

# Boletín

## DE OBSERVACIÓN TECNOLÓGICA EN DEFENSA



SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PLANIFICACIÓN, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN  
Boletín de Observación Tecnológica en Defensa n.º 75 • 4.º trimestre de 2022

El proyecto MUSTANG. Un paso más hacia la independencia europea  
del nitruro de galio

Control de emisiones  $\text{NO}_x$  en buques de guerra

Baterías estructurales



MINISTERIO DE DEFENSA



Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

NIPO 083-15-183-4 (edición en línea)

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

ISSN 2444-4839 (edición en línea)

ISSN 2444-4847 (impresión bajo demanda)

**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](mailto:observatecno@oc.mde.es).

**Director:** Óscar Jiménez Mateo.

**Consejo Editorial:** José Agrelo Llaverol, Cte. Carlos Calderón. Sstte. José María Martínez Benítez, María Isabel Pérez-Cerdá Herrero.

**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): Carlos Garrido Sánchez; 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 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:**

[https://www.freepik.com/free-vector/integrated-circuit-polygonal-low-poly-wireframe-background\\_19167121.htm?log-in=google](https://www.freepik.com/free-vector/integrated-circuit-polygonal-low-poly-wireframe-background_19167121.htm?log-in=google) Integrated circuit polygonal low poly wireframe background (Modificada). Fuente: Freepik

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, suscripciones y dudas:**

[observatecno@oc.mde.es](mailto:observatecno@oc.mde.es)

[Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica \(SOPT\) \(defensa.gob.es\)](http://Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT) (defensa.gob.es))



## CONTENIDOS

### Editorial

### Actualidad

- 4 ¿Dónde hemos estado?
- 7 Control de emisiones NO<sub>x</sub> en buques de guerra

### Tecnologías emergentes

- 10 Baterías estructurales

### En profundidad

- 14 El proyecto MUSTANG. Un paso más hacia la independencia europea del nitruro de galio

## Tecnologías emergentes con potencial aplicación a defensa y seguridad

La Subsecretaría General de la OTAN para Retos Emergentes de Seguridad, dependiente del secretario general Stoltenberg, está poniendo en marcha el Acelerador de Innovación de Defensa para el Atlántico Norte (DIANA), cuyo objetivo es apoyar la creación en las naciones europeas de la Alianza, Estados Unidos y Canadá, de un ecosistema formado por equipos de investigadores, *startups* y centros de ensayo públicos y privados que centren su actividad preferentemente en desarrollar tecnologías emergentes y disruptivas de doble uso. También la EDA o la Comisión Europea están articulando iniciativas en esta línea, conscientes de la importancia estratégica que el desarrollo de estas tecnologías conlleva.

Determinadas tecnologías militares emergentes muestran características que podrían cambiar el equilibrio ofensivo-defensivo en las próximas décadas, afectando al carácter futuro de la seguridad y la defensa, así como de algunos ámbitos de la sociedad. Un ejemplo de ello son tecnologías como la inteligencia artificial (IA), los sistemas de armas autónomos, las armas hipersónicas, las armas de energía dirigida, el espacio, la biotecnología o las tecnologías cuánticas. Las interacciones entre tecnologías emergentes también podrían mejorar las capacidades militares existentes o habilitar nuevas capacidades, con consecuencias imprevistas para la defensa y la estabilidad estratégica. Por ejemplo, una tecnología habilitadora como la IA podría combinarse con la computación cuántica para producir métodos más potentes de aprendizaje automático, lo que podría generar mejoras en el reconocimiento de imágenes y la identificación de objetivos y habilitar armas autónomas más sofisticadas.

En el caso de las tecnologías cuánticas, su evolución impulsará la modificación de las bases de la seguridad actual. Se prevé que la computación cuántica superará la capacidad de procesamiento de los ordenadores clásicos en una o dos décadas (lo cual es conocido como *supremacía o ventaja cuántica*), alcanzando capacidad suficiente para romper las claves criptográficas públicas, por lo que es necesario trabajar desde ya en la ciberseguridad en este entorno para cuando llegue el momento, desarrollando e implementando criptografía poscuántica resistente a los ataques efectuados mediante criptoanálisis cuántico. Por otro lado, el desarrollo y la adaptación de estas tecnologías también supondrá que aplicaciones clave en defensa, como sistemas de comunicaciones seguros, detección de plataformas (aéreas, terrestres,

submarinas), precisión en los datos en tiempo real, etc., podrán mejorar significativamente.

El ritmo de desarrollo de una tecnología emergente y su adopción en el sector de la defensa está relacionado con una serie de factores económicos, políticos y éticos que deben alinearse para que su uso en este ámbito sea factible, lo que implicará que en el sector civil no tiene por qué ser el mismo. Otro factor que marca dicho ritmo de asimilación de las tecnologías militares emergentes es la competencia, es decir, el desarrollo por parte del adversario de una de estas capacidades nos podría obligar a desarrollar a nosotros dichas capacidades o, al menos, las contramedidas necesarias para minimizar nuestra vulnerabilidad.

Por ello, las tecnologías cuánticas están tomando un papel importante en las estrategias de defensa de gran parte de las potencias mundiales (China, EE.UU., Europa, Rusia, Australia, Japón, Israel...). La ventaja en el desarrollo de tecnologías cuánticas de unos países a otros aumentará la brecha digital entre ellos y, consecuentemente, la desigualdad en seguridad. Por el contrario, el desarrollo y la difusión generalizada de estas tecnologías podría reducir, a lo largo del tiempo, las ventajas comparativas de algunas potencias.

Así, sabedores de que la primacía tecnológica influye cada vez más en el éxito en el campo de batalla, la OTAN indica en uno de los puntos de su último Concepto Estratégico de 2022 que los Aliados «promoveremos la innovación y aumentaremos nuestras inversiones en empresas emergentes y tecnologías disruptivas para mantener nuestra interoperabilidad y nuestra ventaja militar. Trabajaremos juntos para adoptar e integrar nuevas tecnologías, cooperar con el sector privado, proteger nuestros ecosistemas de innovación, forjar criterios y comprometernos con los principios de uso responsable que reflejen nuestros valores democráticos y los derechos humanos».

También la Unión Europea (UE) es consciente de que las tecnologías emergentes están reconfigurando los asuntos militares y los mercados de defensa. Por ello, en su documento *A Strategic Compass for Security and Defence*, resalta la importancia de invertir en innovación y hacer un mejor uso de la tecnología civil en defensa, ya que «es clave para mejorar nuestra soberanía tecnológica, reducir las dependencias estratégicas y preservar la propiedad intelectual en la UE», desafíos que se podrían hacer frente a través de una cooperación más estrecha entre la UE y los Estados miembros.

# Actualidad

## ¿Dónde hemos estado?

5 - 6 de octubre de 2022

- **7.º Punto de Situación NBQ**

La 7.ª reunión «Punto de Situación NBQ» organizada por el MADOC se ha celebrado en la ACING de Hoyo de Manzanares, con participantes del MALE, Unidades NBQ de los ejércitos, RNBQ Valencia n.º 1, MOPs, UME/GIETMA, INTA, EM Defensa NBQ, Jefatura de Sanidad Operativa, Centro Militar de Farmacia e Instituto de Toxicología de la Defensa, sirvió para intercambiar información sobre aspectos relativos a la situación y necesidades de la defensa NBQ en áreas de doctrina, orgánica, materiales, ayudas y medios, gestión del conocimiento, obtención de lecciones aprendidas, investigación y experimentación. Cabe destacar que se compartieron las experiencias y lecciones aprendidas de la Operación Balmis, la Operación Baluarte y la emergencia del volcán de La Palma.



5 - 6 de octubre de 2022

- **50.ª Reunión del Panel HFM de la STO**

La reunión de otoño del Panel de Factores Humanos y Medicina (HFM) de la Organización de Ciencia y Tecnología (STO) se celebró en Washington (EE.UU.). Los objetivos principales de la reunión fueron la revisión del avance de las actividades técnicas del panel y la presentación de 9 nuevas propuestas de actividades técnicas. Asimismo se realizaron presentaciones sobre distintos temas de interés, como la última reunión del Comité de Dirección Médica Militar OTAN (COMEDS), la situación actual de la OTAN en el contexto de la guerra de Ucrania, el concepto estratégico OTAN resultante de la cumbre de Madrid.



10 - 11 de octubre de 2022

- **5.ª Edición del Foro 2E+**

La 5.ª Edición del Foro 2E+i se ha celebrado los días 10 y 11 de octubre y organizado por el mando de Apoyo Logístico del Ejército en el Museo del Ejército (Toledo).

Supone un diálogo abierto y directo entre Ejército, universidad e industria, fuera del ámbito comercial y contractual, para fomentar el intercambio de opiniones sobre cómo afrontar los retos del futuro con el horizonte 2035.



10 - 11 de octubre de 2022

- **Simposio de Especialistas del Panel SET de la STO *Space Sensors and Space Situational Awareness***

El evento se celebró en Interlaken (Suiza) y reunió a expertos de la OTAN en el campo de los sensores espaciales. Trató principalmente sobre redes de sensores espaciales como suministradores de información esenciales para aplicaciones militares, especialmente respecto de la asignación de blancos.



Toda la información sobre estos y otros eventos puede consultarse en el Portal de Tecnología e Innovación del Ministerio de Defensa : [www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es](http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es)

## ¿Dónde hemos estado?

12 de octubre de 2022

- **Primera reunión del grupo de expertos de la Comisión Europea para el observatorio de tecnologías críticas en defensa, espacio e industrias civiles relacionadas**

El pasado 12 de octubre de 2022 tuvo lugar en Bruselas la primera reunión del grupo de expertos que va a apoyar el trabajo del Observatorio de Tecnologías críticas en defensa, espacio e industrias civiles relacionadas que recientemente ha creado la Comisión Europea. Este observatorio es una nueva herramienta de la que dispone la Comisión para contribuir a la soberanía tecnológica estratégica de la UE a través de la reducción de las dependencias tecnológicas del exterior en aquellos ámbitos de mayor impacto futuro y sinergias entre estos sectores.



19 - 20 de octubre de 2022

- **ENISE 16**

Las jornadas organizadas por el Instituto Nacional de Ciberseguridad (INCIBE) se celebraron bajo el lema *Facing the future together*, convirtiéndose en un punto de encuentro clave para la industria del sector de la ciberseguridad y en una oportunidad para el debate y el intercambio de ideas sobre la innovación y las últimas tendencias del sector.



25 - 27 de octubre de 2022

- **5th C-IED Technology Workshop**

El *5th C-IED Technology Workshop*, organizado los días 25 a 27 de octubre por el Centro de Excelencia C-IED de la OTAN en Segovia, es un encuentro internacional bianual que reúne a expertos de las Fuerzas Armadas, Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, industria, mundo académico y el resto de la comunidad de interés de la lucha contra Artefactos Explosivos Improvisados (IEDs) en áreas de prevención, detección, neutralización, mitigación o explotación técnica.



