual en San Sebastián, con la colaboración del centro tecnológico TECNALIA. La temática en esta edición se centró en el desarrollo de soluciones multimaterial para aplicaciones en distintos sectores. El técnico del Observatorio Tecnológico de Materiales del SOPT participó presentando la ponencia “Los multimateriales en el sector de la defensa”.



11 de diciembre de 2019

- **Taller Con Empresas “7”. Fuerza 2035 – C-RPAS**

La Dirección de Adquisiciones (DIAD) del Mando de Apoyo Logístico del Ejército (MALE), junto con la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM), celebraron el pasado 11 de diciembre el **Taller con Empresas “7” Fuerza 2035 – C-RPAS**, que tuvo lugar en la base Conde de Gazola, en la localidad de San Andrés del Rabanedo (León).

El alcance del taller, el cual ha tenido representación militar, de empresas, centros tecnológicos, asociaciones y universidades, ha sido la protección de la Fuerza contra todo tipo de amenazas en la forma de RPAS, comprendiendo tanto fuerzas ubicadas en bases e instalaciones del TN como fuerzas desplegadas en ZO, estáticas o en movimiento. Se incluyeron tanto tecnologías de detección e identificación como tecnologías de neutralización de tipo *soft-kill* y *hard-kill*.



Toda la información sobre estos y otros eventos puede consultarse en el Portal de Tecnología e Innovación del Ministerio de Defensa: www.tecnologiaeinovacion.defensa.gob.es

... entre otros eventos

Asamblea MATERPLAT 2019

**Autor: Luis Miguel Requejo Morcillo,
OT MAT, SDGPLATIN.**

**Palabras clave: Materiales;
multimateriales.**

**Metas Tecnológicas relacionadas:
MT 3.1.2; MT 3.1.4; MT 4.1.1.**

Introducción

El pasado 26 de noviembre de 2019 se celebró en San Sebastián la Asamblea anual de la Plataforma MATERPLAT. (Plataforma Tecnológica Española de Materiales Avanzados y Nanomateriales), que fomenta la colaboración entre entidades nacionales para el desarrollo de proyectos asociados a la investigación de nuevos materiales y procesos de fabricación. Fue organizado por la Plataforma en colaboración con Tecnalia y Airbus y contó con la participación de cerca de 70 personas procedentes del tejido tecnológico e industrial nacional, vinculados al desarrollo de nuevos materiales y de sus aplicaciones.

Temática de la jornada

La temática abordada durante la jornada trataba sobre el desarrollo de soluciones multimaterial para aplicaciones en distintos sectores, como los de transporte, energía y defensa.

En este sentido, Tecnalia presentó la «Hoja de ruta en las estructuras multimaterial del sector transporte», en la que se habló sobre la importancia que está teniendo la sustitución del acero por nuevas estructuras multimaterial y otros materiales ligeros. Esto es especialmente interesante en el sector del transporte para conseguir una reducción de peso (y por tanto del consumo energético y de las emisiones), incrementar los factores de seguridad y en general, para ser más competitivos en un mundo cada vez más globalizado. Siemens Gamesa habló de cómo la aplicación de nuevos materiales más resistentes y ligeros es imprescindible para seguir siendo competitivos en un sector como el de la energía eólica, que requiere sistemas cada vez más grandes y eficientes.

También se contó con la participación de un representante del fabricante de materiales compuestos Teijin, que mostró las capacidades de la empresa, y con Elena Moral, de la empresa Talgo, Premio WICE 2019 a la Mujer Ingeniera Ferroviaria Europea, que presentó

el proyecto de la construcción del tren de alta velocidad desde Medina a la Meca y explicó cómo tuvieron que buscar nuevos materiales para adaptar la construcción de un tren de alta velocidad a condiciones climáticas extremas. Destacó el apoyo que recibieron del Ejército del Aire para solucionar los problemas de desgaste de ciertos elementos al estar sometidos a condiciones de erosión propias de un escenario desértico.

La jornada también contó con la presencia de Cristina Moneo (Subdirectora General de Planificación, Seguimiento y Evaluación, MCIU) y de Cecilia Hernández (CDTI). La primera presentó las diferentes formas en que CDTI apoya la I+D, destacando el papel de las Plataformas Tecnológicas como facilitadores para poner en contacto a distintos actores y facilitar la creación de proyectos de colaboración como elementos para favorecer la implantación de la Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2027. La segunda habló de los programas y tecnologías de carácter dual, así como sobre los acuerdos alcanzados con el Ministerio de Defensa para el desarrollo de tecnologías de interés para la defensa. También expuso brevemente en qué iba a consistir el marco de los Fondos Europeos de Defensa (EDF) que está preparando la Comisión Europea.

Participación del SOPT

El SOPT, a través del técnico del OT MAT, tuvo la oportunidad de participar en la jornada como ponente. Llevó a cabo la presentación “Los multimateriales en el sector de la defensa”, que aportó

una visión general de cuáles son las líneas de investigación de interés para el Ministerio de Defensa, más ligadas al desarrollo de multimateriales, así como de las posibles vías de colaboración con la base tecnológica e industrial nacional.

Los multimateriales son característicos por su buena relación peso y propiedades mecánicas. Por ello, su empleo en distintas plataformas y sistemas militares es fundamental para reducir su peso y, en muchos casos, mejorando el resto de prestaciones. Actualmente se está tratando de avanzar en la mejora de los sistemas de protección pasiva y existen multimateriales que se pueden emplear tanto en blindajes para plataformas como en los equipos de protección individual del combatiente. Del mismo modo, se espera poder ir incorporando en los próximos años nuevas estructuras multimaterial que aporten múltiples funcionalidades a los sistemas militares.

Programas nacionales como el COINCIDENTE¹ o europeos, como los ligados a la EDA², al Fondo Europeo de Defensa³ o al PESCO⁴, se presentan como posibles herramientas para financiar proyectos de I+D para el desarrollo de aplicaciones de defensa.

¹ Programa COINCIDENTE: <https://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/es-es/Presentacion/ImasD/Paginas/Coincidente.aspx>

² Proyectos de la EDA: <https://www.eda.europa.eu/what-we-do/activities>

³ Fondo Europeo de Defensa: https://ec.europa.eu/growth/sectors/defence/european-defence-fund_es

⁴ PESCO: <https://pesco.europa.eu/>



Fig. 1. Foto de grupo de participantes en la sesión final del CF SEDDS en Bucarest. (Fuente: EDA).

Foro Consultivo sobre Energía Sostenible en Defensa - Fase II

Autor: Héctor Criado de Pastors, OT
ENEP, SDGPLATIN.

Palabras clave: Comisión Europea, EDA, energía, eficiencia energética, energías renovables, infraestructuras.

Metas Tecnológicas relacionadas:
MT 3.2.3.

Introducción

El Foro Consultivo para la Energía Sostenible en el Sector de Defensa y Seguridad (CF SEDSS) es una iniciativa de la Comisión Europea gestionada por la EDA. El CF SEDSS ha tenido dos fases de dos años de duración cada una en el que expertos de los países miembros de la UE y Noruega han compartido buenas prácticas, establecido contactos y desarrollado ideas de proyecto de forma conjunta con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y el uso de energías renovables por parte del sector de defensa. A nivel nacional, la representación está liderada por la Subdirección de Eficiencia Energética de la Dirección General de Infraestructuras, que cuenta además con el apoyo de la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación de la DGAM.

Fase I

En julio de 2013, la Comisión Europea (CE) publicó la comunicación “hacia un sector de defensa y seguridad más competitivo y eficiente”. Dentro de este documento se indicaba la intención de la CE de establecer un mecanismo de consulta entre países miembros que permitiera examinar qué medidas de eficiencia energética y que tipo de energías renovables eran aplicables al sector europeo de defensa. Con el fin de administrar este proyecto durante 24 meses, la Agencia Europea de Defensa firmó un acuerdo con la CE.

Dentro de esta primera fase del CF SEDSS, los objetivos fundamentales fueron apoyar la difusión de buenas prácticas y el conocimiento en el ámbito de la eficiencia energética y las energías renovables, mejorando tanto las capacidades del sector como la implementación de legislación comunitaria e incrementar la contribución a los objetivos nacionales y europeos de lucha contra el cambio climático.



Fig. 1. Foto de grupo de participantes en la sesión final del CF SEDSS en Bucarest. (Fuente: EDA).

EL CF SEDSS se dividió en tres grupos de trabajo: gestión energética, eficiencia energética y energías renovables¹. Como resultados finales de esta fase, la EDA publicó en octubre de 2017 un informe final con especial énfasis en la aplicación de las directivas de eficiencia energética y de eficiencia energética en edificios, posibles vías de financiación de proyectos y la protección de infraestructuras críticas de energía, junto con una serie de hojas informativas sobre diferentes tecnologías, proyectos destacados y conclusiones de los distintos grupos de trabajo².

Fase II

La segunda fase del CF SEDSS tuvo lugar entre 2017 y 2019 y profundizó en la aplicación de medidas de eficiencia energética, energías renovables y tecnologías en el sector de defensa europeo, junto con la protección de infraestructuras críticas energéticas. A nivel de estructura, se añadió un nuevo grupo de trabajo específico sobre protección de infraestructuras críticas energéticas, mientras que los grupos de trabajo sobre gestión y eficiencia energética se convirtieron en subgrupos, para realizar sesiones conjuntas en las que abordar aspectos comunes.

En esta fase se exploraron los beneficios de la implementación de la Directiva de Eficiencia Energética, la Directiva de Energía Renovable, la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios y la Directiva de Infraestructuras Críticas Europeas, además de la posibilidad de incrementar la implicación de los Ministerios de Defensa en la reducción de la

huella energética y el coste de la energía, así como el apoyo a la transición energética. Además en el Foro Consultivo se identificaron cuellos de botella para la aplicación de dichas directivas en Defensa. Para ello, en la segunda fase personal de la EDA y de la Dirección General de Energía (DGENER) de la Comisión Europea apoyó a los expertos nacionales en la generación de ideas para desarrollar políticas, estrategias, planes de acción y proyectos concretos sobre la aplicación de energía en defensa.

