



MAPEI
MARINE

**Sistemas disponibles para Industria Naval y
habilitación Naval:**

- Imprimadores
- Recrecidos autonivelantes
- Recrecidos reactivos de Pu y Epoxi
- Impermeabilizaciones
- Sistemas aislantes acusticos
- Acabados superficiales de PU y Epoxi
- Acabados de cubiertas en PU (TEAK DESIGN)
- Selladores y adhesivos
- Sistemas de calafateado para Teka Natural

**Y en Septiembre, en la feria de Cannes,
lanzamiento de la gama de mantenimiento**

ULTRACARE 4 YACHT



mapei@mapei.es
www.mapei.es

YOUR PROPULSION EXPERTS

100
SINCE 1921



SRP



SRE



STP



SCP



SRP-R



SPJ



STT



SRT

WE KNOW WHAT MOVES VESSELS

WIRESA

Wilmer Representaciones, S.A.
Pinar, 6 BIS 1º
28006 Madrid | Spain

www.schottel.com

↗ +34 91 4 11 02 85
+34 91 5 63 06 91
✉ ecostoso@wiresa.com

Redacción

Nº 1048 · SEPTIEMBRE · 2025

Revista editada por la Asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos de España.
Fundada en 1929 por Aureo Fernández Ávila, I.N.

PRESIDENTE DE AINE Y DE LA COMISIÓN DE LA REVISTA

Diego Fernández Casado, I.N.

VOCALES DE LA COMISIÓN DE LA REVISTA

Francisco Pérez Villalonga, Dr. I.N.
Jesús Valle Cabezas, Dr. I.N.
Luis Guerrero Gómez, Dr. I.N.
Raúl Villa Caro, Dr. I.N.

REDACCIÓN

Verónica Abad Soto, I.N. (Redactora Jefe)

PUBLICIDAD

David Sánchez Rosado
Tel: 682 120 545
comercial@ingenierosnavales.com
revista@sectormaritimo.es

ADMINISTRACIÓN

Noemí Cezón López

DIRECCIÓN

Castelló, 66 - 28001 Madrid
Tels.: 915 751 024 / 915 771 678
e-mail: revista@sectormaritimo.es
www.sectormaritimo.es

DISEÑO Y MAQUETACIÓN

DiseñoPar Publicidad S.L.U.
parpubli@parpubli.com
www.parpubli.com

IMPRESIÓN

Imedisa Material de Oficina, S.L.
Tel: 914861606

SUSCRIPCIÓN ANUAL

SUBSCRIPTION FEE (2025):

Electrónica general 90,00 €
Electrónica estudiantes 45,00 €
Papel + electrónica 110,00 €
(sólo España)

SUSCRÍBETE AQUÍ:
sectormaritimo.es



SCAN ME

AÑO XCIV • N.º 1048
septiembre 2025
Publicación mensual
ISSN: 0020-1073
Depósito Legal: M 51 - 1958
REVISTA DEL SECTOR MARÍTIMO



NOTAS:

No se devuelven los originales. La Revista de Ingeniería Naval es una publicación plural, por lo que no necesariamente comparte las opiniones vertidas por sus colaboradores en los artículos, trabajos, cartas y colaboraciones publicados, ni se identifica con ellos, y sin que esta Revista, por su publicación, se haga en ningún caso responsable de aquellas opiniones. Los firmantes de los artículos, trabajos, cartas y colaboraciones publicados son autores independientes y los únicos responsables de sus contenidos. Se permite la reproducción de nuestros artículos indicando su procedencia, pero no la distribución de la revista por ningún tipo de medio (electrónico y/o físico).

CONSEJO TÉCNICO ASESOR

D. Francisco de Bartolomé Guijosa
D. Manuel Carlier de Lavalle
D. Rafael Gutiérrez Fraile
D. José María de Juan-García Aguado
D. Nandi Lorenzu Jaesuria
D. Miguel Ángel Palencia Herrero
D. Mariano Pérez Sobrino
D. Jesús Valle Cabezas

595.

artículo técnico

“Impacto de la designación del Mediterráneo como zona NECA: estudio de caso para el tráfico de cruceros”, por J. Esteve Pérez; A. López Belchí

609.

en profundidad

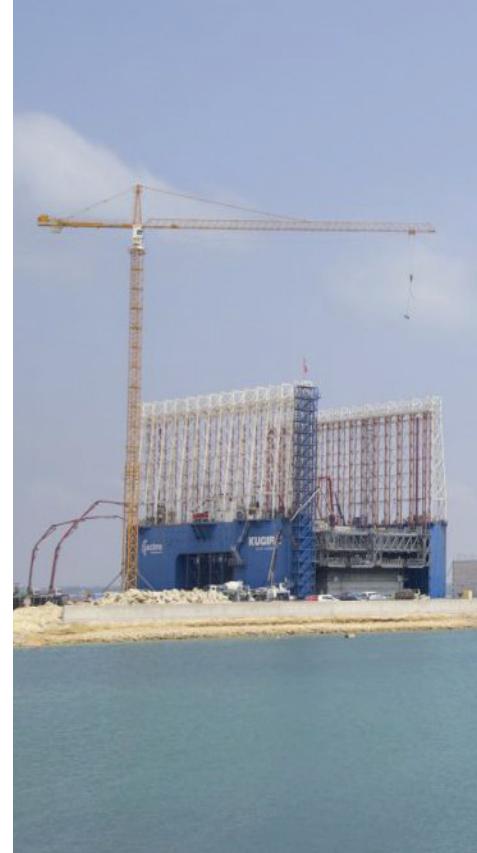
“Nuevos combustibles renovables y no renovables para submarinos AIP”, por R. Gutiérrez Fraile

634.

conectados

636.

puertos



640.

construcción naval



642.

actualidad

646.

in memoriam

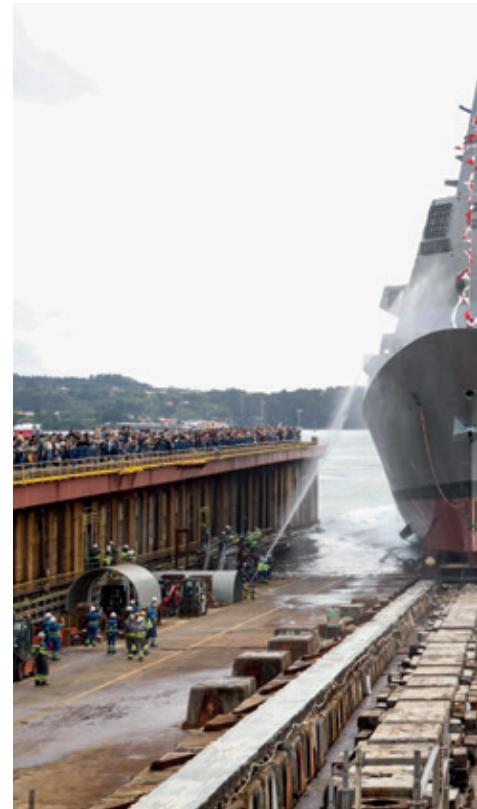
650.

guía de empresas

642

actualidad

La DGMM publica la
Memoria Anual del 2024



636

puertos

SIKA colabora en la construcción de los cajones portuarios de la nueva terminal de contenedores en Cádiz



634

conectados

2025 China-Spain Engineering Competency Enhancement Training Program for Engineers



640

construcción naval

Navantia Ferrol celebra la botadura de la fragata F111 Bonifaz de la Armada Española



Editorial

Estimados amigos y compañeros,

Quiero aprovechar estas líneas para dirigirme a todos nuestros asociados por última vez como Presidente de la Asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos de España.

Ha sido un inmenso honor y una gran responsabilidad. En estos cuatro años, junto con la Junta Directiva, hemos desarrollado una intensa actividad y de trabajo en la que ha primado mantener los propósitos iniciales: fortalecer nuestra Asociación a través del trabajo de las comisiones, dar relevancia profesional a través de nuestros Congresos y Revista y tener presencia institucional con el objetivo de ser relevantes en la industria y en la sociedad.

El cambio de formato y la creciente internacionalización de nuestro Congreso Anual ha sido clave. La involucración y entusiasta dedicación de las Delegaciones Territoriales que han tenido la oportunidad de organizarlos ha sido decisiva en el éxito de los últimos Congresos.