8 de noviembre de 2022

- **Jornada Oportunidades del PERTE de microelectrónica y semiconductores en los sectores de defensa y seguridad**

La Fundación Círculo de Tecnologías para la Defensa y la Seguridad ha organizado la jornada «Oportunidades del PERTE de microelectrónica y semiconductores en los sectores de defensa y seguridad», que ha tenido lugar en la sede de IMDEA Nanociencia en Madrid. Con esta jornada se ha pretendido propiciar la reflexión conjunta entre la industria, la academia y las administraciones, mediante tres mesas redondas representativas de cada uno de estos sectores con el fin de lograr el mejor aprovechamiento de las oportunidades que este PERTE puede traer a la defensa y la seguridad.



## ¿Dónde hemos estado?

14 de noviembre de 2022

- **Prototipo de UGV armado**

En las instalaciones de San Juan del Viso (Alcalá de Henares), se celebró una demostración de las capacidades de un prototipo de UGV de la empresa Escribano Mechanical & Engineering armado desarrollado como parte del proyecto C-UGV, financiado por la SDG PLATIN en el marco de la convocatoria COINCIDENTE 2018.



15 - 17 de noviembre de 2022

- **IX CONGRESO NACIONAL DE I+D EN DEFENSA Y SEGURIDAD (DESEi+d 2022)**

El pasado mes de noviembre, durante los días 15, 16 y 17, se celebró la novena edición del Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad en la Base General Morillo en Pontevedra, organizado conjuntamente por las Direcciones Generales de Armamento y Material y de Reclutamiento y Enseñanza Militar.

En línea con las ediciones anteriores, el DESEi+d fue un foro y punto de encuentro de todos los agentes relacionados con la I+D+i en el ámbito de la defensa y la seguridad, donde tuvieron la oportunidad de presentar y difundir los resultados de las últimas investigaciones y trabajos realizados en alguna de las áreas temáticas relacionadas con la defensa y seguridad.



29 - 30 de noviembre y 1 de diciembre de 2022

- **XVI Jornadas STIC CCN-CERT | IV Jornadas de Ciberdefensa ESPDEF-CERT**

Estas jornadas, organizadas por el Centro Criptológico Nacional, se han celebrado tanto en modo online como en modo presencial en Kinépolis (Ciudad de la Imagen, Madrid), bajo el lema «Un ciberescudo único para España». En esta edición han tenido protagonismo las amenazas y tendencias del ciberespacio en distintos ámbitos, el cibercrimen, la Red Nacional de SOC, el Esquema Nacional de Seguridad, los productos y tecnologías de ciberseguridad, la inteligencia artificial, las tecnologías cuánticas y el 5G y la seguridad industrial.



13 - 15 de diciembre de 2022

- **Workshop AVT-SCI-379 Technology Needs for Hypersonic Threats (TecNHOT)**

Celebrado los días 13 a 15 de diciembre en las instalaciones del centro aeroespacial alemán (DLR) de Berlín, se identificaron y promovieron actividades de investigación para desarrollar soluciones que permitan desarrollar capacidad de combatir las emergentes amenazas hipersónicas.



Toda la información sobre estos y otros eventos puede consultarse en el Portal de Tecnología e Innovación del Ministerio de Defensa : [www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es](http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es)

# Control de emisiones NO<sub>x</sub> en buques de guerra

Autores: D. Julio M. Pernas Urrutia, D. Raúl Villa Caro, Armada.

Palabras clave: MARPOL, emisiones, contaminación.

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 6.2.1; 7.2.1.

## Introducción

El Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques de 1973 (MARPOL) se ocupa de preservar el medio ambiente marino mediante la prevención de la contaminación.

En lo relativo a la aplicación del Anexo VI MARPOL sobre el control de emisiones de contaminantes a la atmósfera, para las emisiones NO<sub>x</sub> se establece un alcance de aplicación a motores diésel marinos con potencia mayor de 130 kw (excepto motores de emergencia), en base a niveles de emisiones Tier I, II y III.

Para reducir el nivel de emisiones de NO<sub>x</sub> a Tier III, preceptivo en zonas ECA (Emission Control Areas), además de los procesos de optimización de combustión correspondientes al nivel Tier II (global), se precisa del auxilio de otras tecnologías.

En el presente artículo se realiza una descripción somera de la tecnología SCR (Selective Catalytic Reduction), con el fin de dar cumplimiento al



Fig. 1. F101 «Álvaro de Bazán» en Sidney. (Fuente: Flirck Armada).

Anexo VI MARPOL en lo referente al control de emisiones NO<sub>x</sub> a la atmósfera, y así permitir la navegación de buques de guerra por zonas ECA (Tier III).

## Convenio MARPOL

Dentro de la normativa de la IMO (International Maritime Organization), el convenio MARPOL se ocupa de preservar el medio ambiente marino mediante la prevención de la contaminación por petróleo y otras sustancias nocivas.

En el caso concreto del Anexo VI MARPOL, relativo al control de

emisiones a la atmósfera, se incluyen una serie de reglas relacionadas con distintos tipos de contaminantes emitidos por buques y, en particular, con los NO<sub>x</sub> [1].

Respecto de los buques de guerra, su cumplimiento es voluntario. Ahora bien, debido al compromiso actual de las Armadas y Marinas con el desarrollo de sus operaciones de forma respetuosa con el medio ambiente, lo habitual es que cumplan con el Convenio MARPOL.

## Niveles de emisiones NO<sub>x</sub>

La necesidad del control de emisiones NO<sub>x</sub> en buques de guerra afecta únicamente a la propulsión o generación eléctrica a partir de motores diésel, quedando fuera las turbinas de gas debido al elevado grado de dilución o coeficiente de exceso de aire durante su funcionamiento.

El control de emisiones de NO<sub>x</sub> de motores diésel marinos se lleva a cabo mediante el cumplimiento de las prescripciones de reconocimiento y certificación que conducen a la expedición del certificado EIAPP (Engine International Air Pollution Prevention).

Posteriormente se debe de demostrar su cumplimiento durante el servicio, de acuerdo con las

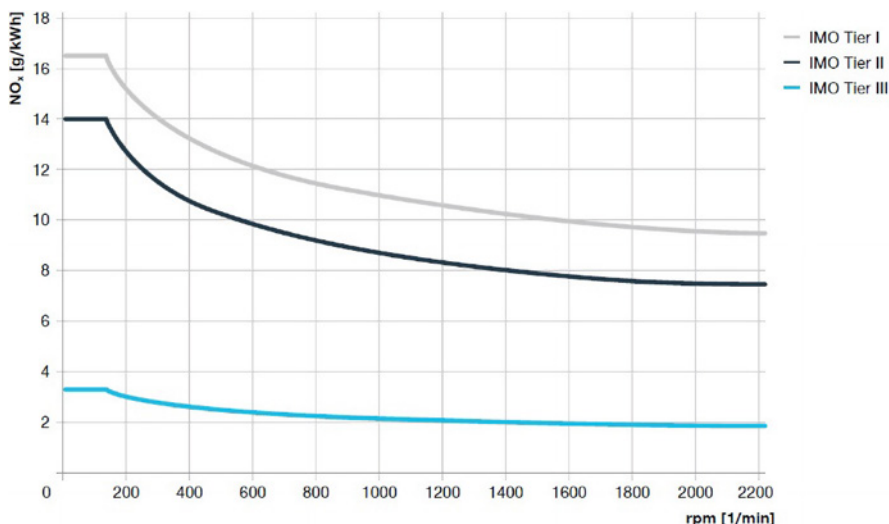


Fig. 2. Curvas NO<sub>x</sub> límite en función de niveles Tier. (Fuente: MAN).

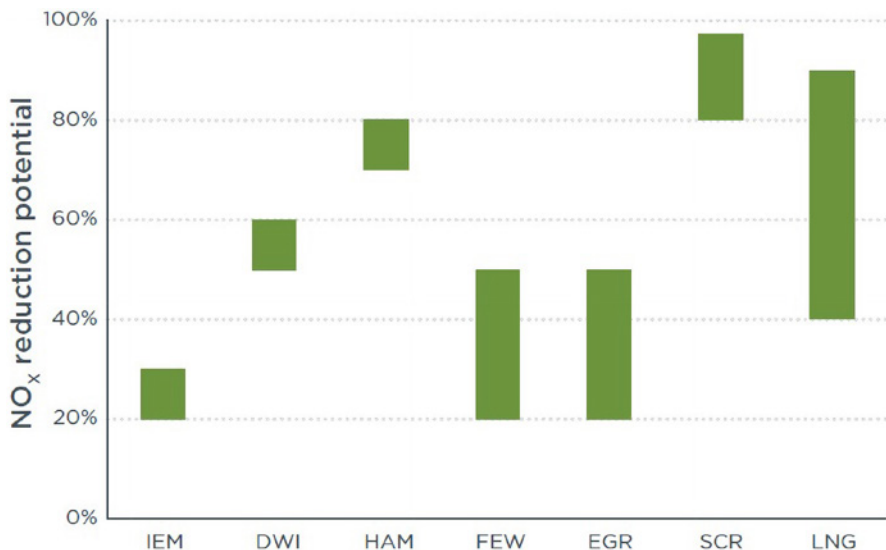


Fig. 4. Motor de dos tiempos con SCR. (Fuente: MAN).

### Particularidades de las emisiones NO<sub>x</sub>

Los precursores de formación de NO<sub>x</sub> durante el proceso de combustión son el nitrógeno (N<sub>2</sub>) y el oxígeno (O<sub>2</sub>), los cuales comprenden el 99 % del aire de admisión del motor. El O<sub>2</sub> se consume durante el proceso de combustión, siendo la cantidad de exceso de O<sub>2</sub> función de la relación aire/combustible bajo la cual el motor está funcionando.

El nitrógeno permanece en gran parte sin reaccionar durante el proceso de combustión, a excepción de un pequeño porcentaje que se oxidará para formar varios óxidos de nitrógeno, siendo estos el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

prescripciones obligatorias respecto de las Reglas 13.8 y 5.3.2 del Anexo VI MARPOL y del NTC (NO<sub>x</sub> Technical Code) de 2008 (Resolución MEPC.177(58), enmendada por la Resolución MEPC.251.(66) en el caso de los niveles de misiones Tier II y III [2] [3].

En cuanto a la posibilidad de certificar un motor diésel marino según el nivel Tier I, esta ha estado vigente hasta el 1 de enero de 2011. A partir de esa fecha, todos los motores diésel marinos se certifican según Tier II y III en función de si las zonas de navegación son zonas ECA o no.

En la siguiente figura se resume los límites globales (Tier I y II) y para zonas ECA (Tier III) de emisiones NO<sub>x</sub>.