Resultados

De forma transversal, en la primera fase se identificó la financiación como uno de los factores clave para el desarrollo de proyectos en este ámbito. Pese a la existencia de numerosos instrumentos a nivel europeo, se consideró necesario abordar un análisis en profundidad debido a la complejidad de su aplicación en defensa, así como a la dinámica de revisión de estos instrumentos. Además, se presentaron diferentes instrumentos de financiación disponibles para proyectos de eficiencia energética, energías renovables e infraestructuras energéticas.

Dentro de los resultados del CF SEDSS – Fase II, cabe destacar la herramienta *Identifunding*. Esta herramienta *online* permite a los actores interesados (industria, academia, Ministerios de Defensa) identificar de forma rápida y sencilla los esquemas de financiación para proyectos relacionados con defensa basados en temas, enfoques objetivos y entidades involucradas. La herramienta será actualizada con nuevos instrumentos del marco financiero multianual 2021-2027, reuniendo bajo un solo paraguas todos los instrumentos financieros que apoyan las inversiones en la UE.

De forma adicional, durante esta fase se abordó el desarrollo de ideas de proyecto relacionadas con energía en el ámbito de defensa, incluyendo

¹ Para más información sobre el comienzo de la primera fase del CF SEDSS, puede consultarse el Boletín de Observación Tecnológica en Defensa nº49 (1^{er} trimestre 2016)

² Toda esta información está disponible en: <https://www.eda.europa.eu/european-defence-energy-network/phase-I/deliverables>

aspectos duales entre mercado civil y militar, que permitan facilitar el desarrollo de capacidades operativas y apoyar los desafíos energéticos de los Ministerios de Defensa. En total se han seleccionado 18 ideas de proyecto, de los que se han publicado sus hojas informativas³. Tres de estas propuestas fueron seleccionadas por su madurez e interés por parte de los países miembros para ser presentadas a mecanismos de financiación.

Finalmente, el documento guía de la fase II ya está disponible en la web de la EDA⁴. Incluye un análisis del contexto y los *drivers* estratégicos, las conclusiones de los resultados de los grupos de trabajo y una serie de recomendaciones para la transición energética en el sector de defensa.

Futuro del CF SEDSS: Fase III

En junio de 2019 el Consejo de la UE reconoció los avances del Foro consultivo en su reunión sobre Seguridad y Defensa en el contexto de la Estrategia Global de la UE, invitando a los países miembros, el Servicio Europeo de Acción Exterior, la Comisión y la EDA a desarrollar soluciones concretas de modelos energéticos seguros y sostenibles dentro del sector defensa y a reforzar la cooperación en este ámbito. Debido a esto, se lanzó la tercera fase del Foro Consultivo el 1 de octubre de 2019, financiado a

través del programa H2020 y con una duración de cuatro años.

En esta fase, el Foro Consultivo continuará siendo un vehículo para compartir buenas prácticas sobre eficiencia energética, uso de energías renovables e incremento de la resiliencia de infraestructuras críticas energéticas relacionadas con defensa. Además abordará áreas temáticas transversales sobre política y gestión energética, tecnologías innovadoras e identificará instrumentos de ayudas y financiación, así como la generación de nuevas ideas de proyecto. También permitirá explorar la implementación de todo el paquete de directivas y regulaciones energéticas europeas en defensa.

A nivel organizativo, en esta fase III se abordará un enfoque novedoso con distintos tipos de actividades, incluyendo conferencias plenarias, eventos sobre tecnologías, reuniones conjuntas sectoriales energía-defensa, *workshops* temáticos o regionales y ejercicios de simulación. Se ha creado un nuevo grupo de trabajo transversal que abordará temas sobre gestión energética, tecnologías y financiación, por lo que la fase III tendrá cuatro grupos de trabajo (ver figura 2).

Los objetivos de esta fase son los siguientes:

- Mejorar la eficiencia energética y mejorar el rendimiento energético de los catálogos de edificios e infraestructuras fijas (incluyendo renovación de edificios y adaptación para la movilidad eléctrica).
- Promover el uso de energías renovables y recursos alternativos.
- Reforzar la protección y resiliencia de infraestructuras críticas energéticas

relacionadas con defensa de desafíos emergentes desde desastres naturales y causados por el hombre a amenazas híbridas, terroristas y ciberataques.

- Identificar y evaluar las implicaciones del marco regulatorio comunitario.
- Desarrollar herramientas y metodologías sobre políticas energética y promover la implementación de sistemas de gestión energética en edificios e infraestructuras de defensa.
- Identificar tecnologías innovadoras e inteligentes que reduzcan la huella de carbono y mejoren la autonomía y la resiliencia operativa de las fuerzas armadas.
- Facilitar la descripción y generación de ideas y propuestas de proyectos en el ámbito energético relacionado con defensa, incluyendo ámbitos duales.
- Identificar y mostrar mecanismos existentes o nuevos para la financiación de proyectos en el marco legislativo y administrativo comunitario que apoyen a los ministerios de defensa y otros actores relacionados a desarrollar iniciativas a nivel nacional y multinacional.

A nivel de innovación tecnológica, se abordarán tecnologías de energía inteligente tales como inteligencia artificial, *blockchain*, medidores inteligentes, digitalización, *big data*, sensores, redes de gestión energética o ciberseguridad, que permitan reducir la huella de carbono e incrementar la autonomía y la resiliencia operativa de las fuerzas armadas.

La primera conferencia de la fase III tendrá lugar en Zagreb, Croacia, los días 17 y 18 de marzo de 2020.

³ <https://eda.europa.eu/european-defence-energy-network/phase-ii/deliverables---phase-ii>

⁴ <https://www.eda.europa.eu/docs/default-source/events/eden/phase-ii/guidance-document/cfsedssii-guidance-document.pdf>

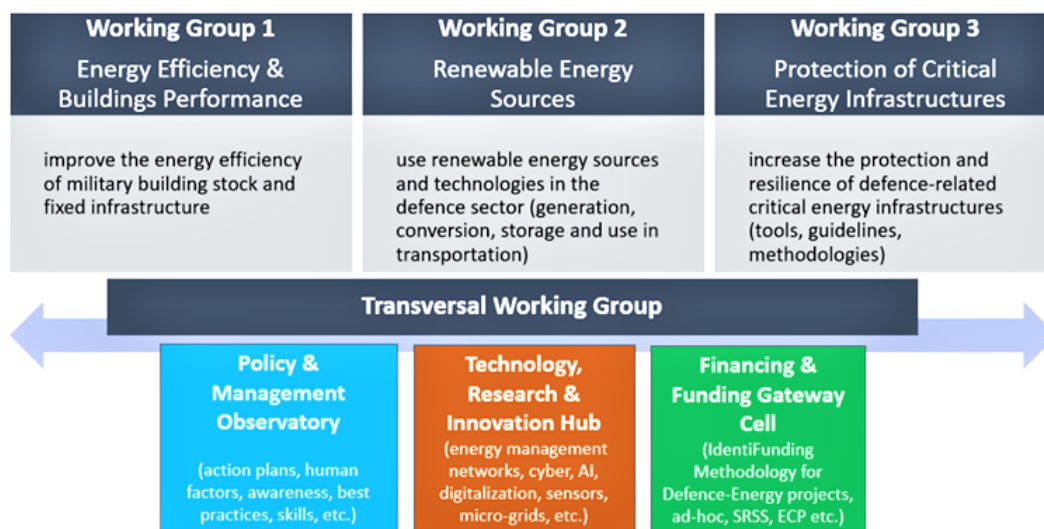


Fig. 2. Estructura del CF SEDSS durante la fase III. (Fuente: EDA).

Tecnologías Emergentes

Fluidos inteligentes: magneto y electrorreológicos

Autores: Luis Miguel Requejo Morcillo, OT MAT, SDGPLATIN.

Palabras clave: Materiales inteligentes, fluido, campo eléctrico magnético.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 3.3.2; MT 3.4.1; MT 4.1.1; MT 4.1.3.

Introducción

En numerosas ocasiones se ha oído hablar de los materiales inteligentes, que son aquéllos que tienen propiedades que pueden ser modificadas de manera controlada y reversible por un estímulo externo, tales como una tensión mecánica, variaciones de temperatura, humedad, pH o campos eléctricos o magnéticos. Materiales inteligentes hay de muchos tipos y muy variados en función del estímulo y del tipo de respuesta.

En este artículo se destacan unos fluidos capaces de modificar su viscosidad cuando se les aplica un campo magnético (fluidos magnetorreológicos - MR) o eléctrico (electrorreológicos - ER). Son dispersiones de partículas en un medio líquido no conductor y, en función de la intensidad de campo a la que se les someta, estos fluidos ER y MR experimentan una variación del esfuerzo umbral de fluencia o esfuerzo mínimo para que el sistema comience a fluir, de modo que su viscosidad cambia y pueden comportarse con una fluidez similar a la del agua, o la de la miel, o pueden llegar a solidificarse. Este efecto es el resultado de la polarización inducida en las partículas suspendidas mediante la aplicación de un campo externo, que obliga a las partículas a la estructuración en cadenas o columnas. Estas cadenas limitan el movimiento del fluido dando lugar a un incremento de la viscosidad, hasta convertirse en un sólido rígido. Esto conduce a una transición líquido-sólido reversible, de tal modo que en ausencia del campo aplicado, los fluidos magnetorreológicos muestran el comportamiento de un

líquido convencional (fluidos newtonianos).

Este tipo de materiales no han sido descubiertos recientemente, ya que se tiene constancia de que fueron preparados por primera vez a finales de la década de los 40 (en 1949, Willis Winslow los fluidos ER y Jacob Rabinow, en 1948, los fluidos MR). Sin embargo ha sido desde hace tan sólo 15 años cuando se ha observado un mayor desarrollo de estas tecnologías, motivado fundamentalmente por avances importantes en el campo de la nanotecnología, que han hecho posible la fabricación de nano y micropartículas con distintas morfologías (nanotubos, laminares, esféricas, etc.).