Evidencia de su relevancia, es el altísimo nivel técnico de las ponencias presentadas. Estas han ido creciendo edición a edición atrayendo a ponentes extranjeros. El apoyo de instituciones internacionales, el aumento en el número de patrocinadores y de ponentes en las mesas redondas son la muestra del trabajo detrás de este evento.

Nos hemos acercado a la realidad de los problemas tecnológicos y empresariales a los que se enfrentan la Pesca, la Marina Mercante, de pasaje y buques especiales, la Defensa y la Eólica Marina. Hemos trabajado edición tras edición en mejorar la aproximación y encuentro entre empresas y estudiantes de Máster de Ingeniería Naval y Oceánica, convirtiéndonos en hecho de referencia. En los últimos años, hemos promovido el talento innovador y disruptivo de nuestro sector, donde nuestro Congreso se ha convertido en un referente. Prueba de la relevancia de todo lo anterior es que S.M. El Rey, Felipe VI haya aceptado la Presidencia del Comité de Honor formado por personalidades relevantes de la industria y administración.

Me gustaría destacar el trabajo realizado en la elaboración del informe sobre el estado de la nuestra profesión presentado al Alto Consejo Consultivo de la Ingeniería Naval. En el mismo, se identificaron los retos y las oportunidades que nos esperan en la próxima década. Se hizo un foco muy especial en la necesidad de atraer talento a nuestro sector en general y a la profesión en particular. En sus conclusiones, se apoyarán futuras acciones para fomentar vocaciones entre jóvenes talentos, atraer profesionales al sector y demostrar que la ingeniería naval y oceánica es una profesión con futuro ilusionante y lleno de oportunidades.

Quiero mencionar el trabajo realizado por las comisiones, tanto en las de la Asociación como en los Comités del Instituto de Ingeniería, y agradecer la labor desinteresada de sus integrantes. El número de mesas redondas, jornadas técnicas, presentaciones o intervenciones en medios ha sido muy significativo y sus aportaciones muy relevantes.

También se ha trabajado en reforzar el trabajo de las Delegaciones Territoriales mediante encuentros y jornadas técnicas, no solo para los profesionales del sector, sino también reforzando la labor de divulgación de nuestra profesión a la sociedad.

En el aspecto institucional, se han aprobado unos nuevos Estatutos en sintonía con la Ley de Asociaciones y se han confeccionado diversos Reglamentos para regular y ordenar su funcionamiento.

Queda una asignatura pendiente respecto a la Revista Ingeniería Naval. Estatutariamente está definida como nuestro medio de difusión técnica, científica y profesional. Así quedó definida en la fundación de nuestra Asociación. Cuando nos acercamos al Centenario (en la próxima legislatura cumpliremos un siglo de la Asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos) tanto los medios de difusión como la variedad y transversalidad de los campos actividad de nuestros profesionales, su financiación mediante publicidad tradicional, etc. nos hace replantearnos su formato, contenidos y periodicidad.

Agradezco a los asociados el apoyo, la oportunidad y el honor de haber servido a la profesión y a la Asociación. Animo a todos los asociados a que sigan participando y contribuyendo a su funcionamiento y como acción más inmediata a que participen en la elección del nuevo presidente el próximo 30 de septiembre.

Un abrazo,

Diego Fernández Casado

Presidente

Asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos de España.



Navantia

Innovation
where it matters



in FERRI



info@ferri-sa.es

www.ferri-sa.es

+34 986 468 201

MAQUINARIA ESPECIALIZADA

 **FERRI**

 Talleres **CARRAL**
1921

Impacto de la designación del Mediterráneo como zona NECA: estudio de caso para el tráfico de cruceros



Jerónimo Esteve Pérez, I.N.

Alejandro López Belchí

Trabajo presentado en el 64º Congreso Internacional de Ingeniería Naval e Industria Marítima, celebrado en Gijón del 26 al 28 de marzo de 2025.

ÍNDICE

Resumen / Abstract

1. INTRODUCCIÓN

2. MÉTODOS Y BASE DE DATOS

2.1. Procesamiento de datos

3. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

4. CONCLUSIONES

5. REFERENCIAS

RESUMEN

Las navieras de cruceros tienen un fuerte compromiso enfocado a aumentar la sostenibilidad medioambiental de su actividad, tomando medidas para reducir las emisiones de gases contaminantes procedentes de los buques. Este trabajo se centra en el potencial impacto que tendría la designación del mar Mediterráneo como zona de control de emisiones de óxidos de nitrógeno por la Organización Marítima Internacional. Para alcanzar este objetivo, se ha analizado la flota de buques de crucero posicionada en 252

rutas durante 2019 usando el enfoque ship activity-based (bottom-up) para estimar las emisiones de NOx. Los resultados muestran que una potencial reducción de 1.789 t de NOx podría haberse alcanzado en 2019, si hubiera aplicado el Tier III en el Mediterráneo para los buques con puesta de quilla a partir de enero de 2016. Asimismo, en la ruta Palma de Mallorca–Barcelona, la más activa, se podría haber alcanzado una reducción de 256 t de emisiones de NOx, equivalente a una reducción del 20%, de forma directa con la declaración NECA del Mediterráneo. Adicionalmente, el trabajo propone una serie de ecuaciones paramétricas en función del arqueo bruto y la capacidad de pasajeros para estimar las emisiones de NOx según el Tier de aplicación. Los resultados presentados en este trabajo proporcionan una guía para evaluar futuras regulaciones de limitación de emisiones contaminantes de NOx.

ABSTRACT

The shipping industry has a strong commitment for increasing the environmental sustainability of its activity. Cruise lines, as part of the shipping industry, are taking action to reduce polluting gas

emissions from cruise ships. This work focuses on the potential impact that the designation of the Mediterranean Sea as a Nitrogen Emission Control Area (NECA) by the International Maritime Organisation would have. To achieve this goal, cruise fleet deployed on 252 routes during 2019 has been analysed using a ship activity-based (bottom-up) approach to estimate NOx emissions. The results show that a potential reduction of 1,789 t of NOx emissions would have been achieved in 2019 if Tier III had been applied in the Mediterranean for those vessels with keel laid on or after January 2016. Furthermore, on the route Palma de Mallorca–Barcelona, the most active, a reduction of 256 t of NOx emissions could be achieved, which is equivalent to a reduction of 20%, directly with NECA declaration. Additionally, the investigation proposes a series of parametric equations based on gross tonnage and passenger capacity to estimate NOx emissions according to the applicable Tier. The results presented in this work provide guidance to assess future emissions limitation regulations of NOx.

1. INTRODUCCIÓN

El sector naviero tiene un fuerte compromiso por conseguir una explotación de los buques más limpia y respetuosa con el medio ambiente. La industria de cruceros, como parte del sector naviero y una de las más conocidas, está comprometida con la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de los buques, reduciendo así la huella de gases contaminantes de la actividad de los cruceros. Este objetivo se puede conseguir mediante la acción conjunta tanto de las navieras de cruceros como de los Organismos Internacionales, buscando una actividad más “verde”.

Los gases de escape de los motores son la principal fuente de emisiones procedentes de los buques. Las emisiones de gases con-

taminantes más significativas del transporte marítimo son el CO₂, el NOx y el SOx. Según el 4º Estudio de GEI de la Organización Marítima Internacional (OMI) [1], la estimación total de las emisiones procedentes de los buques en 2018, aplicando un enfoque bottom-up, fue de 1.056·Mt de CO₂, 22,754·Mt de NOx y 11,480·Mt de SOx. De hecho, si no se toman medidas al respecto, las proyecciones indican que estas emisiones podrían aumentar hasta un 130% con respecto a las de 2008 para 2050 [2]. Si el impacto de las actividades de transporte marítimo en el cambio climático aumenta como se prevé, socavará los objetivos del Acuerdo de París.

Para controlar estas emisiones y hacer más sostenible el sector del transporte marítimo, la OMI ha aprobado numerosas normativas. El Anexo VI de MARPOL aborda las normas para la prevención de la contaminación atmosférica procedente de los buques. Una característica clave de este anexo es la designación de zonas de control de emisiones (Emission Control Area - ECA) centradas en NOx y SOx, unas de las emisiones más perniciosas. En concreto, se denominan NECA (zona de control de emisiones de nitrógeno) y SECA (zona de control de emisiones de azufre), si la ECA se centra en las emisiones de nitrógeno o azufre, respectivamente. Los requisitos de emisiones de las ECA son más estrictos que los requisitos globales [3].