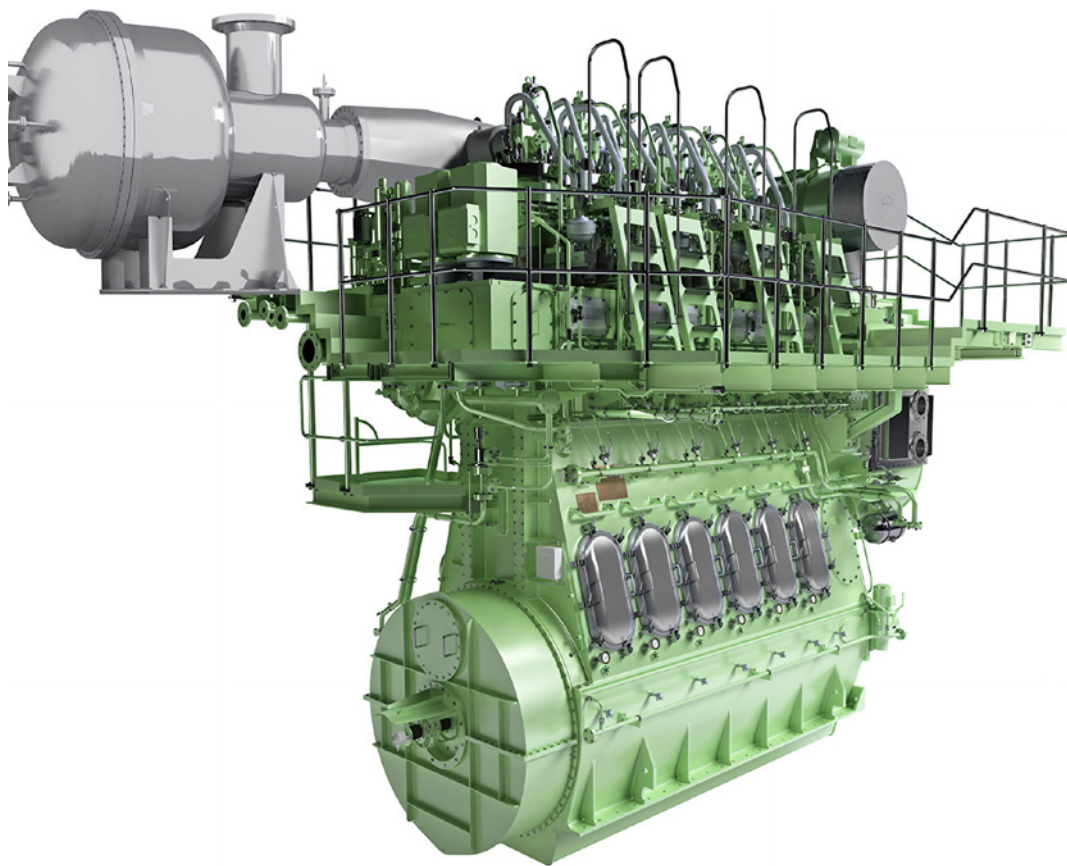


Fig. 3. Reducción de emisiones NO<sub>x</sub>. (Fuente: Azzara, et al., 2014).

<b>Basic Reactions</b>	$4 \text{ NO} + 4 \text{ NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$
	$6 \text{ NO}_2 + 8 \text{ NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 12 \text{ H}_2\text{O}$
<b>Undesired Parallel Reactions</b>	$\text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{ O}_2 \rightarrow \text{SO}_3$
	$\text{NH}_3 + \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_4\text{HSO}_4$

Tabla 1 Reacciones básicas y reacciones paralelas no deseadas



La formación de  $\text{NO}_x$  es función del tiempo en el que el  $\text{N}_2$  y el exceso de  $\text{O}_2$  están expuestos a las altas temperaturas asociadas a la combustión del motor diésel, de modo que, cuanto mayor sea la temperatura de combustión (por ejemplo, alta presión máxima, alta relación de compresión, alta tasa de suministro de combustible, etc.), mayor será la cantidad de formación de  $\text{NO}_x$ .

El rendimiento de un motor diésel depende de las presiones y temperaturas alcanzadas durante el ciclo de combustión, de modo que conforme aumentan estas se incrementa el rendimiento del ciclo.

Por lo tanto, lo que resulta ventajoso desde el punto de vista del rendimiento térmico del motor se convierte a su vez en un problema desde el punto de vista medioambiental.

Si bien los niveles de emisiones *Tier I* y *II* son alcanzables mediante procesos de optimización de la combustión, para alcanzar el nivel *Tier III* (preciso en navegación por zonas ECA), se necesita de la aplicación de otros tipos de tecnologías de control de emisiones.

#### Tecnología SCR para la reducción de emisiones $\text{NO}_x$

Por lo general, los motores diésel dedicados tanto a propulsión como generación eléctrica en buques de guerra trabajan con niveles de emisiones *Tier II* (global). En este sentido, resulta difícil encontrar buques de guerra *Tier III*, a excepción de los que utilizan turbinas de gas marinas (en este caso quedan fuera del alcance del Anexo VI MARPOL).

Con el fin de actualizar el nivel de emisiones de los buques de guerra desde *Tier II* a *Tier III* (obligatorio en zonas ECA), se debe hacer uso de determinadas tecnologías. En este sentido, la tecnología más utilizada en la actualidad es la tecnología SCR (*Selective Catalytic Reduction*) siendo, además, la única capaz de lograr el cumplimiento de emisiones *Tier III*, independientemente del motor en el que se aplique [4].

La tecnología SCR funciona mediante la combinación de

amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), normalmente a partir de una solución acuosa de urea, con un catalizador montado sobre un monolito cerámico, para reducir el  $\text{NO}_x$  formando nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) [5]:

Como la temperatura de los gases de exhaustación en motores diésel varía de 300 a 400 °C, resulta un rango de temperaturas suficiente para obtener la energía necesaria que permita la reacción SCR.

En cuanto a la normativa IMO en vigor relacionada con el uso de sistemas SCR a bordo, estos deben mostrar su conformidad con la Resolución MEPC.291(71) de 7 de julio de 2017, enmendada a su vez por la Resolución MEPC.313(74) de 17 de mayo de 2019 [6] [7].

#### Conclusiones

Dentro de la normativa IMO, el Convenio MARPOL se ocupa de preservar el medio ambiente marino mediante la prevención de la contaminación. En el caso particular de los buques de guerra, el cumplimiento del convenio MARPOL es voluntario.

El control de emisiones  $\text{NO}_x$  en buques de guerra afecta únicamente a la propulsión o generación eléctrica a partir de motores diésel marinos.

En cuanto al control de emisiones  $\text{NO}_x$  en motores diésel marinos, las enmiendas al Anexo VI incluyen una estructura en niveles de emisiones *Tier* (desde I a III, de menor a mayor reducción).

Los motores diésel en buques de guerra trabajan, por lo general, con niveles de emisiones *Tier II* (global), por lo que precisarán de otras tecnologías para alcanzar niveles de emisiones *Tier III* (preceptivo en navegación por zonas ECA).

La tecnología más utilizada para el control de emisiones  $\text{NO}_x$  es la tecnología SCR, con un nivel de reducción de más del 90 %, siendo la única capaz de lograr el cumplimiento de emisiones *Tier III*, independientemente del motor en el que se aplique. La tecnología SCR se muestra totalmente adaptable a las particularidades del buque de guerra, tanto desde el punto de vista de la propulsión como de la generación eléctrica.

#### Referencias

- [1] International Maritime Organization (IMO) (2021). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78), Consolidated Edition 2021*, London, ISBN: 9789280131413.
- [2] Marine Environment Protection Committee (MEPC). *Amendments to the Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines – NOx Technical Code, Res. MEPC.177(58)*, International Maritime Organization (IMO), London, United Kingdom.
- [3] Marine Environment Protection Committee (MEPC). *Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto, Res. MEPC.251(66)*, International Maritime Organization (IMO), London, United Kingdom.
- [4] Azzara, A., Rutherford, D., Wang, H. (2014). *Feasibility of IMO Annex VI Tier III implementation using Selective Catalytic Reduction, Working Paper 2014-4*, International Council on Clean Transportation (ICCT).
- [5] Association for Catalytic Control of Ship Emissions to Air (IACCSEA) (2019). *A catalyst for Clean Shipping*, London, United Kingdom, <https://www.iaccsea.com/marine-scr/>
- [6] Marine Environment Protection Committee (MEPC) (2017). *Guidelines Addressing Additional Aspects of the NOx Technical Code 2008 with regard to Particular Requirements related to Marine Diesel Engines Fitted with Selective Catalytic Reduction (SCR) Systems, Res. MEPC.291(71)*, International Maritime Organization (IMO), London, United Kingdom.
- [7] Marine Environment Protection Committee (MEPC) (2019a). *Amendments to the Guidelines Addressing Additional Aspects of the NOx Technical Code 2008 with regard to Particular Requirements related to Marine Diesel Engines Fitted with Selective Catalytic Reduction (SCR) Systems, Res. MEPC.291(71)*, International Maritime Organization (IMO), London, United Kingdom.

# Tecnologías emergentes

## Baterías estructurales

**Autores:** D. Luis Miguel Requejo, OT MAT, D. Carlos Garrido, OT ENEP, SDG PLATIN

**Palabras clave:** baterías, materiales, energía, peso.

**Líneas I+D+i ETID relacionadas:** 3.2.1; 3.3.5; 5.1.3; 6.2.3; 7.2.1.

### Introducción

El objetivo de sustituir los motores de combustión de las plataformas aéreas, navales y terrestres por sistemas eléctricos puede estar cada vez más cerca de poder cumplirse gracias a la evolución de la tecnología de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica. Hay que tener en cuenta que uno de los principales inconvenientes para la integración de baterías en las plataformas eléctricas actuales es la cuestión del peso, ya que incrementar el número de baterías para lograr una mayor autonomía supone lastrear a las plataformas con muchos kilos

extra, sin que aporten ningún tipo de mejora en lo que se refiere a prestaciones mecánicas.

Una solución interesante a esta problemática sería la implementación de las que se denominan como baterías estructurales. Una batería estructural, por concepto, es aquella que funciona como fuente de energía y como elemento integrante de la estructura de un sistema, como por ejemplo, siendo parte de la carrocería de un vehículo. Desde un punto de vista técnico, las baterías estructurales serían lo que se conocen como materiales o estructuras multifuncionales, ya que son capaces de actuar como un sistema de almacenamiento de energía, al mismo tiempo que poseen la suficiente integridad mecánica como para ser un elemento resistente a las diferentes tensiones mecánicas a las que pueda ser sometido.

Las baterías estructurales ayudarían a aligerar una plataforma y serían útiles en aplicaciones de transporte por su potencial para

mejorar la eficiencia del sistema. A efectos prácticos, el peso de la batería como tal desaparecería pasando a ser un elemento integrante de la misma estructura de la plataforma, por lo que se podría reducir considerablemente el peso de la misma. Un aspecto especialmente beneficioso de este tipo de solución, en especial al tratar de plataformas militares, sería la posibilidad de incrementar la carga de pago (cuantificada tanto en peso como en volumen disponible).