La optimización de los fluidos ER y MR para poder ser aplicados en distintos sistemas se fundamenta en una serie de parámetros a tener en cuenta. En cuanto a su composición, hay que tener en cuenta la propia naturaleza de las partículas, ya que tienen que ofrecer una respuesta a la aplicación de los campos eléctri-

cos y magnéticos. Las partículas en suspensión son diferentes en los ER y en los MR. Habitualmente, en los ER son óxidos metálicos, aluminosilicatos, sílica o polímeros, mientras que en los MR son partículas sólidas ferromagnéticas o paramagnéticas. Del mismo modo, se puede modificar el comportamiento de los fluidos en función de la concentración y la densidad de las partículas y de la distribución de la forma y del tamaño de las mismas. Cuanto más pequeñas son, más se reducen los impactos entre éstas, mejorando la durabilidad del fluido.

También es importante la naturaleza del fluido portador (normalmente no conductor), así como su densidad, su viscosidad y su polaridad. Los fluidos ER y MR pueden utilizar el mismo tipo de portador, por ejemplo aceites hidrocarburos o silicona, de alta resistividad eléctrica y baja viscosidad. Además, es habitual el empleo de aditivos adicionales, como estabilizadores y surfactantes para mejorar las propiedades del fluido.

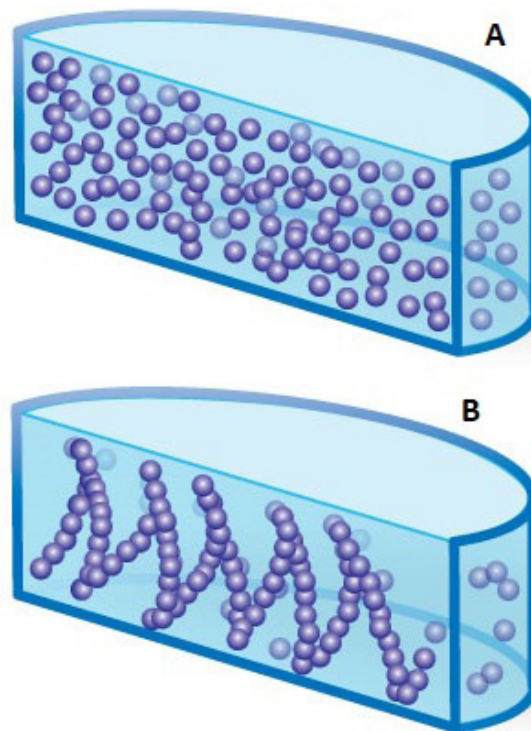


Fig. 1. Respuesta producida en los materiales ER y MR como resultado de la aplicación de un campo eléctrico o magnético externo. A: sin campo. B: con campo. (Fuente: <https://science.howstuffworks.com>).

<i>Aspectos importantes</i>	<i>MRF</i>	<i>ERF</i>
<i>Esfuerzo de cendencia máximo</i>	50-100 kPa	2-5 kPa
<i>Intensidad de corriente eléctrica</i>	2-24 V @ 1-2 A	2-5 kV
<i>Tiempo de respuesta</i>	Algunos milisegundos	Algunos milisegundos
<i>Campo operativo</i>	~250 kA/m	~4 kV/mm
<i>Densidad de energía</i>	0.1 J/cm ³	0.001 J/cm ³
<i>Estabilidad ante impurezas</i>	Buena	Pobre
<i>Temperatura de operación</i>	-40°C hasta 150°C	-25°C hasta 125°C

Fig. 2. Tabla resumen de las diferencias entre fluidos ER y MR.
(Fuente: <https://www.ciqa.mx/>).

Desde el punto de vista del comportamiento, es muy importante la temperatura a la que vaya a trabajar el material. Para poder hacer una comparativa entre distintos fluidos, se establece una temperatura de trabajo de 23°C (temperatura ambiente), a la cual se miden propiedades como los límites de viscosidad alcanzables, la velocidad de respuesta a las variaciones del campo eléctrico o magnético, la resistencia a la fatiga, al desgaste y al n° de ciclos.

Los fluidos ER y MR son muy similares en cuanto a su manera de funcionar, aunque presentan una serie de diferencias en cuanto a sus propiedades: los MR son entre 20 - 50 veces más fuertes y son significativamente menos sensibles a los contaminantes y a cambios de temperatura extremos. En la figura 2 se muestra un resumen de las diferencias más importantes.

De acuerdo a los datos que muestra esta figura, el diseño de un dispositivo con MR y ER permitiría contar con fuentes normales de energía. Además, no son necesarias grandes cantidades de fluido para llegar a las prestaciones requeridas, lo que afectaría positivamente al tamaño y peso de dicho dispositivo. También se puede ver que son capaces de operar en un amplio rango de temperaturas y, como son fluidos a temperatura ambiente, se adaptan fácilmente a diferentes geometrías, de modo que son apropiados para ser empleados en piezas de formas complejas.

Por otra parte, presentan una serie de inconvenientes, como por ejemplo el hecho de que los campos eléctricos y

magnéticos no son fáciles de aplicar ni de usar. La intensidad de campo se ve afectada por la presencia de materiales férricos y se requiere de un espacio extra espacio para albergar los electroimanes. Desde un punto de vista estructural, hay que tener en cuenta que como la diferencia entre las densidades de la partícula metálica y del fluido portador es muy grande existe una tendencia alta a la sedimentación.

Aplicaciones de interés para la defensa

Los fluidos ER y MR son materiales de interés para la defensa, que tendrán un

mayor impacto en la mejora de las prestaciones de las plataformas militares, ya que pueden ir incluidos en válvulas, sistemas de suspensión, de embrague, frenos, sistemas de control de vibraciones y de absorción de impactos.

En los **sistemas de suspensión**, los amortiguadores pueden llenarse con este tipo de fluidos (normalmente MR) en lugar de aceite convencional. La instalación de electroimanes permite que la viscosidad del fluido pueda ser variada, modificando la cantidad de amortiguamiento proporcionada por el amortiguador, en función de las



Fig. 3. Suspensiones de vehículos militares basadas en el empleo de fluidos MR.
(Fuente: <http://fuerzasmilitaresdelmundo.blogspot.com>).



Fig. 4. Los exoesqueletos permitirán a los soldados llevar mucho más equipo y armamento con menos esfuerzo. (Fuente: <https://es.gizmodo.com>).

estos materiales para generar el movimiento. Existen en el sector médico sistemas de control en las prótesis de rodillas basados en este tipo de materiales.

Estado actual de la tecnología

Actualmente, los EEUU son los líderes mundiales en cuanto a fluidos MR se refiere, siendo aplicados en el campo militar, principalmente en sistemas de suspensión para vehículos militares pesados, que modulan las fuerzas en un amortiguador en función de variables como la velocidad, los movimientos del vehículo y la posición de cada una de las ruedas. Son sistemas más ligeros, más pequeños, menos costosos y usan menos energía que los sistemas completamente activos. También existen estudios que hablan de emplear este tipo de materiales en sistemas de protección pasiva pero a día de hoy, el ejército Norteamericano no ha incorporado aún esta tecnología en el equipo de protección del soldado estadounidense ni en blindajes ligeros para plataformas.

Al hablar de fluidos ER, los líderes de esta tecnología en cuanto a investigación a nivel mundial se encuentran en el continente asiático y se desconoce que se esté aplicando ya en sistemas militares. En Europa, el desarrollo de este tipo de materiales (MR y ER) se encuentra en una fase muy temprana y no se tiene constancia de que haya sido aplicada en el ámbito de Defensa.

Conclusiones

Los fluidos ER y MR son materiales interesantes para el sector de la defensa por sus características particulares y por sus potenciales aplicaciones, principalmente como actuadores controlados de manera automática a través de la aplicación de un campo eléctrico (ER) o magnético (MR) o como futuros sistemas de protección frente a impactos. Actualmente, esta tecnología se encuentra en fase de desarrollo, conociéndose pocas aplicaciones en sistemas militares actuales. La optimización de las partículas, del fluido portador y de los aditivos que forman estos materiales es fundamental para facilitar una futura integración en sistemas tan exigentes como los militares.

condiciones del terreno y del tipo de conducción, para proporcionar mayor control y estabilidad de la plataforma. De este modo, se pueden lograr mayores velocidades de desplazamiento en distintos terrenos y reducir el daño del conductor y del vehículo por los impactos del mismo estando en movimiento.

El **control de vibraciones** es también un campo de interés. La respuesta acústica de las estructuras está directamente relacionada con el amortiguamiento de vibraciones, de manera que la reducción de vibraciones conlleva la reducción de ruido estructural. Los fluidos ER se emplean para suprimir estas vibraciones, que en el ámbito naval también son especialmente importantes, ya que implican una mejora en la reducción de ruido, mejora del confort y de la seguridad del casco y de la superestructura.

Sistemas de **protección balística** para el soldado. Son conocidos los

intentos por emplear fluidos espesantes en chalecos antibalas. Estos, cuando son sometidos a impactos de alta velocidad de deformación sufren una transición reversible de líquido a sólido rígido, y por tanto serían capaces de impedir que un proyectil los perforen. El problema es que no cubren las necesidades de protección de impactos a velocidades de deformación más bajas, como es el caso de cortes producidos por armas blancas. Por este motivo, el empleo de los fluidos ER y EM supone un avance, ya que la viscosidad de dichos materiales puede controlarse a voluntad, independientemente de si la amenaza procede de un proyectil o de un arma punzante, variando la intensidad del campo magnético o eléctrico aplicado.

Fabricación de **exoesqueletos** activos. El diseño de actuadores que empleen fluidos ER y MR puede mejorar el control y la movilidad de las distintas partes del exoesqueleto, fundamentado en la rapidez y precisión de

Biocombustibles para aviación

Autor: Héctor Criado de Pastors, OT ENEP, SDGPLATIN.

Palabras clave: biocombustibles, aviación, estandarización, *single fuel policy*.

Metas Tecnológicas relacionadas: LF 3.1.