Además, el sector de cruceros está desarrollando una serie de iniciativas para lograr una operación más sostenible de los cruceros. Entre otras, se encuentran: el uso de combustibles con bajo contenido de azufre; equipar los barcos para conectarse a la red eléctrica en tierra (Shore Side Electricity - SSE); equipar los barcos con sistemas de limpieza de gases de escape (Exhaust Gas Cleaning System - EGCS); y, la búsqueda de combustibles alternativos como biocombustibles hechos a partir de biomasa no alimentaria, e-combustibles sintéticos como

e-metano y e-metanol, baterías eléctricas, bio-Gas Natural Licuado (GNL) y/o GNL sintético, metanol y pilas de combustible de hidrógeno. Además, las líneas de cruceros se han comprometido a reducir la intensidad de carbono en un 40% como promedio en toda la flota de cruceros para 2030 en comparación con 2008, y están persiguiendo el objetivo de cruceros con emisiones neutras de carbono para 2050 [4]. Todos estos compromisos están alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y especialmente con el ODS número 13 “Acción por el Clima” tomando medidas urgentes para combatir el cambio climático y su impacto.

Desde el año 2010 el tráfico de cruceros está registrando un gran repunte motivado por la demanda de personas que desean pasar sus vacaciones a bordo de un crucero, disfrutando tanto del barco como de una serie de destinos durante el itinerario. Las navieras de cruceros están desplegando nuevos e innovadores barcos que incrementan la flota y la hacen más sostenible. El sector muestra una gran resiliencia ya que fue uno de los más afectados por la pandemia de COVID-19 y la consecuente paralización total de la flota. A pesar de ello, ha conseguido sobreponerse y recuperar los niveles de actividad registrados previos a la pandemia.

Las dos regiones de destino de cruceros más populares concentran anualmente más del 50% de la capacidad desplegada. El Mediterráneo es el principal destino de cruceros en Europa. Ésta es la segunda región de destino de cruceros más popular a nivel mundial con el 18,5% de la capacidad desplegada en 2023 [5]. Los puertos de las orillas del Mediterráneo registraron 29,6 millones de movimientos de pasajeros de cruceros durante 2023, dando lugar a un nuevo récord [6]. En 2019 se alcanzó el récord de 28,6 millones de movimientos de pasajeros de cruceros, mientras que la actividad cayó bruscamente

en 2020 y 2021, un 93,5% y un 81,1% en comparación con 2019, respectivamente [7]. Además, Barcelona, el puerto de cruceros con mayor actividad del Mediterráneo, registró 2,33 millones de cruceristas en 2022, mientras que, en 2023 y 2024 la actividad acumulada fue de 3,57 y 3,66 millones de cruceristas, respectivamente [8]. Por tanto, el tráfico de cruceros en el Mediterráneo se ha recuperado por completo de los efectos negativos de la pandemia de COVID-19.

En cuanto a las normas de la OMI sobre las emisiones de NOx de los buques, la regla 13 del Anexo VI del Convenio MARPOL aborda las normas sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), proporcionando distintas orientaciones para el cumplimiento a escala mundial y en las ECA. La regla 13 define tres niveles (Tier), cuya regulación se basa en la fecha de construcción del buque y las revoluciones por minuto del motor para los motores diésel marinos con una potencia de salida superior a 130 kW. La Tabla 1 resume la aplicación de cada Tier. El cumplimiento del Tier III es obligatorio desde enero de 2016 en las ECA de América del Norte y del Caribe de EE.UU., y desde enero de 2021 en las ECA del mar Báltico y del mar del Norte. Estas son las cuatro NECA actualmente en vigor.

Desde enero de 2024 el transporte marítimo está incluido en el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (European Union Emission Trading System – EU ETS) [2]. Además, la OMI ha declarado el Mediterráneo como SECA a partir del 1 de mayo de 2025. Teniendo en cuenta las recientes regulaciones en Europa dedicadas a las emisiones contaminantes de los buques, resulta de interés analizar los beneficios de limitar las emisiones de NOx en el Mediterráneo mediante su declaración como NECA. Para lograr este objetivo, en el presente trabajo se estiman las emisiones de NOx en 252 rutas de cruceros considerando la actividad regis-

Tabla 1. Límites de emisiones de NO_x por Tier

Tier	Buques construidos en / después de	Límite de emisiones (g/kWh)		
		RPM < 130	130 ≤ RPM ≤ 1999	RPM ≥ 2000
I	Enero 2000	17	45 rpm(-0,2)	9,8
II	Enero 2011	14,4	44 rpm(-0,23)	7,7
III	Enero 2016	3,4	9 rpm(-0,2)	2

Fuente: Adaptado de OMI [9].

trada durante 2019. Este año se selecciona basado en que actualmente es uno de los últimos años disponibles con actividad que no se vio afectada por las terribles consecuencias que la pandemia de COVID-19 tuvo para las navieras y flota de cruceros.

El resto del trabajo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 presenta la metodología para estimar las emisiones de NOx de los buques y los datos analizados. Los resultados de los inventarios de emisiones y las previsiones para escenarios alternativos considerando la declaración del Mediterráneo como NECA se presentan en la sección 3. Finalmente, las conclusiones se incluyen en la sección 4.

2. MÉTODOS Y BASE DE DATOS

En la estimación de las emisiones contaminantes procedentes de los buques se pueden adoptar dos enfoques: la metodología top-down o la bottom-up. Las estimaciones de emisiones de los buques basadas en la metodología top-down son rápidas, pero poco precisas a la hora de proporcionar datos de emisiones específicos para áreas locales porque este enfoque ignora las especificaciones de los buques. Las estimaciones de emisiones bottom-up (o ship-activity based) son precisas, pero requieren muchos datos y tiempo y, por tanto, el proceso es costoso [10]. Basándose en la precisión de cada método, esta investigación aplica el método ship-activity based para calcular las emisiones de NOx de los buques de crucero que navegan en un conjunto de rutas de crucero

por el Mediterráneo. Durante la última década, se han llevado a cabo una gran cantidad de trabajos de investigación considerando el método ship-activity based para evaluar el inventario de emisiones de gases contaminantes de los buques. Éstos se pueden clasificar en dos grupos principales. Los de escala portuaria, centrándose en un puerto en concreto. Y los de escala regional, aquellos que se centran en un área más extensa de un mar.

A continuación, se enumeran algunos ejemplos de trabajos de investigación a escala portuaria. El trabajo de Chen et al. [11] desarrolló un inventario detallado de emisiones de los buques en el puerto chino de Tianjin; Gan et al. [12] estimaron las emisiones de los barcos en el puerto chino de Shenzhen; el trabajo de Toscano et al. [13] presenta un inventario de emisiones para el puerto italiano de Nápoles; Dragovic' et al. [14] estimaron las emisiones contaminantes de los buques en los puertos populares de cruceros de Dubrovnik y Kotor. Murena et al. [15] evaluaron la cantidad de contaminantes atmosféricos emitidos por el tráfico de cruceros en el puerto de Nápoles.

Mientras que, algunos trabajos representativos a escala regional son los siguientes. Bakker [16] estimó el inventario de emisiones en el mar Báltico. Howitt et al. [17] investigaron las emisiones de CO₂ de los viajes de cruceros internacionales hacia y desde Nueva Zelanda. Ay et al. [18] generaron un inventario de emisiones del transporte marítimo en el estrecho de Estambul. Winther et al. [19] fo-

calizaron en los inventarios de emisiones de los buques en el Ártico. Peng et al. [20] desarrollaron un método basado en el enfoque ship activity-based con datos AIS (sistema de identificación automática) con 1 s de resolución temporal para estimar los inventarios de emisiones contaminantes de los buques en el río Yangtze. Y, Yeo et al. [21] calcularon las emisiones de GEI de los buques en Corea del Sur.

En el desarrollo de un inventario de emisiones de NOx con el enfoque activity-based aplicado a los buques, las emisiones se estiman en función del consumo de energía durante cada actividad. En este caso, se expresa en términos de potencia consumida y tiempo de navegación multiplicado por un factor de emisión expresado en gramos por kilovatio·hora (g/kW·h). En este trabajo, el inventario de emisiones de NOx de los buques se compone de la suma de las emisiones producidas por cada buque i en cada ruta de crucero j analizada durante 2019. La ecuación (2.1) modela las emisiones totales:

$$E_{ij} = \sum_i \sum_j P_i \cdot LF_i \cdot T_i \cdot EF_i, \quad (2.1)$$

donde E_i representa la emisión de contaminantes de cada buque i analizado en kg; j es el índice de cada ruta analizada; P_i representa la potencia instalada correspondiente al/los motor/es principal/es en kW; LF_i es el factor de carga del/los motor/es principal/es del buque, definido como 0,85; T_i es el tiempo de navegación en cada ruta j ; EF_i representa el factor de emisión de NOx en g/kW·h dependiente del Tier de aplicación al/los motor/es principal/es instalado/s.