### Tipos de baterías estructurales

Se pueden distinguir distintos tipos de baterías estructurales en función de su grado de integración estructural. Partiendo de un nivel de integración 0 en referencia a las baterías convencionales, encontramos los sistemas desacoplados en los que están las baterías tipo I, que son celdas integradas en un componente estructural determinado y las tipo II, que son celdas formadas por láminas delgadas integradas en un componente estructural. Por otra

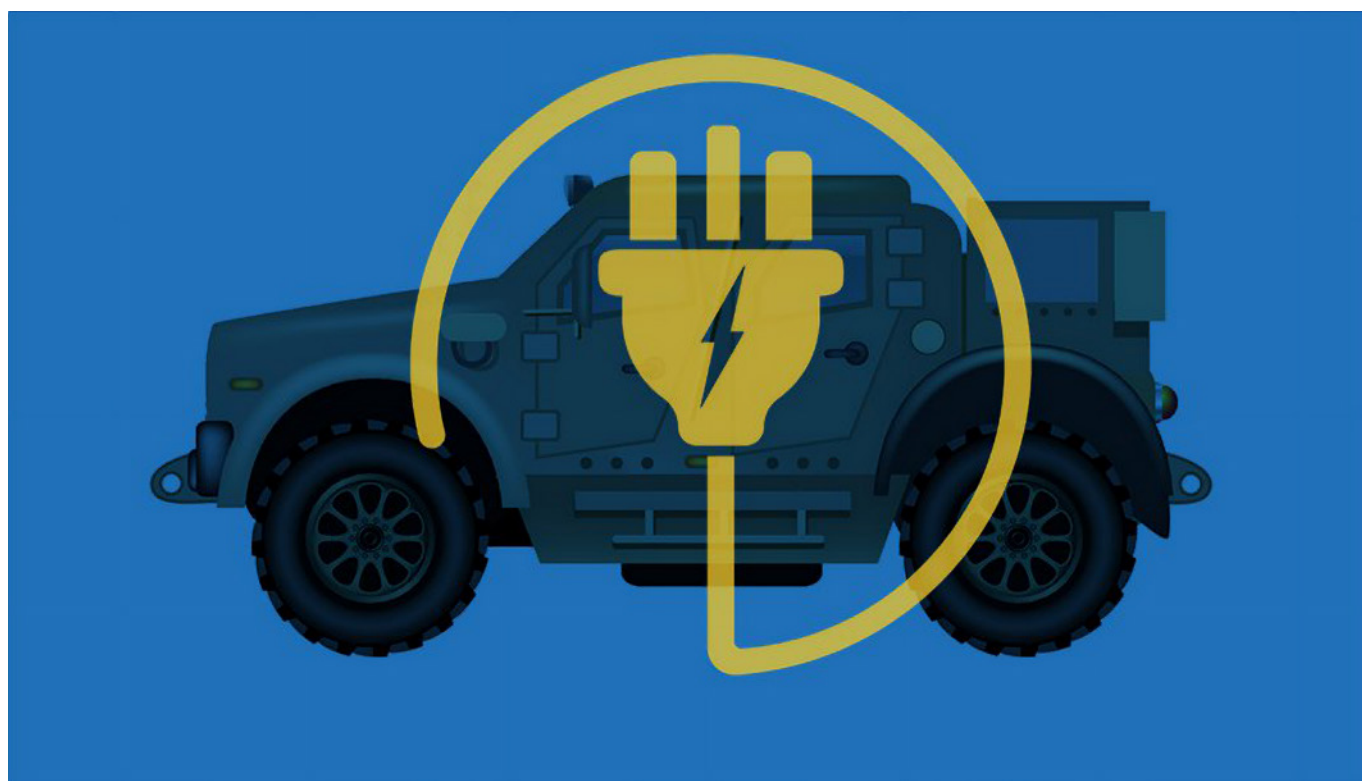


Fig. 1. Los ejércitos de los países más desarrollados ya trabajan en el desarrollo de tecnologías de electrificación para sus plataformas. (Fuente: <https://www.nationaldefensemagazine.org/>).

parte, estarían los sistemas acoplados o totalmente integrados en los que el propio elemento estructural (que son las baterías estructurales tipo III) o el propio material (que son las de tipo IV) funcionan como una unidad de almacenamiento de energía.

El presente artículo se centra en los sistemas acoplados (baterías estructurales tipo III y tipo IV) al considerar que son los que realmente actúan como materiales multifuncionales, siendo la solución que aportaría más ventajas en cuanto a reducción de peso, mientras que las baterías estructurales tipo I y tipo II lo hacen más como estructuras con distintas funcionalidades.

por elementos que aporten un incremento en las prestaciones mecánicas.

Se pueden encontrar sustitutos prometedores para la mayoría de los componentes, a excepción del material del cátodo. Por lo tanto, el cátodo generalmente se prepara a partir de electrodos laminados convencionales o fibras de carbono funcionales con materiales activos como  $\text{LiFePO}_4$ . Las fibras de carbono se pueden utilizar para el ánodo, ya que muestran un rendimiento similar al de los materiales gráficos convencionales. El separador se suele reemplazar con uno de fibra de vidrio. El electrolito es uno de los componentes más cruciales para estas baterías estructurales.

una estructura compuesta (electrodos estructurales laminados). En un diseño tipo *sándwich*, las baterías de iones de litio se incrustan formando el material que conforma el núcleo y se unen entre dos láminas frontales delgadas y resistentes. Las cargas mecánicas en el plano y las de flexión las absorben las láminas frontales, mientras que el núcleo absorbe las cargas transversales de corte y compresión, además de almacenar la energía eléctrica.

Por otra parte, en los electrodos estructurales laminados, el material del electrodo posee una función intrínseca de soporte de carga y almacenamiento de energía. El laminado

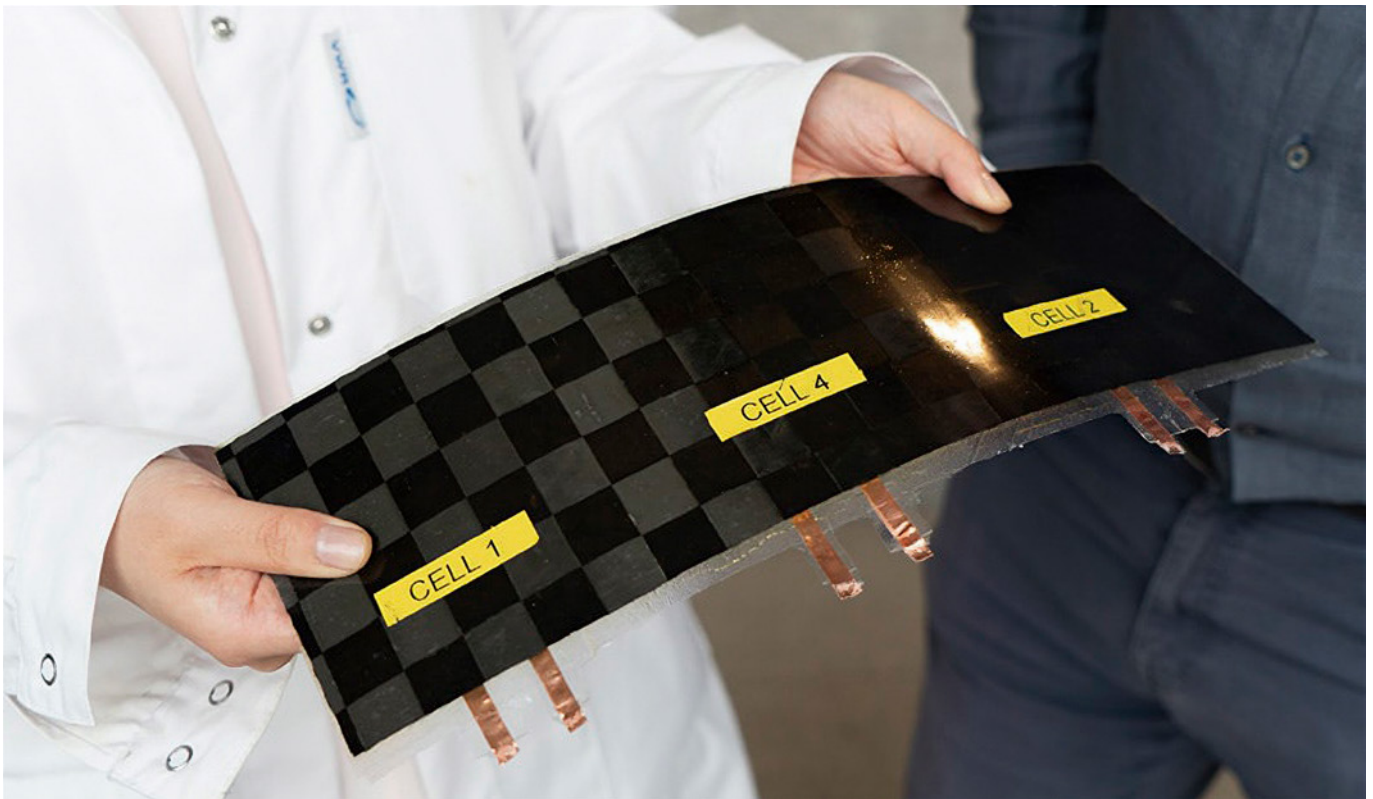


Fig. 2. Batería estructural desarrollada por la Universidad de Chalmers. (Fuente: <https://www.chalmers.se/>).

### Baterías estructurales tipo III

Representan el primer paso hacia una verdadera multifuncionalidad. La idea básica detrás de este enfoque es sustituir tantos elementos como sea posible de una celda de batería convencional, especialmente los pasivos (es decir, la carcasa, los colectores de corriente, el separador y el electrolito),

Todavía se emplean electrolitos líquidos de carbonato convencionales debido a la falta de electrolitos alternativos altamente conductores con buenas propiedades mecánicas y estructurales.

### Baterías estructurales tipo IV

Este tipo de baterías se integran en estructuras tipo *sándwich* o en

está hecho de la combinación de un electrodo negativo, un separador y un electrodo positivo, embebidos en un electrolito estructural y conductor iónico.

Una batería estructural en fase de estudio y desarrollo se basa en un concepto de polímero reforzado con fibra de carbono. Aquí, las fibras de carbono sirven simul-

## Tecnologías emergentes

táneamente como electrodos y refuerzo estructural. La lámina está compuesta de fibras de carbono que están incrustadas en un material de matriz polimérica, que permite la transferencia de carga entre las fibras, pero también el transporte de iones de litio.

### En la actualidad...

Hasta hace solo unos pocos años, los intentos que ha habido para fabricar baterías estructurales han dado como resultado dispositivos que ofrecían solo buenas propiedades mecánicas o solo buenas propiedades eléctricas. Se han ido produciendo mejoras, pero la realidad es que las baterías estructurales por el momento no pueden almacenar tanta energía como las baterías convencionales de iones de litio.

Recientemente, los avances de un grupo de investigadores de la Universidad Chalmers de Tecnología, en Suecia, podrían abrir una línea de investigación para la obtención de baterías que reúnan ambos tipos

de propiedades: han diseñado el primer prototipo de batería estructural hecha de materiales ligeros, cuyo rendimiento es diez veces mayor que el de otras baterías anteriores.

Contiene fibra de carbono que sirve simultáneamente de electrodo, conductor y material de soporte estructural de la plataforma. La fibra de carbono actúa como electrodo negativo y una lámina de aluminio recubierta de fosfato de hierro y litio como electrodo positivo. La fibra de carbono almacena la energía, pero también conduce los electrones eliminando la necesidad de usar otros conductores como el cobre o la plata, lo que reduce aún más el peso. Los dos materiales de los electrodos están separados por un tejido de fibra de vidrio en una matriz de electrolito estructural que sirve para transportar los iones de litio entre los dos electrodos de la batería, al mismo tiempo que transfiere las cargas mecánicas entre las fibras de carbono y otras partes.

A pesar del enorme salto tecnológico respecto a soluciones similares anteriores, este sistema tiene algunas limitaciones. La principal es que la densidad energética es todavía algo baja, 24 Wh/kg, lo que supone aproximadamente entre un diez y un veinte por ciento de capacidad en comparación con las baterías de iones de litio equivalentes disponibles actualmente en el mercado. En cuanto a las prestaciones mecánicas, con una rigidez de 25 GPa, la batería estructural es competitiva con muchos otros materiales de fabricación de uso habitual, aunque aún es reducida en comparación a la de los materiales compuestos habitualmente empleados en el sector aeronáutico (entre 70 y 150 GPa).