Introducción

El desarrollo de biocombustibles avanzados es un aspecto clave en las estrategias de descarbonización de la economía, especialmente en el sector del transporte. Además, se trata de una política tecnológica de gran interés para la diversificación de fuentes de energía que redundaría en la mejora de la seguridad energética a nivel nacional y europeo. La relevancia de estas políticas, junto con los avances tecnológicos en este ámbito, hacen conveniente actualizar la información sobre este ámbito, que ya fue tratada en el BOTD nº22 de 2009.

A nivel nacional, los biocombustibles avanzados para el transporte son una de las medidas del borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. En él se señala que en determinados ámbitos civiles, como el transporte pesado por carretera y la aviación, estos combustibles son la alternativa más viable para la reducción del consumo de combustibles fósiles. Su desarrollo se encuentra con una importante barrera que requiere de un impulso específico, dado que su producción actual es muy reducida debido tanto a la escasez de algunas materias primas como al bajo nivel de madurez

de algunas tecnologías. Entre otros, algunos mecanismos de actuación previstos son un programa de ayudas para instalaciones de producción de biocarburantes avanzados y establecer un objetivo específico de consumo de biocarburantes de aviación.

Combustibles de aviación en Defensa

Junto con los factores ambientales, la naturaleza finita de las reservas de crudo y la preocupación por la seguridad de la cadena de suministro son factores que han impulsado la necesidad del desarrollo o, al menos, de adaptación al uso de combustibles alternativos en los ministerios de Defensa de nuestro entorno.

Dentro del sector de defensa, el desarrollo de biocarburantes de aviación tiene importantes implicaciones. De forma directa, por el uso de los mismos en aeronaves en territorio nacional: las plataformas aéreas emplean de forma generalizada JP-8, también conocido como F-34. Se trata de un tipo de queroseno basado en el combustible civil JET A-1 (queroseno de aviación convencional) al que se le añaden aditivos como inhibidores de corrosión, lubricantes y agentes antiestáticos. Por otro lado, tanto plataformas terrestres como sistemas de generación de energía (grupos electrógenos) deben estar adaptados al uso de JP-8 como combustible único para misiones conjuntas según la normativa OTAN.

Según los datos del Acuerdo Marco de suministro de combustibles líquidos en el ámbito nacional del Ministerio de Defensa, el consumo de combustibles de aviación del Ministe-

rio supone aproximadamente un 3% del consumo total nacional de estos combustibles, comparado con los datos del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Se trata de un porcentaje de consumo muy inferior al de Estados Unidos, donde el uso de combustible de aviación del DoD supone más del 11% del total nacional.

Procesos de estandarización de combustibles de aviación

La aviación civil supone un 3% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en la UE. A nivel del sector transporte, en Europa, la aviación supone el 13%¹. Se considera que, para lograr una opción baja en carbono, la única alternativa viable en la actualidad es el desarrollo de biocombustibles. Se trata de un sector con elevados niveles de exigencia en los requisitos técnicos de validación: soportar un amplio rango de condiciones operativas, que no suponga un compromiso para la seguridad, que pueda sustituir de forma directa el combustible convencional o que alcance requisitos de rendimiento muy estrictos.

A nivel internacional, tanto civil como militar, el proceso de estandarización de combustibles de aviación se realiza a través de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (*American Society for Testing and Materials* o *ASTM International*), una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Esta normativa viene recogida en el estándar ASTM D4054 (*Standard Practice for Qualification and Approval of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives*). Cualquier nuevo combustible debe superar, para su correcta certificación, una amplia serie de pruebas (propiedades físico-químicas, ensayo de componentes, ensayo en turbina), con el fin de demostrar la seguridad del uso de dicho combustible.

El proceso de certificación se divide en varias fases: en la fase inicial, se realiza un análisis físico-químico del combustible para comprobar que cumple con las especificaciones; si lo cumple se pasa a los ensayos "fit for purpose", en los que se realiza una caracterización físico-química

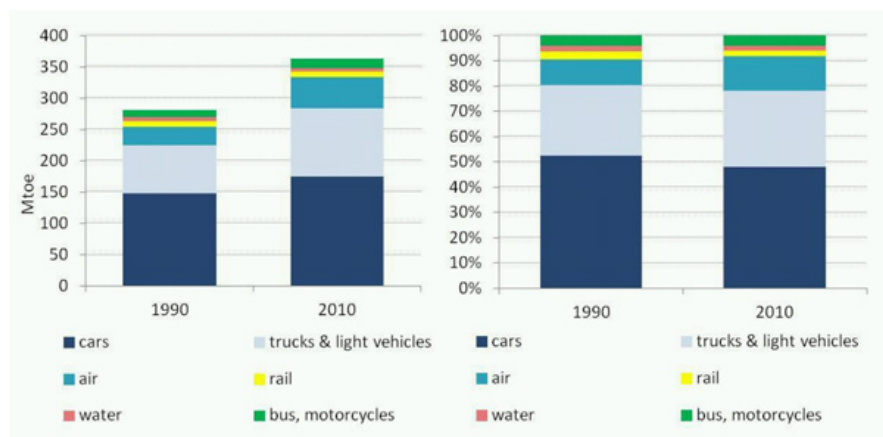


Fig. 1. Volumen de consumo de queroseno. (Fuente: AMF 2011).

¹ Fuente: ETIP

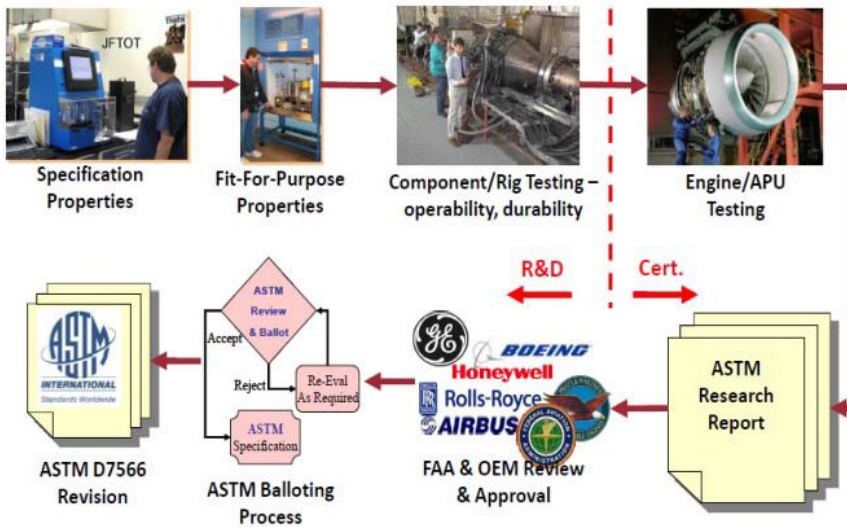


Fig. 2. Proceso de validación de ASTM D4054.
(Fuente: EDA).

no estandarizada donde se comprueba la evolución de las propiedades en función de la temperatura y se evalúan propiedades no incluidas en las especificaciones, en comparación con el combustible convencional. En la siguiente fase se analiza la interacción del combustible con motores simples o elementos del sistema y, posteriormente, con el sistema completo. Una vez superadas todas estas fases, se realiza una evaluación de los datos. Si la evaluación es correcta, se considera que el combustible es totalmente compatible con la normativa y puede usarse en la cadena de suministro bajo la misma denominación que su equivalente de origen fósil.

Rutas tecnológicas

Actualmente existen 6 rutas tecnológicas ya certificadas (más otras 8 en estudio) por parte de ASTM que serán implementadas en Europa:

- Queroseno parafínico sintético Fischer-Tropsch (*Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene - FT-SPK*): Este biocombustible se basa en gasificación de biomasa, tras la cual se realiza una síntesis de Fischer-Tropsch. La proporción máxima de mezcla es del 50%.
- Queroseno parafínico sintético Fischer-Tropsch con aromáticos (*Fischer-Tropsch Synthetic Kerosene with Aromatics - FT-SPK/A*): Se añaden alquilbencenos de origen no fósil a un FT-SPK. La proporción máxima de mezcla es del 50%.
- Queroseno parafínico sintético de ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (*Hydro-processed Esters*

and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene - HEFA-SPK): Biocombustible producido a partir de aceites vegetales y grasas animales, que son desoxigenados e hidroprocesados, produciendo un biodiesel del que posteriormente se extrae una fracción de bioqueroseno. La proporción máxima de mezcla es del 50%.

- Queroseno parafínico sintético de alcohol a combustible de aviación (*Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosene - ATJ-SPK*): Biocombustible creado a partir de isobutanol derivado de materias primas como azúcar, maíz o madera. El alcohol es deshidrogenado para producir un gas olefínico, posteriormente oligomerizado, hidrogenado, una de cuyas fracciones es un bioqueroseno. La proporción máxima de mezcla es del 30%.
- Hidroprocesamiento de azúcares fermentados - Queroseno iso-parafínico sintético (*Hydro-processed Fermented Sugars - Synthesized iso-paraffins - HFS-SIP*): Biocombustible producido a partir de azúcares que se convierten en moléculas parafínicas puras mediante un proceso de fermentación avanzada. La proporción máxima de mezcla es del 10%.
- Co-procesado: uso de bio-crudo hasta el 5% en volumen de materia prima lipídica en procesos de refinación de petróleo.

Una vez superada la certificación final, se considera que el uso de

dichos combustibles es tan seguro como el uso del combustible convencional dentro del volumen de mezcla autorizado que alcanza hasta el 50%. Pese a su certificación y a que a nivel tecnológico se trata de alternativas viables, actualmente la capacidad de producción a nivel industrial de estos combustibles alternativos es aún muy baja.

Iniciativas europeas y nacionales

Dada la importancia del sector y las dificultades para su descarbonización ya mencionadas, la Comisión Europea ha lanzado diversas iniciativas.