Respecto al factor de emisión de NOx, para los motores Tier 0 se asume un factor de emisión de NOx de 13,16 g/kW·h según Olmer et al. [22]. Para los motores Tier I, II y III, se utilizan como factores de emisión de NOx los límites de emisión impuestos por la Re-

gla 13 del Anexo VI de MARPOL. Es decir, se considera el escenario más desfavorable de emisiones para cada Tier. Por tanto, las revoluciones por minuto (rpm) del/los motor/es principal/es instalado/s en los buques analizados son uno de los parámetros clave a recopilar.

2.1. Procesamiento de datos

La investigación se ha llevado a cabo utilizando la actividad registrada en 252 rutas de cruceros en el Mediterráneo para estimar las emisiones de NOx. Las 252 rutas analizadas abarcan 154 buques de crucero, 95 puertos y 3.880 conexiones. Como variable de entrada, para cada ruta se han recopilado los buques que navegaron en ella y el número de conexiones. Entre las 252 rutas analizadas, 37 de ellas conectan con un puerto que no es ribereño del Mediterráneo. Para estas rutas, se ha considerado únicamente la distancia de navegación dentro del sector mediterráneo en la estimación de las emisiones contaminantes.

Para aplicar la ecuación (2.1) fue necesario recopilar y procesar previamente los parámetros técnicos de los 154 buques desplegados en las rutas analizadas. Para cada buque se recuperaron los siguientes parámetros técnicos: fecha de puesta de quilla (K), velocidad de servicio (S), tipo de maquinaria propulsora, velocidad del/los motor/es (rpm) y potencia total de salida para navegación (P). Para ello, se caracterizó cada buque mediante búsquedas en bases de datos especializadas, como Significant Ships [23] o Vessel Finder [24].

La fecha de puesta de quilla es un parámetro clave para asociar el factor de emisión de NOx correspondiente a cada buque. Los Tiers más comunes de los buques desplegados en las rutas analizadas son el Tier 0 con 70 buques (45%) y el Tier I con 53 buques (34%), véase Figura 2.1.

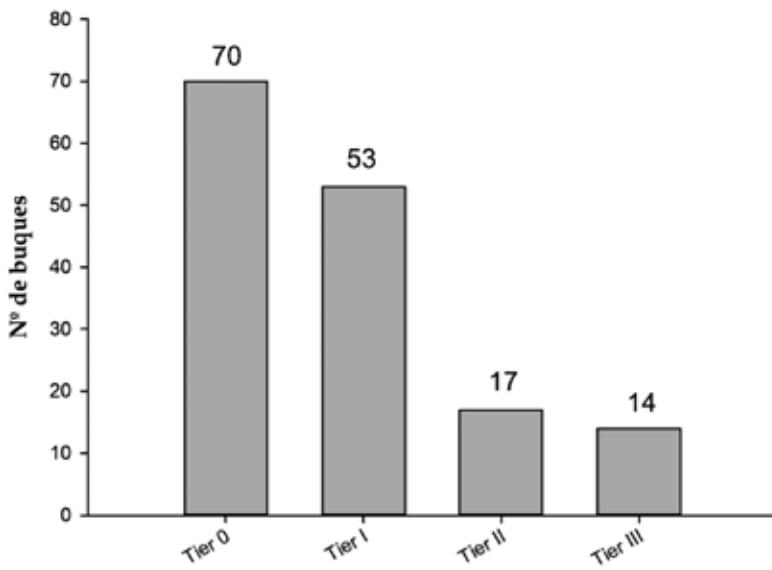


Figura 2.1. Distribución de Tier de aplicación en la flota analizada. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.1. Distribución de la flota analizada por segmento de mercado

Segmento	Budget	Contemporary	Premium	Upper-premium	Lujo	Expedición
Nº de buques	9	51	50	5	31	8
Potencia media instalada (kW)	17.350	52.759	40.425	24.900	16.191	12.875

Tabla 3.1. Distribución de emisiones de NOx por Tier en 2019 de las rutas de cruceros analizadas y las previstas considerando el Mediterráneo como NECA

Tier	Emisiones NOx (t)	Simulación de emisiones de NOx considerando el Mediterráneo como NECA en 2019 (t)
Tier 0	5.239	5.239
Tier I	12.524	12.524
Tier II	4.561	2.312
Tier III	-	460
Total	22.324	20.535

Fuente: Elaboración propia.

Además, se buscó y asignó la naviera de cruceros a la que pertenece cada buque para clasificarlos por segmento de mercado y, por tanto, obtener las emisiones distribuidas por segmento. Los segmentos de mercado considerados son: budget, contemporary, premium, upper-premium, lujo y expedición. La Tabla 2.1 muestra la distribución de la flota analizada por segmento de mercado.

Los segmentos contemporary y premium son los más representativos, y también los de mayor potencia media instalada.

3. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

La Tabla 3.1 muestra la estimación de emisiones considerando el Tier correspondiente a cada buque desplegado en 2019 en las 252 rutas de crucero por el Mediterráneo analizadas. Además, la Tabla 3.1 incluye una simulación considerando que el Mediterráneo hubiera sido declarado NECA desde el 1 de enero de 2019 y, por tanto, aplicando el Tier III a los buques construidos a partir del 1 de enero de 2016. La reducción potencial de emisiones de NOx habría sido del 8% si se hubiera implementado la NECA para el Mediterráneo en 2019.

Tabla 3.2. Comparativa de características y emisiones de NOx sin, y con, aplicación de la NECA en el Mediterráneo para las 20 rutas con mayor cuota de emisiones

Ruta	Nº de conexiones	Distancia de navegación (millas)	Emisiones NOx Tier 0, I y II (t)	Emisiones NOx, Tier 0, I, II y III (t)	Reducción de emisiones (%)	Cuota de emisión (%)
Palma de Mallorca-Barcelona	350	133	1.257	1.001	20,4	5,6
Barcelona-Marsella	194	185	851	689	19,0	3,8
Barcelona-Valletta	55	673	823	627	23,8	3,7
Livorno-Civitavecchia	250	144	773	755	2,3	3,5
Barcelona-Nápoles	43	555	740	740	0,0	3,3
Palma de Mallorca-Cannes	61	340	715	447	37,5	3,2
Palma de Mallorca-Marsella	69	302	705	698	1,0	3,2
Ibiza-Nápoles	26	686	666	666	0,0	3,0
Palma de Mallorca-Cagliari	61	326	579	579	0,0	2,6
Livorno-Nápoles	61	262	562	541	3,7	2,5
Barcelona-Valencia	190	168	544	502	7,7	2,4
Civitavecchia-Palma de Mallorca	41	479	487	307	37,0	2,2
Palermo-Palma de Mallorca	33	539	484	458	5,4	2,2
Valencia-Palma de Mallorca	153	141	462	451	2,4	2,1
Gibraltar-Barcelona	32	515	443	418	5,6	2,0
Ibiza-Palermo	20	602	434	434	0,0	1,9
Barcelona-Cádiz	26	584	410	410	0,0	1,8
Barcelona-Málaga	44	467	403	365	9,4	1,8
Santorini-Civitavecchia	29	807	397	378	4,8	1,8
Ibiza-Palma de Mallorca	125	116	393	392	0,3	1,8
Σ resto de rutas (232)	2.017		10.197	9.677	5,1	45,7
Total	3.880		22.324	20.535		100

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3.2 contiene la estimación de emisiones de NOx por ruta, 20 rutas concentran más del 50% de las emisiones de NOx estimadas. El 45,7% restante de las emisiones se reparten entre 232 rutas. Si el Mediterráneo fuera declarado NECA, la reducción de emisiones sería inmediata en 198 rutas ya que tienen desplegados buques construidos después de enero de 2016. Por el contrario, en algunas rutas no hay reducción porque los buques desplegados en ellas tienen puesta de quilla anterior a enero de 2016, como se refleja en los resultados obtenidos para las rutas Palma de Mallorca-Cagliari e Ibiza-Palermo.