En cualquier caso, este primer prototipo sería la base para diseñar otros que ofrezcan una mayor autonomía y sean más eficientes y podría suponer un paso muy importante hacia la implantación de este tipo de baterías. De hecho, actualmente, se trabaja en conseguir una

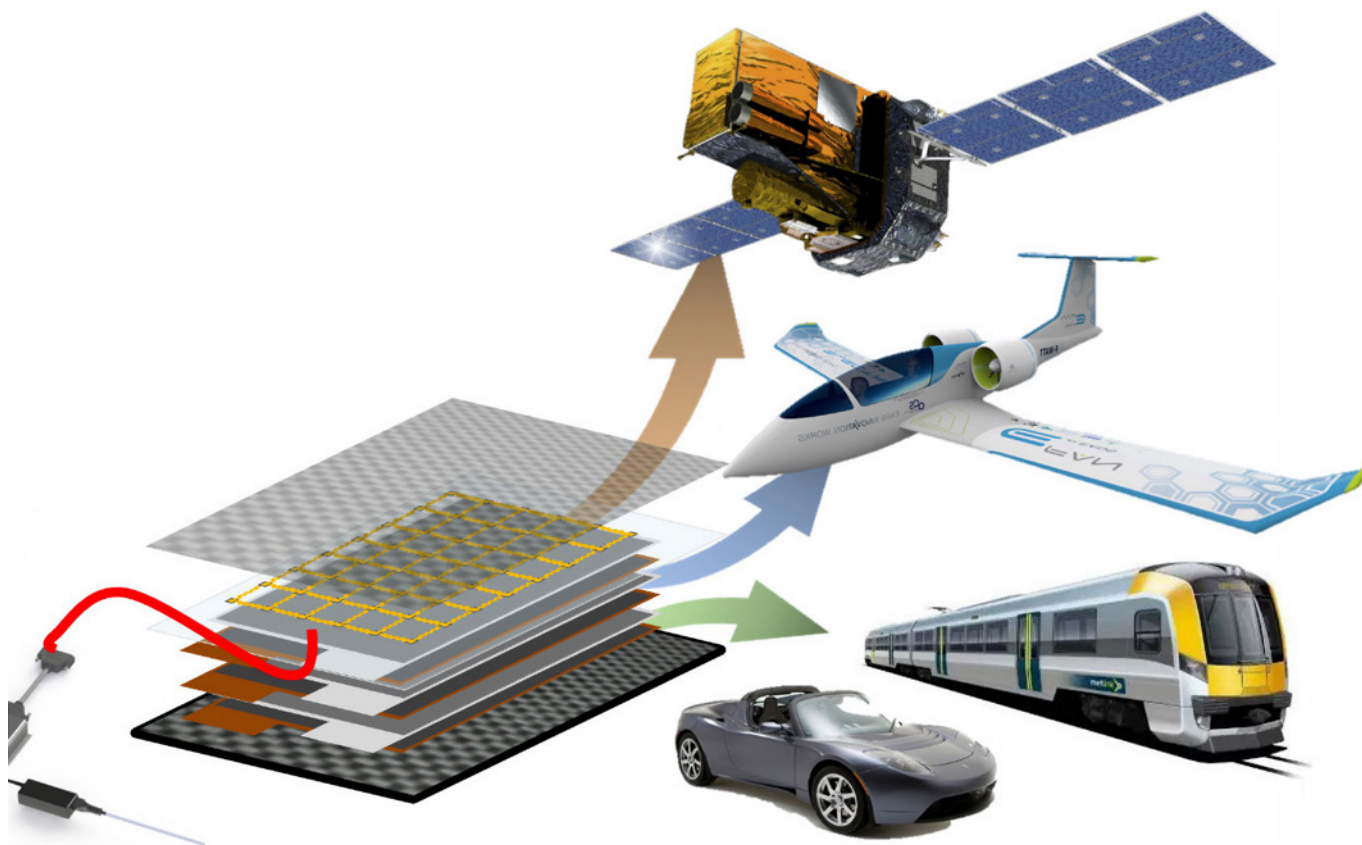


Fig. 3. Las baterías estructurales de material compuesto no pueden almacenar tanta energía como las baterías de iones de litio, pero tienen varias características que las hacen muy atractivas para su uso en vehículos y otras aplicaciones. (Fuente: <https://aviationweek.com/>).

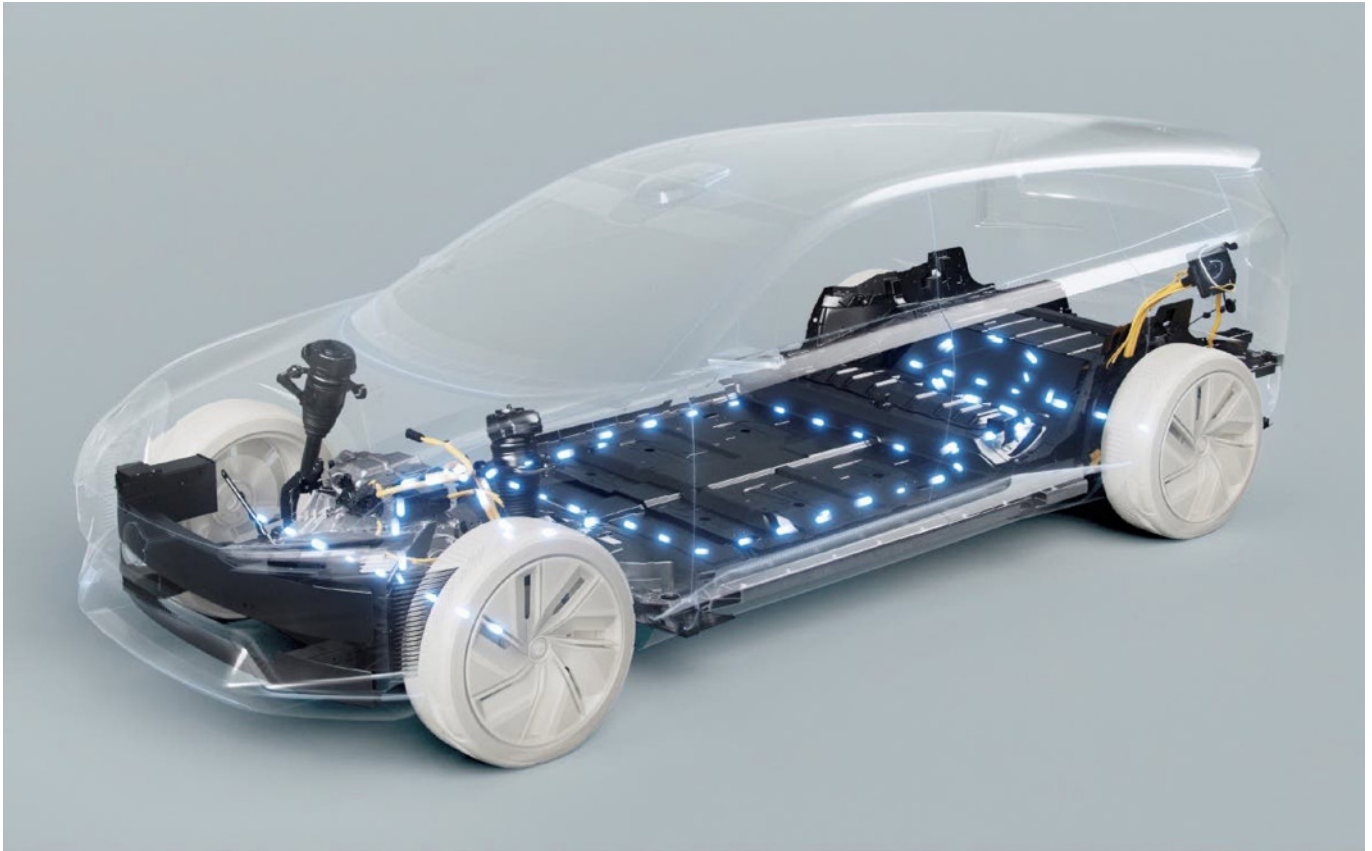


Fig. 4. Numerosas marcas de coches avanzan en el desarrollo de baterías cada vez mejor integradas en el vehículo. (Fuente: <https://autotech.news/>).

mejora del rendimiento de la batería estructural tratando de llegar a una densidad que rondará los 75 Wh/kg, con una rigidez de 75 GPa. Es necesaria, por tanto, la búsqueda de nuevos materiales para lograr estos objetivos, además de lograr reducir aún más el peso y teniendo en cuenta los conceptos de integración de la estructura para lograr optimizar sus distintas funcionalidades.

Existen otros aspectos sobre los que hay que trabajar de cara a una futura implantación de las baterías estructurales en sectores como el de la automoción o el aeronáutico. Uno de ellos radica en el presumible incremento de costes para el mantenimiento o las reparaciones que habría que llevar a cabo sobre este tipo de materiales. Se está estudiando la posibilidad de optar por sistemas modulares que permitan que la plataforma siga funcionando aunque alguna de las baterías estructurales dejara de funcionar y, además, para facilitar una posible reparación o sustitución rápida. Además, como son elementos críticos

para el funcionamiento de cualquier tipo de plataforma, habría que sopesar la posibilidad de llevar a cabo la integración adicional de un sistema de sensorización para el control de su funcionamiento y predicción de fallos.

Otro punto importante es la gestión térmica de la batería estructural, ya que hay que disipar el calor generado como consecuencia de los procesos electroquímicos de generación de energía. Este calor es especialmente importante en plataformas de tipo militar ya que podría tener aspectos negativos en las prestaciones mecánicas de la propia estructura y otros relacionados con un incremento de la firma IR.

### Conclusiones

El desarrollo de baterías estructurales supone un avance muy importante de cara a la electrificación de todo tipo de plataformas, tanto civiles como militares. Se entiende que la incorporación de esta tecnología será progresiva y es de esperar que uno de los

primeros sistemas que puedan portar este tipo de baterías en el ámbito militar puedan ser drones u otros sistemas de pequeño tamaño, con unos requisitos de densidad energética no tan exigentes como el que puedan tener las plataformas de mayor tamaño.

El sector civil se encuentra muy activo en este sentido y son varias las marcas automovilísticas que colaboran en proyectos de I+D para el desarrollo de estas baterías y poder incorporarlas en un futuro no muy lejano. Se trata de una tecnología de claro carácter dual que permitirá, tanto al sector civil como militar, aprovecharse de los avances que se vayan desarrollando en ambos sectores, aunque, de cara a su incorporación a los sistemas militares habrá que tener en cuenta aspectos más particulares como es el de la gestión del calor generado por estos materiales, su robustez, mantenimiento y su potencial de reparación, o la monitorización de su buen funcionamiento a lo largo de toda su vida útil.

# En profundidad

## El proyecto MUSTANG. Un paso más hacia la independencia europea del nitruro de galio

**Autores:** D. Alfonso Ferreras Estrada, D. Álvaro Prieto Poyatos, D. Eduardo Oreja Gígorro, D. Javier Montero Paz, INDRA.