En 2011, la Comisión Europea lanzó el proyecto *European Advanced Biofuels Flightpath* junto con Airbus y con la cooperación de las principales aerolíneas europeas y productores de biocombustibles. Su objetivo era lograr desarrollar una serie de plantas de biocombustibles avanzados en 2015 y una segunda serie en 2020, con el objetivo de que la industria de aviación utilizase 2 millones de toneladas de biocombustible en 2020. En 2016 ya se habían realizado los primeros vuelos de prueba.

El programa además incluía acciones entre los países miembros y medidas para establecer objetivos cuantificables. Noruega y Suecia han comenzado a establecer objetivos (NO: 0,5% en 2019, 30% en 2030), no obstante, se trata de mercados pequeños y con poca tasa de crecimiento, por lo que no son comparables con España. España y Francia colaboran y pretenden establecer un "compromiso equilibrado" entre autoridades, productores e industria.

Dentro de los distintos proyectos que pretenden contribuir al cumplimiento de los objetivos de *Flightpath*, cabe señalar:

- Proyecto ITAKA. Este proyecto, lanzado en 2012, pretendía producir y ensayar biocombustibles sostenibles en sistemas logísticos ya existentes. La materia prima para producir biocombustible era aceite de camelina y aceite usado de cocina.
- Proyecto CORE Jet-FUEL: proyecto de coordinación de autoridades nacionales y actores interesados del sector público y privado para coordinar iniciativas de I+D, completado en 2016.

Tecnologías emergentes

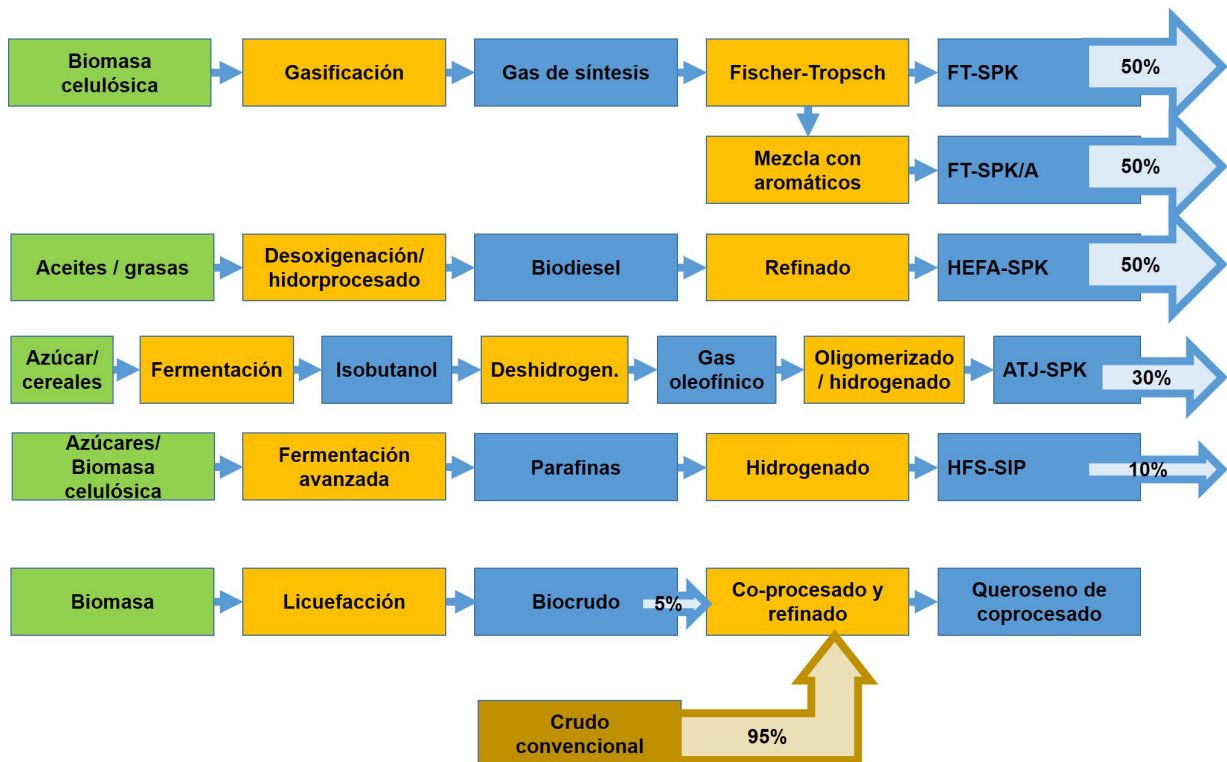


Fig. 3. Rutas tecnológicas validadas para la obtención de biocombustible de aviación. (Fuente: Elaboración propia).

- Proyecto BIOREFLY (2014-2018) para el desarrollo de un demostrador de escala industrial (2000 toneladas/año) para producir biocombustible a partir de lignina.

Las iniciativas europeas futuras en el ámbito de biocombustibles incluyendo los específicos de aviación, vendrán influenciados por la actividad de la Plataforma Tecnológica y de Innovación de Bioenergía (*European Technology and Innovation Platform Bioenergy - ETIP Bioenergy*). Las ETIP son foros, liderados por la industria y reconocidos por la comisión europea para dirigir la innovación, la transferencia de conocimiento y la competitividad europea.

La ETIP *Bioenergy* fue creada en 2016, uniendo la Plataforma Tecnológica Europea de Biocombustibles y la Iniciativa Industrial Europea de Biocombustibles.

BIOPLAT (Plataforma Tecnológica y de Innovación Española “Biomasa para la Bioeconomía”) ha establecido con AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea del Ministerio de Fomento) y SENASA (Servicios y Estudios para la Navegación Aérea y la Seguridad Aeronáutica del Ministerio de Fomento) un acuerdo para trabajar conjuntamente en el impulso de los combustibles sos-

tenibles para aviación en España. Este acuerdo pretende apoyar la propuesta del Ministerio de Fomento para la implantación paulatina de biocombustibles en el sector, con un objetivo de utilización de combustibles sostenibles de aviación en 2025, aún en estudio.

Conclusiones

El sector de transporte aéreo y el de defensa tienen ciertas similitudes respecto al uso de combustible fósil y sus posibles alternativas. En ambos casos, el prolongado ciclo de vida de las plataformas hace complicado que las alternativas tecnológicas en sistemas de propulsión (electricidad/pilas de combustible) puedan emplearse a medio plazo. Además, dichas alternativas tienen un ratio energía/peso y energía/volumen que los hacen inviables en ambos sectores. Dado el uso de JP-8 como combustible único a nivel OTAN hace que sea de gran relevancia el desarrollo de alternativas a su equivalente civil JET A-1 y su futura inclusión en la cadena de suministro en igualdad de condiciones con el queroseno de origen fósil.

Las distintas cadenas de producción aprobadas en los últimos años han demostrado la viabilidad a nivel tecnológico de las alternativas al

queroseno de origen fósil, mientras que los proyectos de demostración han probado la viabilidad a nivel industrial. Por tanto, cabe esperar que a corto plazo estos combustibles se integren dentro de la cadena de suministro del sector, inicialmente a nivel civil. El desarrollo de una capacidad de producción de estos combustibles a nivel europeo puede suponer una importante ventaja para la descarbonización de la economía y un factor importante a nivel de estrategia para la independencia energética.

Dentro del sector de defensa, el ámbito de trabajo de los biocombustibles ha sido lanzado como topic potencial tanto en el Grupo de Trabajo de Energía y Medioambiente de la EDA como en el Foro Consultivo para la Energía Sostenible en el Sector de Defensa y Seguridad de la Comisión Europea y la EDA². Debido a su importancia a nivel estratégico, es previsible que a medio plazo existan proyectos de aplicación de biocombustibles.

² CF SEDSS Information Sheet-Use of Alternative and Synthetic Fuels: <https://eda.europa.eu/docs/default-source/events/eden/phase-i/information-sheets/cf-sedss-information-sheet-use-of-alternative-and-synthetic-fuels.pdf>

En Profundidad

Interés de las redes metalorgánicas en Defensa

Autor: Nuria Aboitiz Cantalapiedra, OT NBQR, SDGPLATIN.

Palabras clave: MOF, redes organometálicas, NBQ, CWAs, descontaminación, catálisis, almacenamiento de hidrógeno.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 5.2.2; MT 5.2.3.

Introducción

Las redes metalorgánicas, conocidas como MOFs por sus siglas en inglés, son unos materiales cristalinos híbridos relativamente nuevos cuya principal característica es su alto grado de porosidad, la cual permite albergar en su interior gran cantidad de moléculas de compuestos fluidos de manera selectiva. Tienen su origen en los años 90 cuando, buscando la síntesis de zeolitas mejoradas, se empezó a obtener una amplia variedad de redes cristalinas que presentaban una porosidad permanente, una estructura flexible, una adsorción reversible de mayor capacidad y selectividad y, en general, mayor versatilidad y mejores prestaciones que los productos naturales porosos utilizados hasta entonces (arcillas, zeolitas o silicatos). Es por ello que han despertado un gran interés en diversos ámbitos, como el almacenamiento y separación de gases o líquidos, la biodistribución de fármacos, la catálisis, detoxificación o sensorización de gases, etc.

Estructura reticular

Antes de analizar cómo se puede explotar esta tecnología conviene profundizar en su morfología a nivel molecular para comprender mejor su funcionamiento. Como se ha mencionado, los MOFs son sólidos cristalinos híbridos, esto es, redes cristalinas formadas por la unión de núcleos metálicos a través de moléculas orgánicas (o ligandos), que se extienden en el espacio mono-, bi- o tri-dimensional.

Se trata de material sintético de diseño en el que los núcleos metálicos proporcionan a la red la capacidad de interactuar con ciertas moléculas, mientras que los ligandos construyen la estructura porosa con oquedades de distintas

formas y tamaños. Al hablar de núcleo metálico nos referimos a un clúster formado por cationes metálicos unidos entre sí mediante grupos funcionales de una manera definida; de modo que el clúster adopta una geometría concreta que determinará la conectividad con los ligandos. En esto se basa el diseño estructural de los MOFs, en controlar las condiciones de síntesis para combinar estratégicamente los cationes metálicos con grupos funcionales y así generar estructuras con geometrías y conectividades predeterminadas.