La Figura 3.1 muestra las rutas con mayor reducción de emisiones, destaca la redu-

ción alcanzada en 5 rutas, ya que oscila entre el 19%, para la ruta Barcelona-Marsella, y el 37,5%, para la ruta Barcelona-Cannes. El sector situado al noroeste de las Islas Baleares es un núcleo de rutas de cruceros y, por tanto, a través de la declaración NECA, se podría reducir la concentración de emisiones de gases contaminantes en esa zona.

El Tier 0 aplica a 70 buques desplegados en las rutas de crucero analizadas, siendo estos los buques más antiguos cuya fecha de quilla es anterior al 1 de enero de 2000. Un escenario futuro que se puede evaluar es el cambio de los buques más antiguos, desde el punto de vista de la aplicación del Tier, es decir, los buques Tier 0. Potencialmente estos son los buques que están más próximos

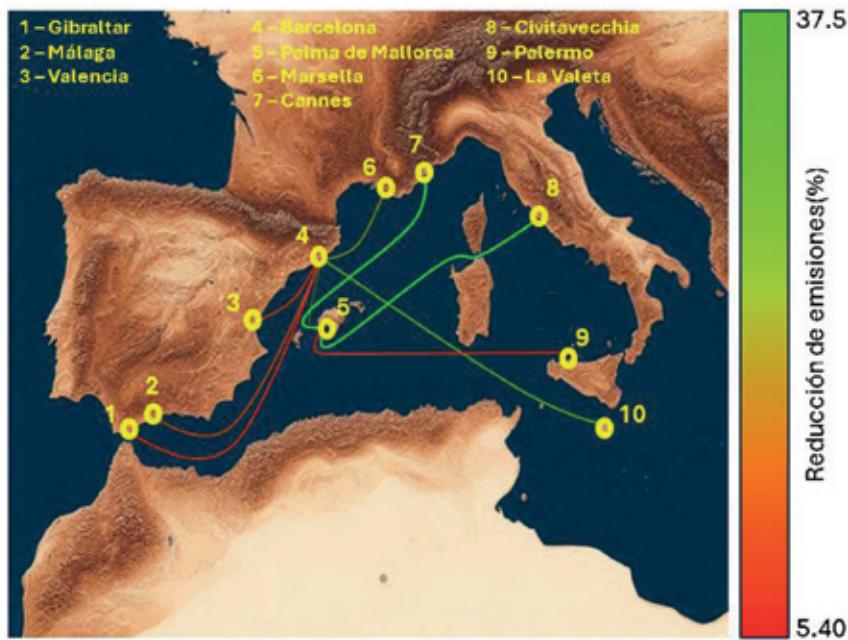


Figura 3.1. Rutas analizadas con mayor ahorro de emisiones. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3. Comparativa de emisiones de NOx con 3 escenarios diferentes

Tier	Escenario		
	[1] NOx (Tier 0, I y II) (t)	[2] NOx (Tier I y II) (t)	[3] NOx (Tier I, II y III) (t)
Tier 0	5.239		
Tier I		12.524	12.524
Tier II		4.561	4.561
Tier II correspondiente a buques Tier 0			4.252
Tier III			460
Tier III correspondiente a buques Tier 0			1.073
Total	22.324	21.337	18.618

Nota: [1] Escenario con distribución actual de buques entre Tier 0 a Tier II; [2] Escenario de cambio de buques Tier 0 a Tier II.; [3] Escenario de cambio de buques Tier 0 a Tier III.

Fuente: Elaboración propia.

a llegar al final de su ciclo de vida operativo. Considerando la sustitución total de estos buques, a partir de 2019 las emisiones de NOx caen hasta un 4,4% considerando Tier II y hasta un 16,6% si el Mediterráneo se declara como NECA. Esto equivale a eliminar hasta 987 t de emisiones considerando Tier II y hasta 3706 t considerando Tier III, véase Tabla 3.3. La Tabla 3.4 muestra la distribución de las emisiones por segmento y de forma segregada para las rutas que navegan completamente, y parcialmente, en el Mediterráneo. Los segmentos premium y contemporary son los que concentran las mayores emisiones

asociadas a los buques Tier 0. Adicionalmente, la gran mayoría de las flotas budget y de lujo son buques con puesta de quilla anterior a 1990 y, por tanto, con limitaciones de emisiones Tier 0. Adicionalmente, la Figura 3.2 muestra la distribución de emisiones total para cada segmento y por Tier de aplicación. En ella se puede observar como el segmento contemporary concentra las emisiones en los Tier I y II. Análogamente, el segmento premium también tiene unas emisiones significativas en los Tier I y II. Por el contrario, la mayor concentración en el segmento Budget se da en el Tier 0.

Tabla 3.4. Emisiones de NOx segregadas por segmento y Tier de aplicación

Tier/Segmento	Tier 0	Rutas totalmente en el Mediterráneo			Total
		Tier I	Tier II		
Budget	490	38	0	528	
Contemporary	1.737	9.726	3.057	14.520	
Premium	1.990	1.401	991	4.382	
Upper-premium	108	358	0	465	
<td>246</td> <td>540</td> <td>318</td> <td>1104</td> <td></td>	246	540	318	1104	
Expedición	118	0	0	118	
Total	4.688	12.063	4.365	21.117	
Rutas parcialmente en el Mediterráneo					
Budget	93	0	11	105	
Contemporary	170	373	23	566	
Premium	275	65	122	461	
Upper-premium	8	13	0	21	
Lujo	2	10	39	51	
Expedición	3	0	0	3	
Total	551	461	196	1.207	
Total de rutas analizadas					
Budget	583	38	11	633	
Contemporary	1.907	10.099	3.080	15.086	
Premium	2.264	1.466	1.113	4.843	
Upper-premium	115	371	0	486	
Lujo	248	550	357	1.155	
Expedición	121	0	0	121	
Total	5.239	12.524	4.561	22.324	

Fuente: Elaboración propia.

Centrándose en los segmentos contemporary y premium como los más contaminantes, se han simulado tres escenarios para medir el impacto de reducción de emisiones, que son los siguientes: cambio de buques con más de 35 años (escenario 1), cambio de buques de más de 30 años (escenario 2) y cambio de todos los buques pertenecientes al grupo Tier 0 (escenario 3) por buques que apliquen Tier III. La Figura 3.3 muestra la distribución de emisiones para cada escenario para el segmento contemporary. El ahorro de emisiones en los escenarios 1 y 2 alcanza el 80% y para el escenario 3 llega al 78%. Los resultados destacan que la gran mayoría de la flota Tier 0 se encuentra en el rango entre 25 y 29 años, ya que existe una gran diferencia con respecto a los escenarios

1 y 2. Concretamente, los buques contemporary de entre 25 y 29 años concentraron 1240 t de NOx.

En cuanto al segmento premium, el escenario 2 representa un gran impacto positivo, ya que la gran mayoría de la flota se concentra en el rango entre 30 y 34 años, véase Figura 3.4. En el escenario 2, las emisiones de NOx se reducirían hasta las 344 t desde 1.510 t. Como es de esperar, en el escenario 3 se lograría el mayor ahorro de emisiones (1555 t) porque todos los buques de Tier 0 cambiarían a Tier III. Además, la reducción de emisiones en el segmento premium para el escenario 3 sería mayor que para el segmento contemporary pues en este último se eliminarían 1.362 t de NOx.

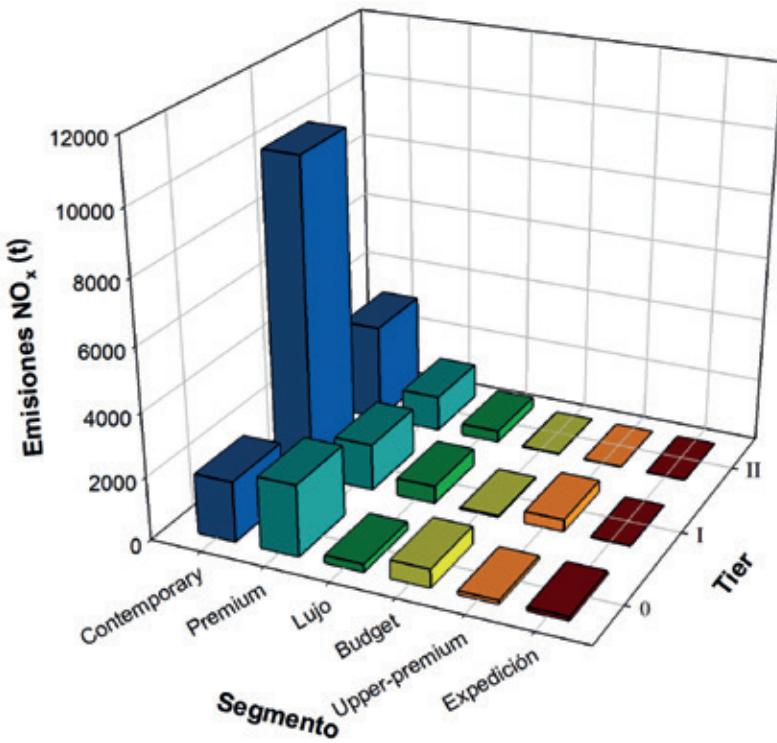


Figura 3.2. Distribución de las emisiones de NOx por Tier y segmento asociado a las rutas de cruceros analizadas. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los efectos ambientales del transporte marítimo y la urgencia para reducir las emisiones de NOX, es vital disponer de medios fiables y sencillos para evaluar de forma precisa estos contaminantes de los buques.