Palabras clave: nitruro de galio, *Monolithic Microwave Integrated Circuits*, epitaxia, carburo de silicio, *foundry*, encapsulado.

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 2.1.1.

### Introducción

El nitruro de galio (GaN) es considerado una de las tecnologías clave para la defensa europea, ya que permite sustituir los antiguos tubos de onda progresiva por componentes más compactos, más potentes y que alcanzan mayores frecuencias. Con el objetivo de profundizar en el desarrollo de esta tecnología, el proyecto MUSTANG (GaN *Technology with UMS GH15 Process*) busca dar un paso más en el empleo del nitruro de galio de fabricación europea. El fin último del desarrollo de este tipo de tecnología es obtener una variedad de componentes basados en nitruro de galio, denominados MMICs (*Monolithic Microwave Integrated Circuits*), para que puedan ser integrados en los sistemas europeos de diferentes sectores como la defensa o las comunicaciones.

Históricamente, la mayoría de los MMIC (también denominados monolíticos), han sido diseñados y fabricados utilizando tecnología no europea, lo que conlleva la necesidad de importarlos. Es por eso que, a lo largo de los últimos años, en Europa se han llevado a cabo diversos proyectos relacionados con el desarrollo del nitruro de galio para así poder cubrir la necesidad de tener una cadena de suministro europea independiente. Algunos de estos proyectos son, entre otros, KORRIGAN, MANGA, MAGNUS

o EUGANIC. Durante el desarrollo de todos estos proyectos, se ha logrado, entre otros objetivos, obtener una gran variedad de componentes de fabricación europea que pueden integrarse en los distintos sistemas de radiofrecuencia.

Dentro de la tecnología del nitruro de galio existen distintos procesos de fabricación en función de las especificaciones que se quieran cumplir, como son la banda de frecuencia o la potencia requerida. Cada proceso de fabricación tiene su desarrollo correspondiente y viene definido por los fabricantes (o *foundries* en terminología anglosajona).

### Proceso de fabricación

Independientemente del proceso de fabricación seleccionado los pasos a seguir son los siguientes:

1. Se comienza con la definición del sustrato de fabricación. Si bien existen diferentes opciones, como puedan ser utilizar silicio, zafiro o diamante, a día de hoy lo más utilizado por la industria es el carburo de silicio (SiC). La razón por la que este material es el más empleado se debe a que tiene una mayor conductividad térmica que el silicio y un coste asequible en comparación con el diamante. Esto permite que el calor generado por los componentes se disipe de una forma más eficiente, lo cual es especialmente útil en monolíticos que deben disipar una gran cantidad de calor como pueden ser los amplificadores de alta potencia.
2. Durante una segunda fase, se deben unir el carburo de silicio y el nitruro de galio mediante un proceso de cristalización. A esto se le conoce como proceso de epitaxia. Generalmente, esto es llevado a cabo por empresas no europeas. No obstante, se plantean iniciativas que buscan desarrollar un proceso de epitaxia realizado dentro de la Unión Europea.
3. Una vez seleccionado el sustrato y definido el proceso de epitaxia, el siguiente paso es definir los propios elementos que formaran

parte de los circuitos (transistores, diodos, condensadores, inductancias, vías al plano de masa, etc.). Este proceso, normalmente, lo desarrollan los propios fabricantes. Los componentes se analizan, se modelan y, posteriormente, se integran dentro de una librería de simulación, denominada dentro de la industria como *process design kit* (PDK). Los transistores son los elementos más importantes utilizados en el diseño de monolíticos, por lo que, un buen modelado de estos es la base para obtener un proceso adecuadamente caracterizado.

4. Los diseños de los monolíticos se realizan empleando estas librerías de simulación y un *software* de simulación electromagnética. Una vez que se ha diseñado el circuito, la *foundry*, fabrica los monolíticos sobre unas superficies denominadas obleas, compuestas del material definido como sustrato.
5. En el último paso del proceso de fabricación, la *foundry*, comprueba que los componentes funcionan adecuadamente y se realiza una primera caracterización de los MMIC.

Cuantos más diseños se realicen utilizando un proceso de fabricación determinado, mejores modelados de los componentes y mayor fiabilidad se obtiene. Por ello, si bien es cierto que el modelado de componentes es tarea de los fabricantes, este tipo de proyectos facilita la mejora en la precisión del modelado y caracterización de los componentes. Además, se pueden llegar a añadir nuevos componentes a las librerías de simulación.

Para distinguir los distintos procesos de fabricación existentes, las *foundries* tienden a denominarlos en función de la longitud del terminal de puerta de los transistores. En el caso de la *foundry* europea UMS, existen distintos procesos de fabricación como pueden ser GH25, GH15 o GH10, que denotan longitudes de puerta de 250  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$  respectivamente.

En las últimas décadas, se han llevado a cabo varias iniciativas

relacionadas con el nitruro de galio. Durante estos proyectos, uno de los objetivos centrales ha sido el desarrollo de los procesos de fabricación de la *foundry* UMS para así conseguir modelos más fiables y maduros. De esta forma, el proceso de diseño sobre *software* tiene un resultado mucho más preciso respecto a cuándo se fabrica. Por ejemplo, los proyectos MANGA y MAGNUS se desarrollaron bajo el proceso GH25 de UMS. El proyecto MANGA se centraba en el desarrollo del proceso de epitaxia y selección de sustrato mientras que el proyecto MAGNUS se enfocaba en la parte de diseño de monolíticos y la mejora del modelado de los componentes. El proceso GH25 está focalizado en el desarrollo de componentes desde banda S hasta banda Ku. Por otro lado, los proyectos EUGANIC y MUSTANG se han basado en el proceso GH15 de UMS. Siguiendo la misma pauta que en el caso anterior,

el proyecto EUGANIC se centró en el desarrollo del proceso de epitaxia y selección de sustrato mientras que MUSTANG ha tenido como objetivo el desarrollo de monolíticos. Para este proceso, las frecuencias óptimas van desde banda C hasta banda Ka.

### El proyecto MUSTANG

MUSTANG (GaN Technology with UMS GH15 process) es un proyecto de tipo cat. B de la Agencia Europea de Defensa (EDA) que nace dentro del grupo de trabajo de Tecnologías, Componentes y Materiales (*TCM CapTech*) y cuenta con el apoyo de los ministerios de defensa de los países participantes. El principal objetivo de MUSTANG es el desarrollo de circuitos integrados monolíticos bajo el proceso GH15 en la *foundry* UMS.

El consorcio MUSTANG está compuesto por 5 empresas europeas

de distintos países con el objetivo de asegurar el suministro de monolíticos, para aplicación en sistemas de defensa, a través de una cadena de suministro plenamente europea. El grupo está liderado por la compañía sueca Saab y cuenta con la participación de Hensoldt (Alemania), Indra (España), Thales SIX (Francia) y Thales TDMS (Francia).

Como se ha comentado anteriormente, el fabricante que se ha seleccionado, en coherencia con el proyecto que le precede (EUGANIC), es UMS y se ha realizado bajo la tecnología GH15, permitiendo así realizar diseños de monolíticos hasta banda Ka.

El proyecto ha tenido una duración de 36 meses, un presupuesto cercano a 12 millones de euros en total y ha conestado de dos iteraciones de fabricación. En cada una de las iteraciones se ha seguido el mismo

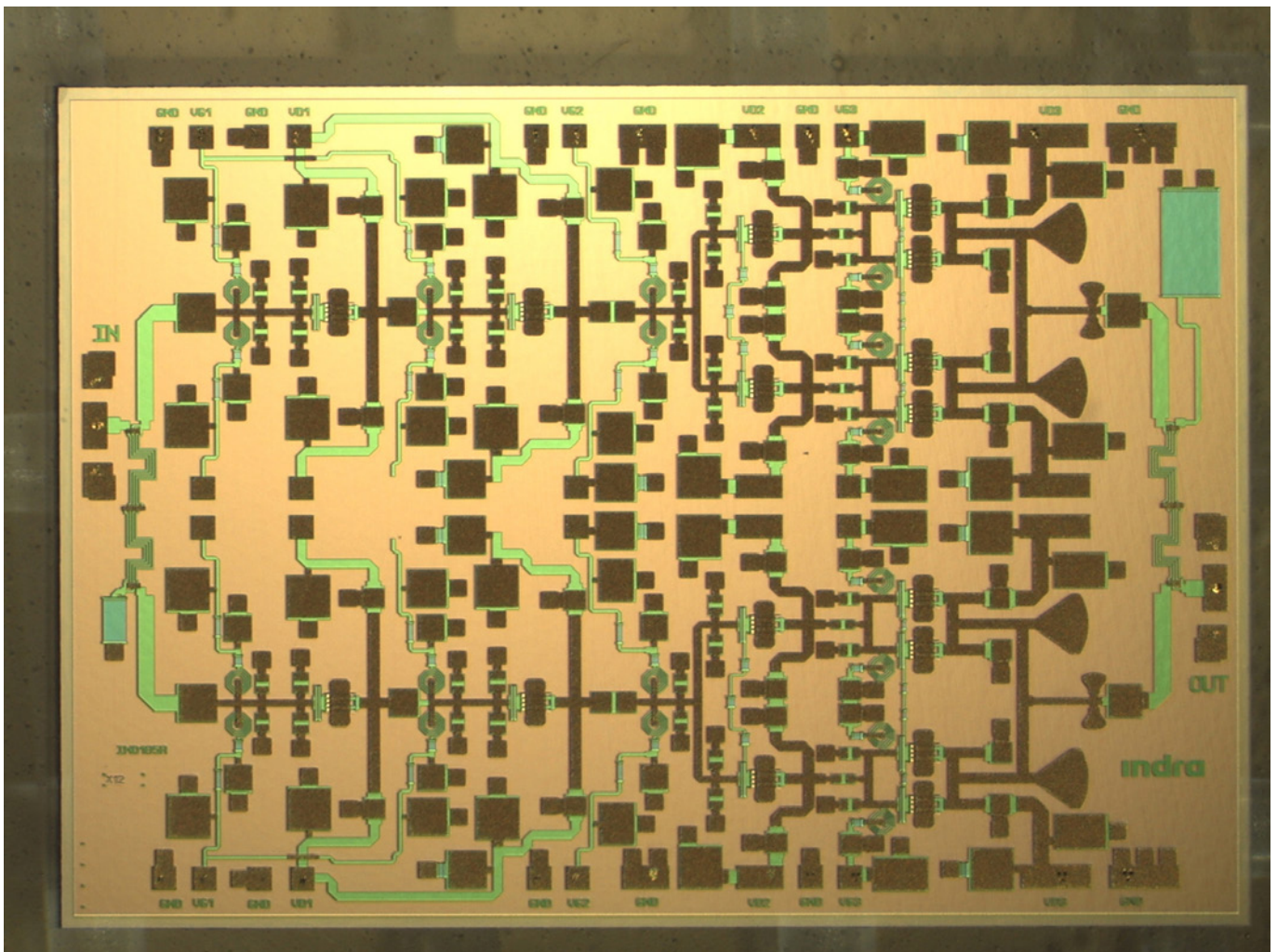


Fig. 1. Amplificador de alta potencia en banda Ka para sistemas ECM. (Fuente: INDRA).