En la figura 1 (izquierda) se muestra un clúster de zinc-carboxilato compuesto por cuatro cationes de zinc (esferas azules) y seis grupos carboxilato, cada uno de ellos formado por un átomo de carbono (esfera negra) unido a dos átomos de oxígeno (esferas rojas). Los seis átomos de carbono son los puntos de unión con los ligandos y forman una geometría simplificada igual a un octaedro (representada debajo en azul). Estos clústeres conforman el elemento estructural fundamental de los MOFs.

Por su parte, los ligandos serán típicamente moléculas aromáticas rígidas con grupos funcionales capaces de unirse al núcleo metálico. En el ejemplo anterior, el ligando tiene una geometría lineal (debajo en amarillo) que, al unirse a un octaedro por cada extremo, genera una red de unidad cúbica primitiva (pcu).

En cambio, el ejemplo de la figura 2 muestra un clúster de cobre-carboxilato, cuyos átomos de carbono presentan una geometría cuadrangular plana (debajo en azul). La combinación de estas unidades con ligandos triangulares (representados en verde y amarillo) da

lugar a dos tipos de redes, las conocidas como pto y tbo. El hecho de que un mismo conjunto de elementos estructurales pueda generar diferentes entramados de red se conoce como polimorfismo.

La situación se complica cuando los núcleos metálicos forman agregados inorgánicos que se extienden en una dimensión constituyendo un elemento estructural lineal. En esos casos el número de entramados resultantes se multiplica, dando lugar a polimorfos con diferentes propiedades.

Por el contrario, el tamaño de los ligandos en principio no influye en la geometría reticular del MOF. La aplicación de este principio ha dado lugar al concepto de expansión isoreticular, donde la simple elongación del ligando produce estructuras sin cambios geométricos pero con diferencias en el tamaño de poro y, consecuentemente, en la capacidad de adsorción. Sin embargo, estos cambios en ocasiones se traducen en la aparición de redes interpenetradas, es decir, redes que se disponen ocupando el espacio vacío de la red original generando poros más pequeños que, dependiendo de la utilidad que se busque pueden incluso resultar beneficiosos. En todo caso, la formación controlada de redes supone un reto para la química sintética.

En la búsqueda de nuevas aplicaciones o mejoras de las ya conocidas, se han desarrollado MOFs aún más complejos combinando diferentes unidades de construcción que varían, ya sea en su geometría y conectividad, o en su composición química. La investigación de los últimos años en este ámbito está dirigida a continuar aumentando la complejidad de estos

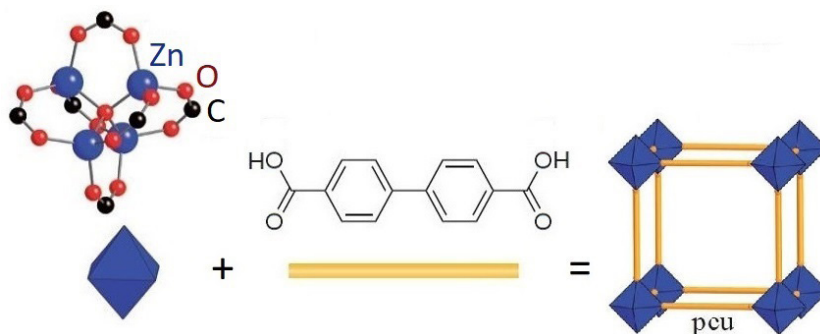


Fig. 1. Formación de red pcu. Izquierda: Núcleo metálico de geometría octaédrica. Centro: Ligando de geometría lineal. Derecha: Representación simplificada de la unidad cúbica primitiva (pcu) generada con los elementos anteriores. (Fuente: Anales de la Real Sociedad Española de Química, ISSN 1575-3417, N.º. 3, 2012, págs. 190-196).

En profundidad

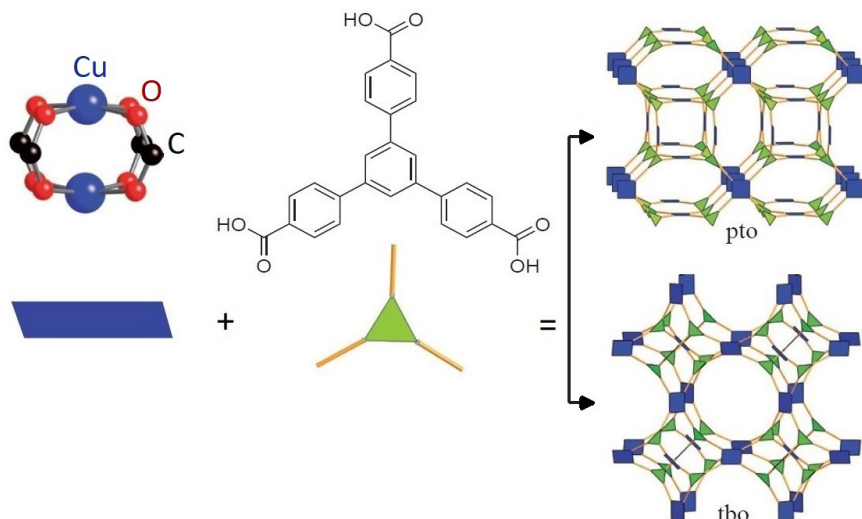


Fig. 2. Formación de redes pto y tbo. Izquierda: Núcleo metálico con geometría cuadrangular plana. Centro: Ligando de geometría triangular. Derecha: Representación simplificada de las unidades de red pto (arriba) y tbo (abajo) resultantes de la combinación de los elementos anteriores.

(Fuente: Anales de la Real Sociedad Española de Química, ISSN 1575-3417, N.º. 3, 2012, págs. 190-196).

materiales mediante la incorporación de macromoléculas dentro de estructuras suficientemente robustas, para que actúen como centros dinámicos que puedan responder a ciertos estímulos con cambios en su esqueleto, incluso de movimiento. Estos avances abren las puertas a una serie de aplicaciones tecnológicas de alto interés que se describen más adelante.

Fenómenos de adsorción

La capacidad de estas estructuras para retener o transformar sustancias está basada en los fenómenos de adsorción que tienen lugar en el interior de sus poros. La adsorción molecular consiste en la interacción de las moléculas de un gas (o fluido) con la superficie de un sólido,

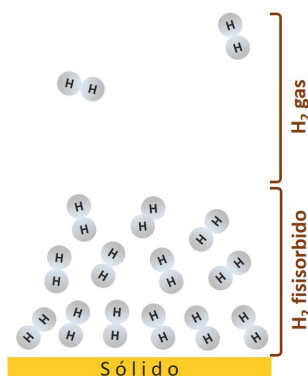


Fig. 3. Representación esquemática de la fisisorción de hidrógeno (H_2) sobre una superficie sólida en multicapa formando enlaces inter-moleculares débiles. (Fuente: Elaboración propia).

de modo que cuando dichas moléculas impactan la superficie sólida quedan adheridas a ella espontáneamente liberando energía. Según sea más fuerte o más débil el enlace que se forma entre las moléculas y la superficie sólida, la energía liberada será mayor o menor y, por ende, podrán producirse o no transformaciones químicas.

En general, se distinguen dos mecanismos en los procesos de adsorción: los físicos y los químicos. La adsorción física o fisisorción se produce mediante interacciones débiles (las llamadas fuerzas de Van der Waals) que no desencadenan cambios químicos. La energía involucrada en este tipo de enlaces es suficientemente baja como para que el proceso sea fácilmente reversible (desorción), por ejemplo, aumentando la

temperatura, reduciendo la presión, etc. Este fenómeno se produce en multicapa, es decir, una vez formada la primera capa de gas-sólido, nuevas moléculas del gas interaccionan espontáneamente con las ya adsorbidas. Como se aprecia en la figura 3, las moléculas de gas se apilan sobre el sólido ocupando un tamaño mucho menor que en estado gaseoso. Este mecanismo tiene especial interés en aplicaciones como el almacenamiento o la separación de gases.

Por el contrario, en los mecanismos de adsorción química o quimisorción las interacciones gas-sólido son mucho más fuertes; se forman enlaces covalentes liberando suficiente energía como para inducir reacciones químicas en el gas. La figura 4 muestra los distintos estados que atraviesa el gas hidrógeno (H_2) al ser quimisorbido. Inicialmente las moléculas de H_2 se adsorben sobre la superficie sólida (a) liberando una energía suficientemente alta como para inducir la ruptura del enlace intramolecular H-H. La molécula, por tanto, atraviesa un estado de transición (b) en el que coexisten el enlace intramolecular debilitado y los enlaces de cada átomo de hidrógeno con la superficie sólida. Finalmente se produce la disociación total de H_2 (c), quedando cada átomo individualmente unido al sólido (H-sólido). Se ha alterado la identidad química de ambos materiales.

En muchos casos, la quimisorción de un compuesto favorece su reacción con otros compuestos presentes en el medio, es decir, que originan procesos catalíticos. En el ejemplo de la figura 4 (d), los átomos de hidrógeno quimisorbidos reaccionan con una molécula de tetrafluoroetileno (CF_2) obteniéndose como producto una molécula de tetra-

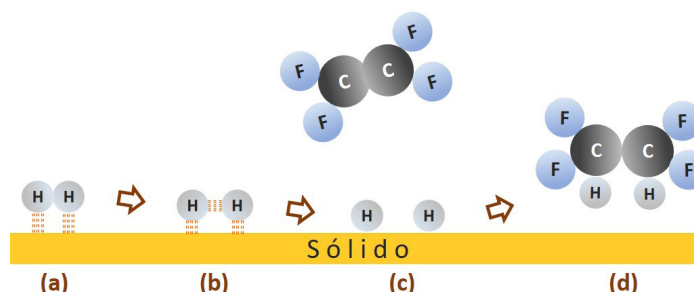


Fig. 4. Quimisorción de hidrógeno (H_2) y su reacción con gas tetrafluoroetileno (C_2F_4) mostrando los distintos estados del proceso: (a) Adsorción inicial de H_2 . Las interacciones están representadas con líneas naranjas intermitentes. (b) Estado de transición. (c) Disociación total de H_2 . (d) Reacción química de los átomos H con una molécula de C_2F_4 . (Fuente: Elaboración propia).

fluoroetano (CH_2F_4). Esta reacción no se habría producido de forma espontánea en ausencia del sólido.