En esta sección se presentan un conjunto de fórmulas paramétricas que correlacionan las emisiones de NOX con características básicas del buque, como el arqueo bruto y el número de pasajeros, desarrolladas en base a la flota analizada. Las ecuaciones proporcionan las emisiones de NOx por milla navegada, ofreciendo un método sencillo y eficaz para evaluar el cumplimiento del nivel de emisión y permitiendo una estimación rápida de las mismas sin necesidad de tener información sobre la planta propulsiva.

Estas expresiones permiten además comparar diferentes buques y rutas con el fin de obtener una reducción más efectiva de la huella ambiental en el sector de cruceros.

$$\text{Emisiones}_{\text{TIER}0}=0,0019 \cdot \text{GTs}^{0,8166} \cdot \text{Pasajeros}^{0,0172}, \quad (3.1)$$

$$\text{Emisiones}_{\text{TIER}I}=0,0119 \cdot \text{GTs}^{0,6518} \cdot \text{Pasajeros}^{0,0361}, \quad (3.2)$$

$$\text{Emisiones}_{\text{TIER II}}=0,0180 \cdot \text{GTs}^{0,5701} \cdot \text{Pasajeros}^{0,0670}, \quad (3.3)$$

$$\text{Emisiones}_{\text{TIER III}}=0,0013 \cdot \text{GTs}^{0,5253} \cdot \text{Pasajeros}^{0,2627}. \quad (3.4)$$

En las expresiones proporcionadas para obtener los kg de NOx emitidos por milla asociados a los buques analizados en función del régimen regulador de emisiones, los valores de los exponentes en las variables de arqueo bruto y número máximo de pasajeros determinan su influencia relativa.

En todos los casos, las emisiones se incrementan con el arqueo bruto del buque siendo menos importante el efecto del número máximo de pasajeros.

Conforme se analizan buques que cumplen regulaciones más estrictas, se puede observar cómo el efecto del arqueo bruto va teniendo cada vez menos peso, ganando relevancia el efecto de la variable de máxima capacidad de pasajeros. Por el contrario, el número máximo de pasajeros cobra mayor

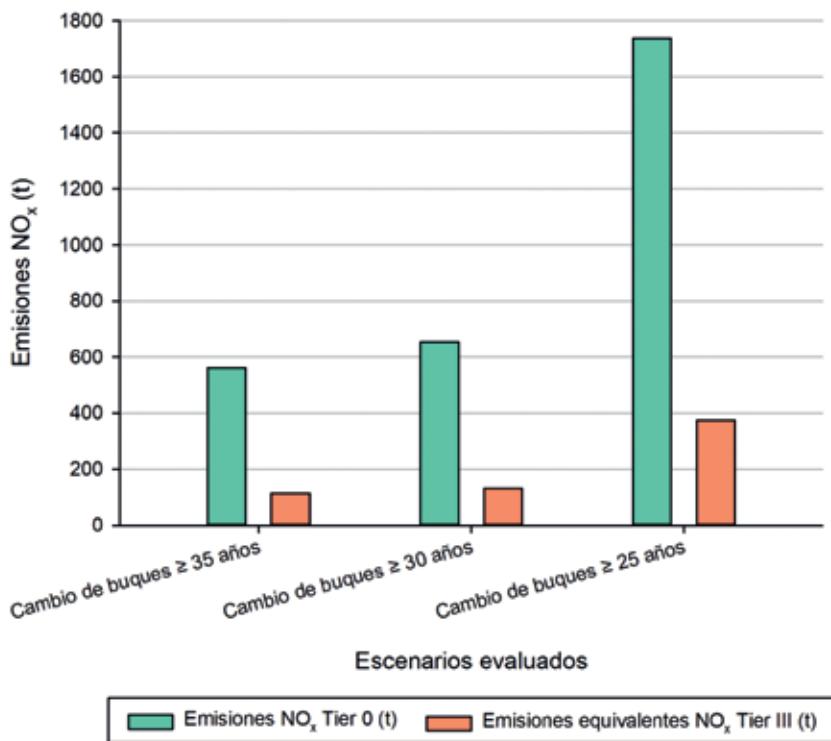


Figura 3.3. Distribución de las emisiones de NOx para los 3 escenarios considerados cambiando los buques Tier 0 del segmento contemporary. Fuente: Elaboración propia.

fuerza conforme se mejora el nivel tecnológico de los motores. En todos los casos el efecto de los pasajeros es poco relevante, salvo en las emisiones TIER III, donde su efecto es relativamente importante.

Las variaciones en los exponentes reflejan el mayor desarrollo tecnológico y las regulaciones más estrictas con cada nuevo TIER, lo que reduce la dependencia de las emisiones con el tamaño del buque aumentando la influencia de la capacidad máxima de pasajeros en las emisiones de NOx.

Los resultados de este estudio muestran la importancia de la regulación ambiental en la reducción de las emisiones de NOx en el sector de cruceros. Si se hubiesen aplicado la limitación TIER III en el Mediterráneo se habrían alcanzado reducciones notables, sobre todo en aquellas rutas con mayor densidad de tráfico, como Palma de Mallorca – Barcelona o Barcelona-Marsella. En estas rutas se hubiera conseguido una reducción de hasta el 37,5%. Sin embargo, estas medidas vienen

condicionadas por la edad de la flota debido a que una gran parte de los buques analizados operan bajo regulación TIER 0 o TIER I. Por lo tanto, no solo es necesario implementar una NECA sino también fomentar la renovación de la flota, adoptar tecnologías alternativas como el GNL, el hidrógeno o sistemas de reducción catalítica selectivos para utilizar buques más eficientes y con bajo nivel de emisiones.

Otro de los resultados relevantes son las expresiones analíticas para estimación de las emisiones de NOx en base al arqueo bruto de los buques y la capacidad de pasajeros. Estas ecuaciones muestran que conforme se avanza hacia regulaciones más estrictas, el arqueo bruto pierde peso, justo al contrario de lo que ocurre con el número de pasajeros. Esto denota un aumento significativo en la tecnología de los motores y sistemas de propulsión lo que, a su vez, permite reducir la dependencia del tamaño del buque en la generación de emisiones. Sin embargo, la reducción de emisiones en rutas de alta

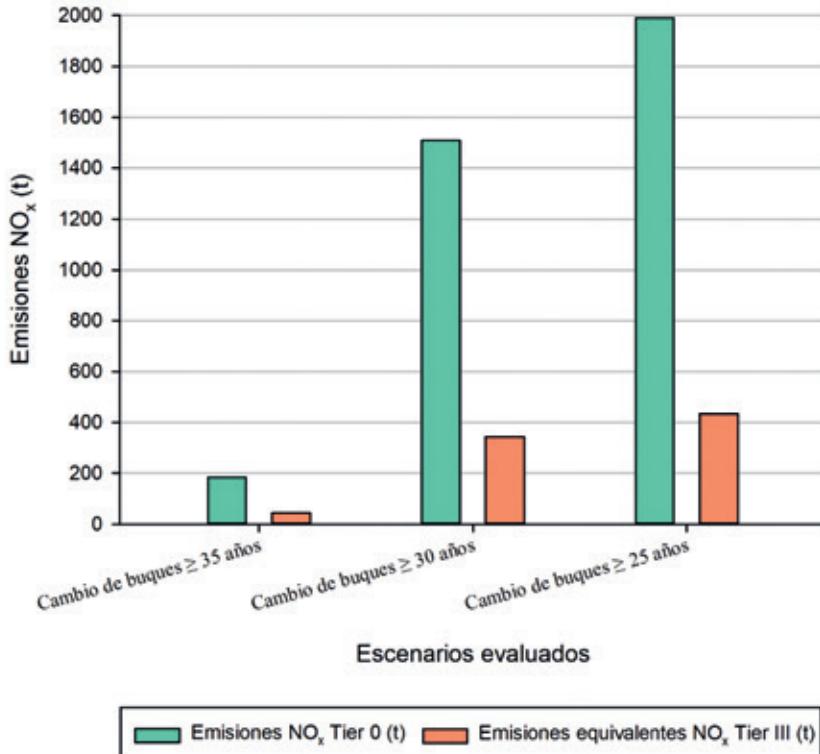


Figura 3.4. Distribución de las emisiones de NOx para los 3 escenarios considerados cambiando los buques Tier 0 del segmento premium. Fuente: Elaboración propia.

densidad estará muy afectada no solo por la regulación aplicable sino también por los incentivos aplicados para el uso de tecnologías limpias y el uso optimizado de la flota en base a su nivel de eficiencia en emisiones.