## En profundidad

procedimiento: se comienza con una etapa de diseño, después, la *foundry* (UMS) fabrica las obleas donde se encuentran los MMIC y, finalmente, se analizan los resultados de las medidas realizadas. El hecho de realizar dos iteraciones ha permitido a los miembros del consorcio la posibilidad de mejorar los diseños tras la primera iteración, teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la mejora del proceso de fabricación y un mejor modelado de los elementos del PDK que conforman la librería de simulación. Además, durante la segunda iteración también se han podido abordar nuevos diseños en distintas bandas de frecuencia y con diversas funcionalidades.

A nivel industrial, el objetivo fundamental del proyecto ha sido desarrollar una gran variedad de monolíticos con funcionalidades diferentes y de fabricación europea que se podrán integrar tanto en sistemas de radiofrecuencia actuales con MMIC no europeos, como de cara a futuros sistemas que se diseñen. Como objetivo añadido para esta acción, está aumentar la aceptación y el uso del proceso GH15 consiguiendo así una madurez superior del proceso y una mayor fiabilidad de los diseños. Para cumplir con estos objetivos se han desarrollado distintos tipos de componentes hasta la banda Ka como amplificadores de alta potencia (HPA), amplificadores de media potencia (MPA), amplificadores de bajo ruido (LNA), *chips* transmisor/receptor (TR) y conmutadores (*switches* en terminología anglosajona) en todas las bandas de frecuencia del

proceso GH15. Durante las dos iteraciones, entre todos los miembros del consorcio, se han realizado un total de 58 MMICs distintos.

### Indra dentro del proyecto MUSTANG

Por parte de España, Indra, en cooperación con la Universidad Politécnica de Madrid, ha desarrollado un total de 12 monolíticos (6 en cada

iteración) en distintas bandas de frecuencia y con diversas funcionalidades con el fin de cubrir ciertos objetivos estratégicos a nivel de los sistemas de defensa.

Además de MUSTANG, Indra también ha trabajado anteriormente en otros proyectos relacionados con la tecnología del nitruro de galio, como KORRIGAN o ApiGaN.

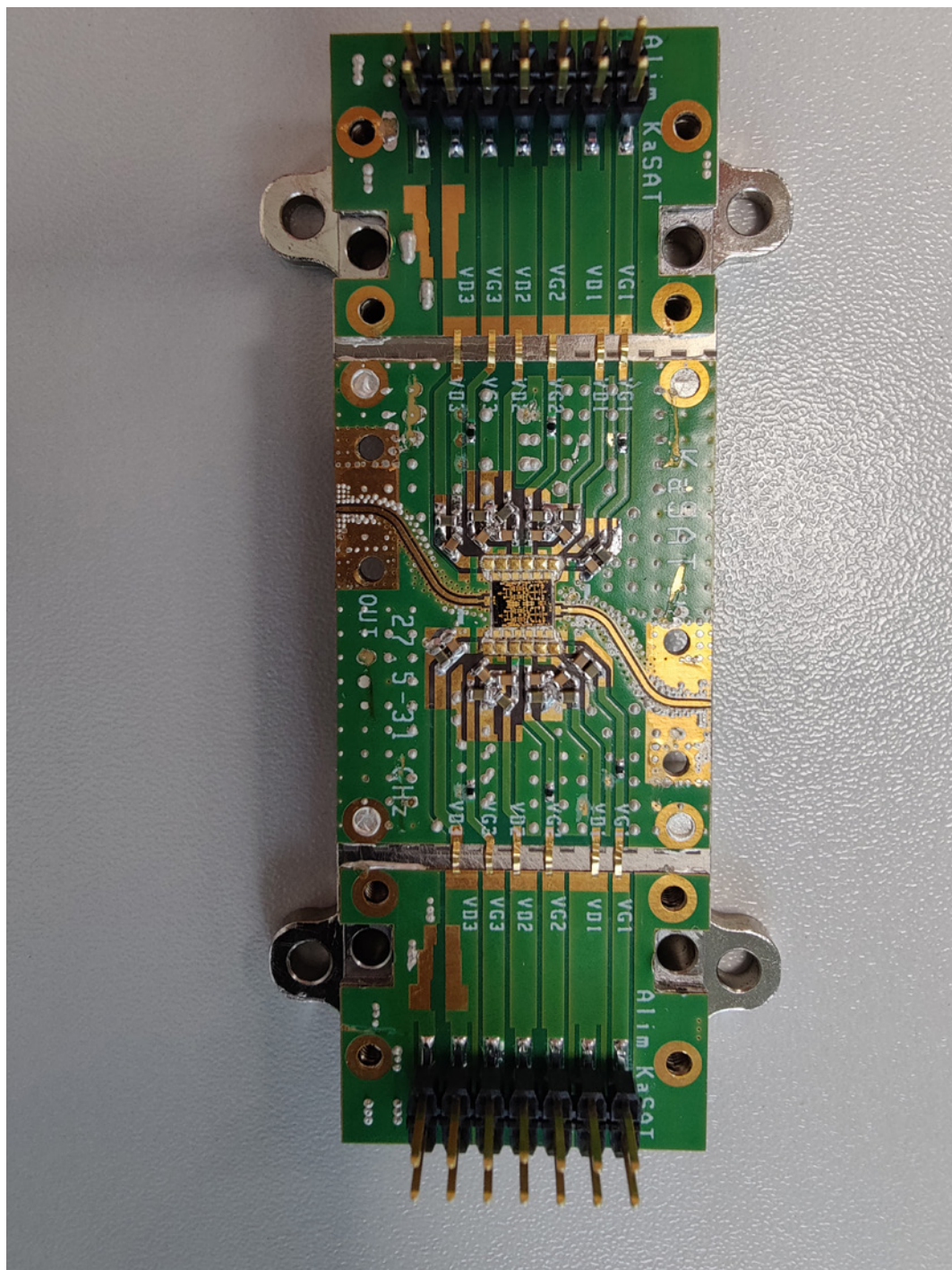


Fig. 2. Estructura de montaje realizada por INDRA para las medidas *on jig* de los monolíticos. (Fuente: INDRA)



Concretamente, ApiGaN, fue un proyecto realizado por Indra, con el apoyo del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España, para diseñar amplificadores en banda EJ utilizando el proceso GH25 de UMS.

El objetivo fundamental de Indra dentro del proyecto MUSTANG ha sido el desarrollo de componentes a medida o personalizados (*ad-hoc*) para sus sistemas obteniendo soluciones más flexibles que se ajusten a las prestaciones y funcionalidades definidos. Un ejemplo de sistema en los que estos diseños *ad-hoc* pueden resultar especialmente útiles son los *phased arrays* (conjuntos de antenas de apuntamiento electrónico). Utilizando componentes de diseño propio, la industria española tiene la posibilidad de eliminar, en cierto grado, la dependencia de componentes no europeos, así como conseguir una mayor flexibilidad frente a las soluciones de otros fabricantes.

Para Indra, un objetivo subyacente de este proyecto ha consistido en poder desarrollar un proceso de montaje más eficiente y con mayor fiabilidad con el que poder integrar este tipo de componentes a gran escala. Al tratarse de elementos que pueden encontrarse múltiples veces dentro de los sistemas, esto ha permitido acelerar el proceso de integración de los monolíticos consiguiendo un coste menor de fabricación. Además, se ha podido capacitar a los equipos de trabajo implicados en la integración de componentes de pequeña escala dentro de sistemas más grandes y complejos. Esto permite tener una integración vertical completa que va desde el componente hasta el sistema completo.

### Primera iteración

Durante la primera fase del proyecto, Indra ha realizado un total de 6

diseños centrados en dos bandas de frecuencia principalmente: la banda X y la banda EJ.

Respecto a la banda EJ se han diseñado 3 circuitos. El primero es un amplificador de alta potencia con una potencia de 10 W a la salida y una eficiencia superior al 20 %. Su potencial uso es en módulos de contramedidas electrónicas (ECM) dentro de los sistemas de guerra electrónica (EW). El segundo componente diseñado en esta banda es un amplificador de media potencia capaz de entregar 5 W de potencia a la salida y una ganancia superior a 20 dB. Puede ser utilizado para sistemas de guerra electrónica que requieran una potencia menor o como driver de amplificadores de alta potencia. Por último, se ha realizado un *switch* con bajas pérdidas de inserción (menores a 1.5 dB) y un aislamiento superior a 35 dB. La principal aplicación es en los módu-

los TR de los *phased array* que se implementan dentro de los sistemas guerra electrónica.

Dentro de la banda X, se han diseñado un total de 3 monolíticos de las mismas características que los de banda EJ: un amplificador de alta potencia, un driver o MPA y un *switch*. En este caso, una característica especial dentro de los diseños realizados, es que tanto el MPA como el *switch* se encuentran integrados dentro de un mismo chip. No obstante, el funcionamiento de cada circuito es independiente y no interfieren entre ellos. Al estar ambos dentro del mismo chip, este monolítico es idóneo para aplicaciones en módulos TR de banda X aunque también se pueden utilizar por separado. El amplificador de media potencia es capaz de obtener una potencia superior a los 8 W con una eficiencia cercana al 45 %. Por su parte, el *switch* presenta unas pérdidas de inserción menores a 1 dB

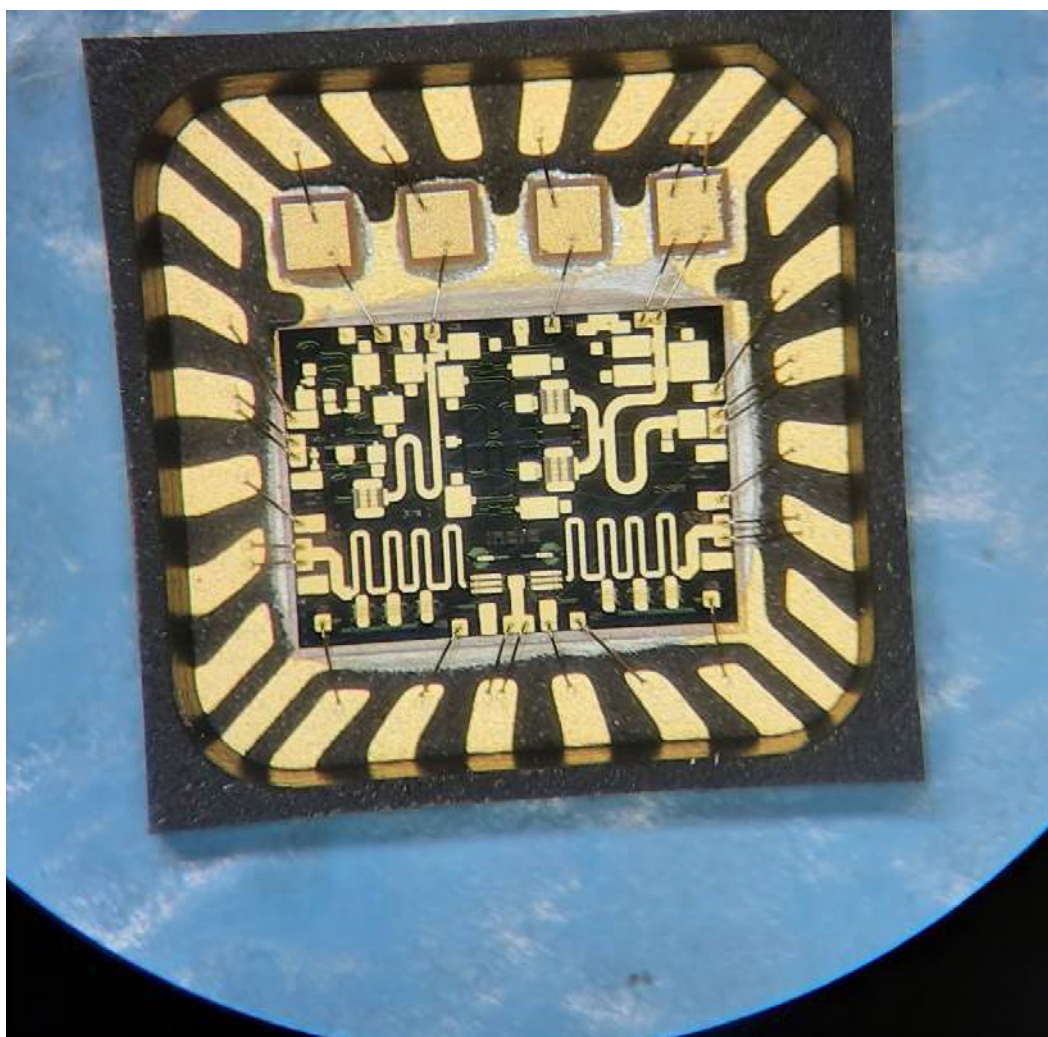


Fig. 3. Detalle del conexionado del MMIC a la base del encapsulado QFN. (Fuente: INDRA).