Características destacadas de los MOFs

1. Porosidad

El alto grado de porosidad que estos materiales pueden alcanzar es sin duda su característica más significativa. Gracias al uso de la expansión isorreticular se han preparado estructuras con hasta el 90% de su espacio vacío, disponible para el paso o almacenamiento de gases, consiguiendo cristales con densidades tan bajas como $0,22 \text{ g/cm}^3$.

Uno de los aspectos de mayor interés cuando se habla de porosidad es el área de la superficie interior de los poros, ya que ahí tiene lugar la adsorción molecular. Para conocer la capacidad de adsorción de un sólido poroso se determina su superficie específica, definida como la relación entre el área superficial total y su masa (o volumen). Esta magnitud se mide de acuerdo a la cantidad de gas (generalmente nitrógeno) que el sólido puede adsorber en multicapa, por lo que puede tomar valores sorprendentemente altos. En el caso de los MOFs se han alcanzado los miles de metros cuadrados por gramo de material (m^2/g), lo cual los posiciona muy por delante de otras estructuras porosas de uso industrial, como las zeolitas, que presentan valores entre 20 y $800 \text{ m}^2/\text{g}$.

La superficie específica es una característica clave en el desempeño de un material poroso, pero además los MOFs contienen poros de gran volumen y tamaño, por lo que están siendo ampliamente estudiados para el almacenamiento de gases con fines energéticos, como hidrógeno o metano.

2. Selectividad

Otra propiedad interesante de los MOFs es que son capaces de adsorber gases o líquidos de forma específica, reteniendo selectivamente un componente de una mezcla. Una aplicación muy estudiada de estos materiales es la limpieza de aguas o gasolinas. Se han desarrollado, por ejemplo, estructuras capaces de adsorber exclusivamente el vapor de agua y desorberlo posteriormente mediante un aumento de la temperatura o haciendo pasar un flujo de nitrógeno. Otros MOFs son capaces de atrapar selectivamente los componentes sulfurados de la gasolina, responsables de la contaminación ácida del medioambiente.

La adsorción selectiva está basada en las diferencias de tamaño o de forma de las moléculas del gas en cuestión, por razones puramente geométricas de compatibilidad con los canales del poro, pero su efectividad puede incrementarse aumentando la energía de interacción con el sólido. Existen, por ejemplo, algunas redes con canales hexagonales que han probado tener una alta capacidad de selección de un gas u otro dependiendo del elemento integrado en el núcleo metálico. Así, empleando magnesio estos MOFs son capaces de retener dióxido de carbono (CO_2), mientras que con hierro han demostrado que pueden adsorber selectivamente moléculas de oxígeno (O_2).

3. Actividad catalítica

En términos generales, la catálisis consiste en favorecer energéticamente un proceso. Efectivamente, algunas sustancias, llamadas catalizadores, son capaces de facilitar la iniciación o desarrollo de una reacción química de forma que su propia estructura química resulte inalterada al final del proceso. En el caso de los MOFs se dice que la catálisis es heterogénea, ya que el catalizador es un sólido y los reactivos son fluidos, lo cual facilita su reciclado y reutilización. La fig. 4 muestra un claro ejemplo de catálisis heterogénea.

La gran ventaja que ofrecen los MOFs respecto a otros catalizadores heterogéneos es que su alto grado de porosidad permite un mejor paso de los reactivos a través de los poros, de manera que hay un mayor número de centros activos accesibles. Estos centros son los lugares precisos del MOF donde tienen lugar las interacciones/reacciones químicas, que generalmente serán los núcleos metálicos. Por otro lado, la naturaleza híbrida de los MOFs permite mejorar la actividad de los núcleos metálicos mediante la funcionalización de los ligandos, o incluso introduciendo nuevos centros activos en los propios ligandos. Además, el hecho de que los núcleos metálicos formen parte integrante de las redes tridimensionales permite que la catálisis tenga lugar en la superficie del material, sin necesidad de que los reactivos atraviesen la red.

Una de las aplicaciones más interesantes de esta propiedad es la detoxificación de sustancias contaminantes, ya sea en el ámbito de la intoxicación farmacológica como en el medioambiental, siendo este último es de especial interés para defensa.

4. Conductividad y movilidad de carga

Se están desarrollando MOFs que incorporan moléculas orgánicas de distinta naturaleza en sus poros para favorecer la conductividad y la movilidad iónica. Se trata de anillos aromáticos apilados con gran densidad electrónica o ricos en nitrógeno (como imidazoles), o agregados de distinta naturaleza. Estas propiedades son quizá las que se han explorado más tardíamente en los MOFs pero, en cualquier caso, se están estudiando capacidades, como por ejemplo el almacenamiento de carga y dinámica de recarga, para aplicaciones como el desarrollo de supercondensadores.

A nivel nacional, IMDEA Energía, por ejemplo, ha desarrollado y patentado un nuevo tipo de MOF que ha demostrado su utilidad como componente de pilas de combustible por su conductividad protónica. Estas estructuras, basadas en ligandos pireno-fosfonato y en la integración de diversos metales, son reciclables, presentan baja toxicidad y destacan por su elevada estabilidad química y térmica en condiciones extremas (todo el intervalo de pH y hasta $450 \text{ }^\circ\text{C}$).

5. Flexibilidad

No obstante todo lo anterior, la propiedad más singular que se ha conseguido conferir a estas estructuras es la flexibilidad; si bien, solo un 0,5% de los más de 20.000 MOFs conocidos hasta el momento han demostrado poseer esta cualidad. Los MOFs flexibles, combinan el orden propio de la red cristalina con la capacidad de sufrir transformaciones estructurales cooperativas durante los procesos de adsorción/desorción (fig. 5), de manera que pueden responder a estímulos físicos y químicos mediante fenómenos tan fascinantes como la "respiración" (*breathing*) y el "hinchamiento" (*swelling*). La respiración consiste en un cambio drástico del volumen y la forma de la unidad de red, mientras que el hinchamiento se caracteriza por un crecimiento gradual del volumen de la unidad de red sin cambio en la forma.

Existen también otros mecanismos de movimiento flexible que no implican un cambio de volumen de la unidad de red. Estos son la rotación de centros dinámicos, donde una pieza de la red gira alrededor de un eje de rotación a modo de puerta de entrada al poro, y el desplazamiento de subredes, que ocurre solo en

En profundidad

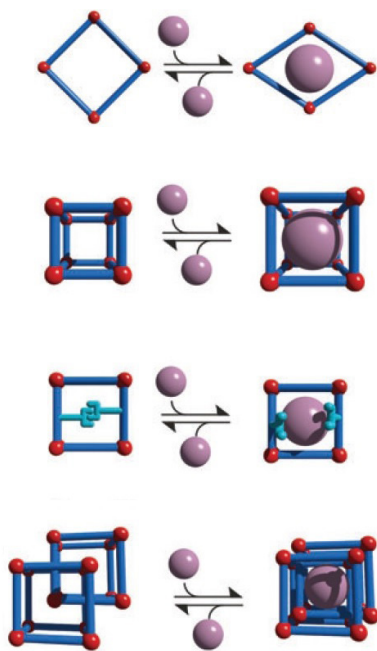


Fig. 5. Representación de la flexibilidad estructural de los MOFs en procesos de adsorción/desorción molecular de acuerdo a los distintos mecanismos (de arriba abajo): Respiración, hinchamiento, rotación de centros dinámicos y desplazamiento de subredes. (Fuente: Chemical Society Review, 2014, N° 43, págs. 6062-6096).

ciertas estructuras conectadas entre sí mediante enlaces débiles, como redes interpenetradas o redes bidimensionales apiladas, permitiendo su reubicación o desplazamiento.

Estos fenómenos se desencadenan generalmente como consecuencia de las interacciones con el gas huésped, es decir, se trata de procesos de reconocimiento molecular. Dado que gran parte de la investigación en este ámbito está orientada a aplicaciones de separación de gases, el objetivo principal es obtener MOFs flexibles en los que solo una interacción específica, la del gas que se pretende adsorber, domine el proceso de apertura de los poros.

Una aplicación que está experimentando un gran desarrollo es la liberación regulada y biodistribuida de fármacos contenidos en MOFs. Dirigiendo este último específicamente al órgano o tejido donde interesa que se libere y actúe, se consigue una acción más efectiva y menos tóxica del fármaco. Actualmente existen dos vías para conseguir la biodistribución de fármacos: una basada en el reconocimiento molecular mediante la funcionalización del MOF con anticuerpos activos y otra basada

en la respuesta del MOF frente al pH del entorno. Ya se han llevado a cabo pruebas en ratones con resultados esperanzadores pero esta aplicación conlleva un desarrollo lento debido a la complejidad biomédica y a la estricta normativa que rige los ensayos clínicos.

Sin embargo, la flexibilidad de estas estructuras podría estimularse, al margen de fenómenos de reconocimiento molecular o de procesos químicos, a través de campos de fuerza externos, como estrés mecánico, temperatura, luz, o incluso interacciones eléctricas y magnéticas. De este modo, los MOFs flexibles podrían emplearse como sensores o como interruptores moleculares. A la larga, la integración de estos materiales en sistemas de trabajo como microsensores o elementos micromecánicos tendría aplicaciones muy interesantes en distintos ámbitos como la nanomedicina. Por ejemplo, utilizando las propiedades de adsorción selectiva, se podrían utilizar como nanoreactores catalíticos capaces de adsorber exclusivamente eductos de una mezcla y liberar los productos de reacción de los poros aplicando un estímulo externo.