4. CONCLUSIONES

En esta comunicación se muestra el impacto significativo que tendría la designación del mar Mediterráneo como zona de control de emisiones de NOx (NECA). El cálculo de emisiones está basado en las navegaciones durante el 2019. Si se hubiera aplicado el TIER III a aquellos buques con puesta de quilla posterior a 2016, se hubieran podido reducir las emisiones de NOx en la zona en un 8%. Este nivel de reducción se podría haber elevado hasta un 16,6% en caso de haber adoptado otra serie de medidas como es la renovación de la flota. Estas cifras ponen de relieve la importancia de las políticas reguladoras más estrictas para reducir el impacto ambiental del tráfico de cruce-

ros convergiendo con los objetivos globales de reducción de emisiones de la Organización Marítima Internacional y el Acuerdo de París.

Así como, con las medidas regulatorias que se están implantando a nivel europeo como el Monitoring, Reporting and Verification Regulation (MRV Regulation) o la inclusión del transporte marítimo en el EU ETS. En el caso de este último, a partir de 2026 ya gravará también las emisiones de NOx de los buques de más de 5.000 gt.

Las ecuaciones de predicción de emisiones presentadas proporcionan una herramienta útil y rápida para estimar las emisiones de NOx por milla navegada sin más que conocer el arqueo bruto del buque y la capacidad de pasaje máxima. De esta forma, se puede obtener la emisión de NOx sin necesidad de conocer los datos del motor del buque. Conforme se avanza en regulaciones más estrictas, el arqueo bruto del buque pierde

importancia siendo el número de pasajeros un aspecto cada vez más relevante.

De este trabajo pueden derivar varias líneas futuras de investigación. Entre ellas destacan, el impacto de las emisiones del NOx sobre el flete del buque al aplicar las tasas del EU ETS a partir de 2026. También, llevar a cabo simulaciones integrando la renovación de flota con la actual cartera de pedidos de buques de crucero y la consiguiente sustitución de buques Tier 0.