## En profundidad

con aislamientos superiores a 40 dB. Este amplificador de alta potencia es de aplicación en radares de banda X. La potencia capaz de entregar a la salida es superior a 20 W y su eficiencia media es superior al 42 %.

### Segunda iteración

Durante la segunda fase del proyecto, Indra ha realizado un total de cinco nuevos diseños, enfocándose a estructuras más complejas y llegando a bandas de frecuencia más altas (hasta 40 GHz). Además, se ha rediseñado el amplificador de alta potencia de banda EJ de la primera iteración con el objetivo de conseguir mejores prestaciones como una mayor eficiencia y un consumo de corriente menor. Por tanto, sumando este rediseño a los monolíticos realizados durante la segunda iteración, el total de circuitos diseñados han sido seis.

Los nuevos diseños abordados se pueden dividir en amplificadores y módulos transmisor/receptor. Estos módulos, se han diseñado en tres

bandas de operación distintas: banda X, banda EJ y banda Ka. Los módulos TR tienen un potencial uso dentro de sistemas *phased arrays* para guerra electrónica. Las bandas de frecuencia han sido estratégicamente seleccionadas ya que con ellas se puede cubrir gran parte del espectro utilizado en los sistemas de guerra electrónica actuales, así como los futuros sistemas que se utilizarán. Por otro lado, se han realizado dos nuevos amplificadores dentro de la banda Ka. Uno de ellos está enfocado para aplicaciones en comunicaciones satelitales y el otro para aplicación en sistemas ECM (figura 1). Otro de los posibles usos de este último diseño podría ser la combinación de varios MMIC para utilizarlo como alternativa a los amplificadores de tubo de onda progresiva (TWTA). Esto permite tener un sistema amplificador mucho más compacto y eficiente que el empleado en los TWTA.

### Medidas & Resultados

Para caracterizar los monolíticos desarrollados durante el proyecto

se han realizado dos procesos de medida distintos: medidas *on wafer* y medidas *on jig*.

En las medidas *on wafer* se caracteriza el MMIC directamente sobre la oblea en la que se fabrica. Estas medidas son realizadas por la *foundry* y dan los resultados más similares a los simulados en la fase de diseño. Esto se debe a que el modelado de los elementos de la librería de simulación se realiza de acuerdo a medidas de este tipo, directamente sobre los chips, que el fabricante realiza de dichos elementos. Este tipo de medidas contienen una menor cantidad de efectos parásitos por lo que son más precisos.

Por otro lado, las medidas *on jig* permiten caracterizar el MMIC dentro de una estructura o montaje mucho más parecido al que se tendría dentro de un sistema completo. En estas estructuras, el monolítico se encuentra pegado o soldado sobre el montaje y este, a su vez, se interconecta con el resto de componentes a través de una

MMIC	Descripción	Banda de frecuencia	Parámetros principales
WHPA V1	HPA	EJ	Potencia de salida > 10 W   Eficiencia > 20 %
WMPA	MPA	EJ	Potencia de salida > 5 W   Ganancia > 20 dB
WSW	SWITCH	EJ	Pérdidas de inserción < 1.5 dB   Aislamiento > 35 dB
XHPA	HPA	X	Potencia de salida > 20 W   Eficiencia > 40 %
XMPA	MPA	X	Potencia de salida > 8 W   Ganancia > 24 dB
XSW	SWITCH	X	Pérdidas de inserción < 1 dB   Aislamiento > 35 dB
WHPA V2	HPA	EJ	Potencia de salida > 10 W   Eficiencia > 25 %
WTR	T/R	EJ	Potencia de salida > 2 W   Eficiencia > 20 % Figura de ruido < 3.5 dB
XTR	T/R	X	Potencia de salida > 15 W   Eficiencia > 35 % Figura de ruido < 2.5 dB
KaHPA	HPA	Ka	Potencia de salida > 5 W   Eficiencia > 15 %
KaSAT	HPA	Ka	Potencia de salida > 8 W   Eficiencia > 25 %
KaTR	T/R	Ka	Potencia de salida > 1 W   Eficiencia > 15 % Figura de ruido < 5 dB

Tabla 1. Tabla resumen de los monolíticos diseñados por INDRA durante el proyecto MUSTANG. (Fuente: INDRA).

placa de circuito impreso (PCB). Estas estructuras han sido diseñadas y fabricadas por cada empresa independientemente. Esto se debe a que cada empresa diseña y realiza sus sistemas de forma distinta y, por tanto, la mejor forma de integrar estos chips dentro de los sistemas también es distinta. En la figura 2 se muestra la estructura de montaje realizada por Indra para los monolíticos diseñados durante el proyecto. Con este tipo de montajes, hay que tener en cuenta los efectos provocados por la propia estructura y conexionado de las distintas etapas. Todos estos efectos deben ser medidos y caracterizados. Además, debe tenerse en cuenta cuando los monolíticos se integren dentro de los sistemas.

Como resumen, tras haber realizado todas las medidas pertinentes de cada monolítico y haber analizado su comportamiento, se presenta la siguiente tabla 1 que contiene los resultados de los monolíticos diseñados y sus principales características.

### Encapsulado

Se ha comentado, que uno de los objetivos adicionales de este proyecto ha sido el desarrollo de técnicas que permitan poder integrar, de una forma más eficiente y fiable, los monolíticos dentro de los sistemas diseñados por Indra. En este sentido, uno de los métodos desarrollados es el encapsulado. Encapsular consiste en integrar el MMIC dentro de una pequeña estructura cerrada de un material determinado (como plástico o cerámica), normalmente siguiendo unos estándares, de forma automatizada. Esto permite que la integración posterior en los sistemas sea mucho más rápida. En este proyecto, se ha decidido encapsular el MMIC que contiene tanto el amplificador de media potencia como el *switch* de banda X. Con esto se puede evaluar el efecto generado por el encapsulado en dos circuitos independientes y de características diferentes. Para llevar a cabo este proceso, Indra ha utilizado los servicios de la empresa

Synergie-CAD, una empresa afinada en Francia dedicada a realizar encapsulados de monolíticos. La cooperación con Synergie-CAD da lugar a que el proceso sea realizado íntegramente por empresas europeas, consiguiendo así mantener el objetivo de obtener una cadena de suministro plenamente europea.

La elección del tipo de encapsulado y la configuración interna del mismo ha necesitado de un análisis de los efectos eléctricos y térmicos que implica el hecho de encapsular. Tras este análisis, y en coordinación con Synergie-CAD, se ha optado por utilizar un encapsulado tipo QFN (*Quad-Flat No-leads*) plástico, de 5 x 5 mm. El resultado de este trabajo se encuentra en la figura 3 donde se muestra el MMIC y sus conexiones con la base del encapsulado.

### Conclusiones

Todas las acciones llevadas a cabo durante el proyecto MUSTANG permiten concluir que la industria europea está en condiciones de desarrollar componentes con prestaciones a la altura de la oferta comercial no europea existente, reduciendo el gap tecnológico en la tecnología de nitruro de galio. Además, este proyecto supone un paso más en la colaboración entre las empresas europeas líderes en defensa como parte del *roadmap* europeo de desarrollo de GaN.

Por su parte, UMS ha podido perfeccionar el proceso GH15 a lo largo del proyecto, dotándolo de mejores capacidades y ajustando sus modelos acordes con los resultados obtenidos durante las dos iteraciones del proyecto. Además, todos los monolíticos diseñados durante el proyecto han servido para poder evaluar el proceso de fabricación y verificar la concordancia entre los modelos simulados y las medidas realizadas. Por todo ello, se puede concluir que el GH15 es, a día de hoy, un proceso maduro sobre el que poder diseñar y fabricar monolíticos con garantías.

Para Indra, el proyecto ha permitido, en primer lugar, continuar la línea de diseño de monolíticos iniciada con el proyecto KORRIGAN y seguida con ApiGaN, capacitando a los equipos de diseño. En segundo lugar, se ha podido dotar a la empresa de la posibilidad del uso de monolíticos de diseño propio para el desarrollo de sus sistemas. MUSTANG también ha facilitado el desarrollo de nuevas estructuras de ensamblaje y pegado de monolíticos que permiten que sus características eléctricas se vean alteradas en un menor grado. Esto genera una gran ventaja a la hora de ensamblar los componentes dentro de los sistemas diseñados por la compañía, reduciendo así la pérdida de prestaciones derivada del montaje. Además, el desarrollo de un proceso de montaje más eficiente a la hora de integrar los monolíticos en los sistemas, ha permitido reducir el tiempo necesario para implementar los *chips* dentro de los módulos y sistemas.

### Referencias

Delgado-Pascual E. (2018), *et al.*, «Non-Linear Distortion in Ultra Wideband GaN Power Amplifiers», 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), pp. 293-296.

Duême P. (2016) *et al.*, «Overview of the MAGNUS project», 2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), pp. 301-304.

Gauthier G., Mancuso Y. and Murgadella F., (2005). KORRIGAN - a comprehensive initiative for GaN HEMT technology in Europe, European Gallium Arsenide and Other Semiconductor Application Symposium, GAAS 2005, pp. 361-363.

Mikulla M. (2011) *et al.*, «Manga: Manufacturable GaN» 2011 6th European Microwave Integrated Circuit Conference, pp. 336-339.

Oreja-Gigorro E. (2018) *et al.*, «A 6–18 GHz GaN on SiC High Power Amplifier MMIC for Electronic Warfare», 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC).

Powell A. R. and Rowland L. B., (2002) «SiC materials-progress, status, and potential roadblocks» in *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, n.º 6, pp. 942-955, June 2002.

# Boletín de Observación Tecnológica en Defensa

Disponible en

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

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



 **SOPT**  
SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