Aplicaciones de especial interés para defensa

Ya se han mencionado varios ámbitos de aplicación para los que se están de-

sarrollando redes metalorgánicas como solución tecnológica aprovechando sus propiedades específicas. En este apartado se pretende profundizar únicamente en dos de especial interés para defensa: la detoxificación y el almacenamiento de gases energéticos.

1. Detoxificación NRBQ

La capacidad catalítica de los MOFs ha probado ser eficaz en la descontaminación de agentes nerviosos, como sarín y somán. Concretamente, se han desarrollado estructuras inspiradas en una enzima natural (fosfotriesterasa) presente en bacterias, capaz de catalizar la hidrólisis de estos agentes. El núcleo metálico de la fosfotriesterasa interactúa con la molécula neurotóxica induciendo en ella un estado que favorece la ruptura de algunos de sus enlaces y la formación de nuevos enlaces con moléculas de vapor de agua presente en la atmósfera. El resultado es la detoxificación del agente. La figura 6 muestra los distintos estados del proceso para el caso de sarín (conocido como GB por sus siglas militares).

Tras la unión con la enzima (a), el enlace que queda más debilitado es el fósforo-flúor (P-F), por lo que la molécula de GB atraviesa un primer estado de transición (b) en el que, mientras se está rompiendo dicho enlace, se está formando un enlace con una molécula de agua, hasta que se finalmente el átomo

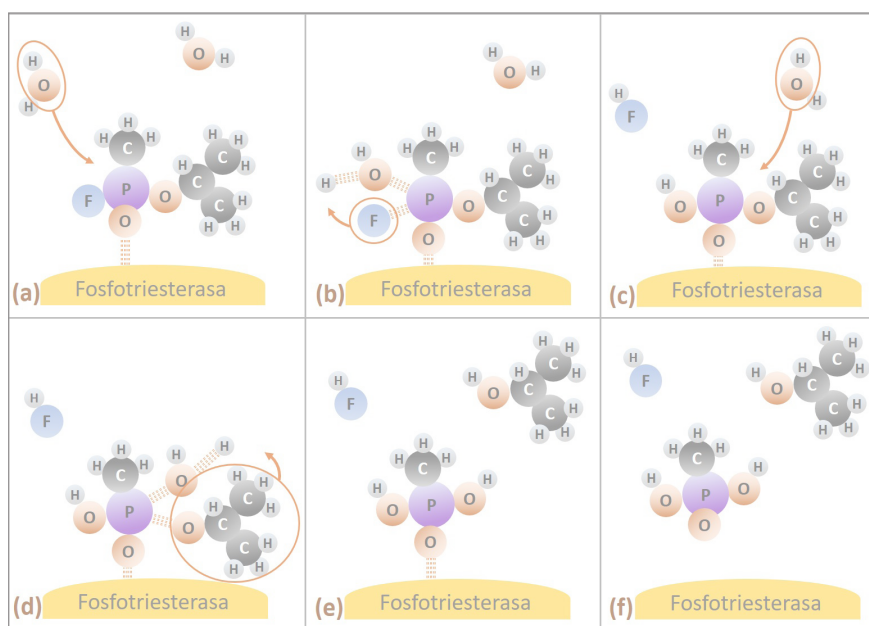


Fig. 6. Hidrólisis catalítica de sarín (GB) con fosfotriesterasa. Las interacciones están representadas con líneas naranjas intermitentes y el movimiento de grupos funcionales con flechas naranjas. (a) Adsorción inicial de la molécula de GB. (b) Primer estado de transición. (c) Molécula parcialmente hidrolizada. (d) Segundo estado de transición. (e) Molécula completamente hidrolizada. (f) Desorción de la molécula de ácido fosfónico. (Fuente: Elaboración propia).

de flúor queda sustituido por un grupo hidroxilo (c). En este punto, la molécula parcialmente hidrolizada ha perdido su alta toxicidad, pero la reacción continúa adelante, ya que también el enlace sencillo fósforo-oxígeno (P-O) está debilitado y atraviesa un estado de transición análogo al anterior (d). Esto conduce a la formación de un nuevo enlace con otra molécula de agua (e). En resumen, la transformación química de sarín produce una sustancia (ácido fosfónico) cuya toxicidad es insignificante, además de otros productos de reacción (f).

Cabe destacar que la hidrólisis de agentes neurotóxicos es un proceso espontáneo que se produce en ausencia de catalizadores por la simple exposición al medioambiente. Se trata de una degradación natural, pero la reacción es muy lenta, de modo que la amenaza perdura durante días, semanas o incluso meses, como en el caso del VX, y de ahí el interés en obtener catalizadores para acelerar esta reacción.

El interés de los MOFs radica en que el diseño de estas estructuras permite potenciar la capacidad detoxificante de la enzima natural, reduciendo el tiempo de reacción a unos pocos minutos. Por un lado, se utiliza un catión metálico diferente al de la enzima (zirconio en lugar de zinc) para intensificar la interacción gas-sólido. Por otro, se ha comprobado que el armazón estructural del MOF juega un papel fundamental en la acción catalítica, atrapando las moléculas del neurotóxico en sus poros. La Universidad de Northwestern (Illinois) ha patentado un MOF (el NU-1000), de estructura muy robusta química y térmicamente, con propiedades detoxificantes frente a sarín. El objetivo es integrar el material en los filtros de las máscaras NBQ y en tejidos para protección NBQ.

A nivel nacional, ya desde 2011 se ha apostado por esta tecnología, financiando proyectos en el marco del programa COINCIDENTE para el desarrollo de MOFs activos frente a neurotóxicos y su posterior incorporación en el tejido de carbono activo que integran los trajes de protección NBQ. La síntesis de este material se ha llevado a cabo en la Universidad de Granada.

2. Tecnología de almacenamiento para pilas de combustible

Gases como metano o hidrógeno están considerados fuentes de energía limpia de muy alto interés por su alta capacidad energética y la inocuidad

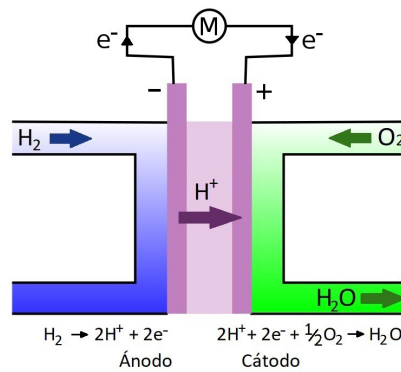


Fig. 7. Esquema del funcionamiento de una pila de hidrógeno.
(Fuente: Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible).

de los productos que generan. Las pilas de combustible son como una pila convencional que se recarga con combustible para llevar a cabo la reacción química encargada de producir la energía. En el caso de las pilas de hidrógeno los reactivos son hidrógeno (combustible) y oxígeno del aire (comburente), y el producto de reacción es únicamente agua (fig. 7).

Sin embargo, la ingeniería de las pilas de hidrógeno tiene un claro hándicap en conseguir depósitos que puedan contener gran cantidad del gas en un volumen manejable. Actualmente se utilizan gases ricos en hidrógeno, lo que supone una pérdida del rendimiento energético, o incluso hay prototipos de hidrógeno licuado en botella, pero para ello es necesario reducir la temperatura hasta -253°C . Esto último añade una gran complicación técnica al sistema y tampoco resulta ventajoso, ya que la densidad del hidrógeno líquido es muy baja (5 Kg ocuparían unos 56 m^3) debido a las débiles interacciones entre sus moléculas. Lo que se busca son sistemas capaces de adsorber hidrógeno con energías superiores a la de condensación. El almacenamiento de hidrógeno es pues una tecnología habilitante clave para el desarrollo completo de las pilas.

En este aspecto, la alta porosidad y rápida cinética de adsorción/desorción de los MOFs introducen la posibilidad de mejorar la captura de hidrógeno y su liberación controlada, ya que la fisisorción del gas aumenta su densidad incluso por encima de la del hidrógeno líquido. En principio, estos adsorbentes presentan una limitación fundamental que radica en la débil interacción de las moléculas de H_2 con

la superficie sólida. Materiales con alta capacidad de almacenamiento a -100°C ven muy reducida esta capacidad a temperatura ambiente, por lo que existe un gran número de grupos de investigación trabajando en la modelización, síntesis y testeo de nuevas estructuras MOF altamente porosas que aumenten la energía de interacción con las moléculas de H_2 .

Las estrategias utilizadas con este fin consisten, por un lado, en aumentar la superficie específica y el volumen de los poros mediante la elongación de los ligandos, la interpenetración de redes o la síntesis de sistemas con ligandos mixtos. En este caso, la mejora se produce en condiciones de alta presión. Asimismo, la optimización de la curvatura y superficie de los poros juega un papel importante para conseguir un empaquetamiento eficiente de las moléculas de H_2 .

Por otro lado, se busca incrementar la energía de interacción con el gas a temperatura ambiente mediante la manipulación de los núcleos metálicos y la generación de nuevos centros activos insertados en los propios ligandos. Por ejemplo, se han sintetizado MOFs con una coordinación del metal incompleta, los denominados "centros metálicos abiertos" que, para estabilizarse, interaccionan más fuerte mente con el gas huésped.

Perspectivas de la tecnología

El número de posibilidades estructurales y funcionales que ofrece la química de coordinación, y en especial las redes metalorgánicas, es prácticamente ilimitado debido a la enorme variabilidad combinatoria de la química orgánica. Esta particularidad y los avances logrados hasta el momento permiten esperar que los MOFs se introduzcan próximamente en el mercado como soluciones rentables en distintos ámbitos de interés para defensa, como son la detoxificación, la sensorización y el almacenamiento de gases combustibles y de energía eléctrica.

No obstante, para acelerar el desarrollo tecnológico de estos materiales, es necesario aún estudiar y conocer a fondo la teoría que define sus propiedades (adsorción, flexibilidad, conductividad,...) para poder elaborar buenos sistemas predictivos que permitan realizar un diseño molecular acertado, según la función que se desea proporcionar a cada estructura.

Boletín de Observación Tecnológica en Defensa

Disponible en

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

<https://publicaciones.defensa.gob.es/catalogsearch/result/?cat=0&q=boletin-de-observaci>