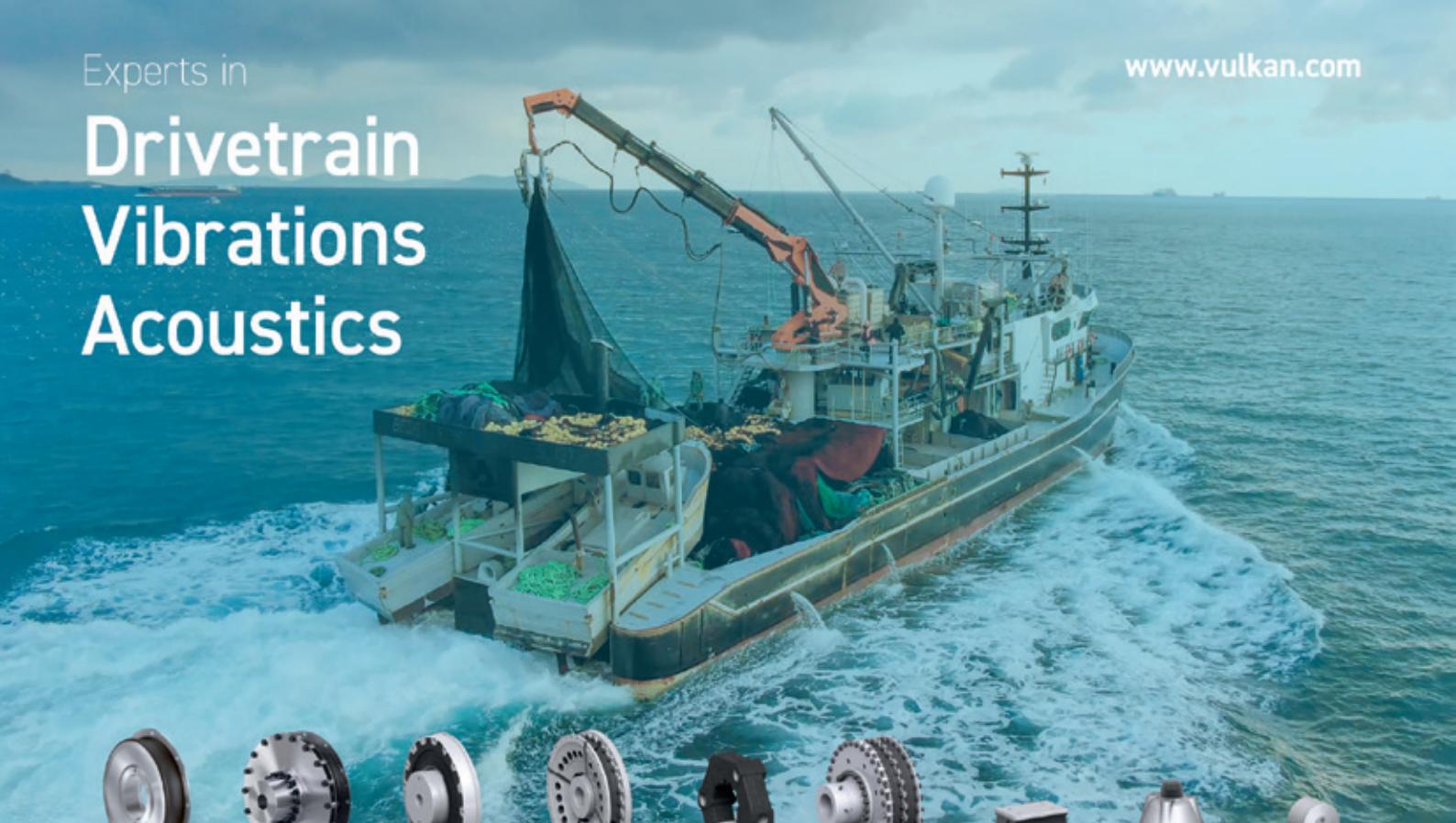
5. REFERENCES

- [1] OMI (Organización Marítima Internacional). 2021. Fourth IMO Greenhouse Gas Study. IMO: London.
- [2] Comisión Europea (CE). 2024. Reducing emissions from the shipping sector. Available at Reducing emissions from the shipping sector - European Commission. Accessed 15 January 2025.
- [3] Chen, L., Yip, T.L., Mou, J., 2018. Provision of Emission Control Area and the impact on shipping route choice and ship emissions. *Transport. Res. Transport Environ.* 58, 280 – 291.
- [4] CLIA (2023). Charting the Future of Sustainable Cruise Travel. CLIA, Washington.
- [5] CLIA. 2024. State of the Cruise Industry Report. Washington: CLIA.
- [6] MedCruise. 2023. MedCruise Statistics 2022. Santa Cruz de Tenerife, Spain: Medcruise.
- [7] MedCruise. 2024. MedCruise Statistics 2023. Santa Cruz de Tenerife, Spain: MedCruise.
- [8] Puertos del Estado. 2025. Monthly Statistics of Port Traffic December 2024. Madrid: Puertos del Estado.
- [9] OMI (Organización Marítima Internacional). 2022. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). Consolidated Edition 2022. London: IMO.
- [10] Topic, T., Murphy, A. J., Pazouki, K., Norman, R. 2023. NOx Emissions Control Area (NECA) scenario for ports in the North Adriatic Sea. *Journal of Environmental Management*, 344, 118712. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118712>.
- [11] Chen D., Zhao Y., Nelson P., Li Y., Wang X., Zhou Y., Lang J., Guo X. 2016. Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin, China, *Atmospheric Environment*, 145, 10 – 18. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.086>.
- [12] Gan L., Che W., Zhou M., Zhou C., Zheng Y., Zhang L., Rangel-Buitrago N., Song L. 2022. Ship exhaust emission estimation and analysis using Automatic Identification System data: The west area of Shenzhen port, China, as a case study, *Ocean & Coastal Management*, 226, 106245. <https://doi.org/10.1016/j.ocgeoaman.2022.106245>.
- [13] Toscano D., Murena F., Quaranta F., Mocerino L. 2021. Assessment of the impact of ship emissions on air quality based on a complete annual emission inventory using AIS data for the port of Naples, *Ocean Engineering*, 232, 109166. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109166>.
- [14] Dragović B., Tzannatos E., Tselenitis V., Meštrović R., Škurić M., 2018. Ship emissions and their externalities in cruise ports. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, Part B, 289 – 300. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.11.007>.
- [15] Murena F., Mocerino L., Quaranta F., Toscano D., 2018. Impact on air quality of cruise ship emissions in Naples, Italy, *Atmospheric Environment*, 187, 2018, 70 – 83. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.056>.
- [16] Backer, H. 2018. Regional work on prevention of pollution from ships in the Baltic Sea – A paradox or a global forerunner? *Marine Policy*, 98, 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.09.022>.
- [17] Howitt, O.J.A., Revol, V.G.N., Smith, I.J., Rodger, C.J. 2010. Carbon emissions from international cruise ship passengers' travel to and from New Zealand, *Energy Policy*, 38 (5). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.050>.
- [18] Ay, C., Seyhan, A., Beşikçi, E.B. 2022. Quantifying ship-borne emissions in Istanbul Strait with bottom-up and machine-learning approaches, *Ocean Engineering*, 258, 111864. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111864>.
- [19] Winther, M., Christensen, J.H., Plejdrup, M.S., Ravn, E.S. Eriksson, Ó.F., Kristensen, H.O. 2014. Emission inventories for ships in the arctic based on satellite sampled AIS data, *Atmospheric Environment*, 91, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.006>.
- [20] Peng X., Wen Y., Wu, L., Xiao, C., Zhou, C., Han, D. 2020. A sampling method for calculating regional ship emission inventories, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 89, 102617. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102617>.
- [21] Yeo, S., Kuk Kim, J., Choi, J.-H., Lee, W.-J. 2024. Estimation of greenhouse gas emissions from ships registered in South Korea based on activity data using the bottom-up approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 238(4), 738–749. <https://doi.org/10.1177/14750902241230354>
- [22] Olmer, N. et al., 2017b. Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013-2015: Detailed methodology, Washington DC: International Council on Clean Transportation (ICCT).
- [23] Royal Institution of Naval Architects (RINA). Significant Ships; RINA: London, UK, 2023.
- [24] Vessel Finder. Vessels Database. Available online: <https://www.vesselfinder.com/vessels> (accessed on 23 April 2024).

Experts in

www.vulkan.com

Drivetrain Vibrations Acoustics



VULKAN

VULKAN Española

Avda. Montes de Oca, 19 - Nave 7 | 28703 SS Reyes (Madrid)
Phone +34 91 359 09 71 | es.info@vulkan.com



Proteja las entradas de tuberías

Utilice los sellos Roxtec para aplicaciones con tuberías y proteja a las personas y los activos contra factores de riesgo como fuego, agua y gas. Asegúrese de mantener las clasificaciones contra fuego en la cubierta y en mamparos una vez instaladas las tuberías de acero, cobre, plástico y fibra de vidrio. En caso de incendio, evite que las llamas se propaguen al utilizar nuestros sellos para tuberías de plástico. En caso de tuberías metálicas utilice Roxtec SPM™ que le permitirá realizar el sellado sin necesidad de ninguna soldadura.

- Instalación simple y segura
- Asegure una barrera eficiente contra incendio
- Garantice la estanqueidad incluso en caso de incendio
- Reduzca el peso total del barco
- Evite todo el trabajo de soldadura

roxtect.com/es

 Roxtec

Nuevos combustibles renovables y no renovables para submarinos AIP



Por Rafael Gutiérrez Fraile¹

ACLARACIÓN

Las opiniones y recomendaciones contenidas en este informe son estrictamente las del autor y no implican la aprobación o representación de la Armada Española o del resto de sus fuerzas armadas, de la Administración o de empresas del sector. La información relativa al submarino S80+ y otros submarinos se ha obtenido de fuentes públicas o se ha deducido en base a datos publicados. En muchos casos se trata de estimaciones basadas en el conocimiento común de la ingeniería naval.

Sumario / Abstract

Introducción

PARTE 1 – COMBUSTIBLES AIP

Combustibles y portadores de hidrógeno

Oxígeno

Inflamabilidad y toxicidad de los nuevos combustibles

Instalaciones reales: datos y estimaciones de peso y volumen

PARTE 2 – EQUIPOS AIP

Reformadores o disociadores

Reformador para etanol

Reformador de metanol

Metanol sin reformador

Reformador de gasoil

Gasoil sin reformador: motor stirling

Reformador para metano, propano y butano

Disociadores de amoniaco

Resumen sobre reformadores y disociadores

Pilas de combustible

Pilas PEM

Pilas PEMHT de metanol

Pilas de combustible SOFC

Pilas de combustible en buques

Resumen sobre pilas de combustible

Tanques para almacenamiento de gases

Peso y empacho de la planta AIP

Pesos y volúmenes agregados: combustible, LOX, tanques y planta AIP

Resumen del análisis de combustibles

Amoníaco

Gasoil

Propano y butano (GLP)

Metano (GNL)

Metanol

Impacto de aumentar la potencia AIP

¹ Ingeniero Naval, Coordinador de la Comisión de Transición Energética de la Asociación de Ingenieros Navales de España (AINE), Presidente del Comité de Asuntos Marítimos y Marinos del Instituto de Ingeniería de España (IIE), Académico Correspondiente de la Real Academia de la Mar.

Resumen

Hay al menos tres combustibles distintos en uso para los sistemas AIP de submarinos; hidrógeno, gasoil y etanol. Estos combustibles que se emplean en tres configuraciones diferentes: directo a pilas de combustible, directo a motores Stirling/Kockums y directo a pilas de combustible a través de un reformador. Todos estos sistemas datan de hace al menos dos o tres décadas. Al rebuflo de la descarbonización, hay varios combustibles adicionales que han recibido atención de los usuarios marinos: gas natural, LPG, metanol y amoniaco. Los tres primeros ya están en uso comercial en buques de superficie, mientras el amoniaco se está sometiendo a pruebas con objeto de estar en el mercado en 2026.

El artículo analiza estos combustibles y tecnologías con un mismo conjunto de herramientas teóricas, para comparar los resultados de forma homogénea, tanto en lo referente a la autonomía como a la velocidad en inmersión.

Summary

There are at least three alternative fuels currently in use for the AIP system in naval submarines; hydrogen, diesel oil and ethanol. These fuels are employed in three different configurations: direct to fuel cells, direct to Stirling/Kockums engines and direct to fuel cells via fuel reformers. All these systems date back to at least 2-3 decades ago. In the wake of decarbonization, there are several additional fuels which have come to the attention of marine users in recent years, namely: natural gas, LPG, methanol and ammonia. The first three are already in commercial use in surface ships, while ammonia is having the initial tests before going to the market in 2026.

With this hindsight, and with submarines in mind, the paper analyzes these fuels

and technologies with one single set of theoretical tools, in order to compare the results in a harmonized way, in respect to range and underwater speeds achievable. The results will determine which is the best overall choice of fuel for AIP submarines and whether the decisions made 2-3 decades ago remain valid still today.

Introducción

Han pasado más de dos décadas desde que en España se optó por instalar un sistema de propulsión independiente del aire (AIP) a base de (bio)etanol en sus nuevos submarinos clase S80. El proyecto ha pasado vicisitudes sin cuenta sin haberse completado aun [Ver. Ref. 3] y mientras tanto la tecnología ha seguido evolucionando. A remolque de la necesaria descarbonización del sector marítimo, han aparecido nuevos combustibles que potencialmente podrían servir para un sistema AIP. Igualmente, hace 30 años las pilas de combustible eran un equipo exótico, propio de la ciencia aeroespacial, mientras hoy día ya están presentes en todo tipo de aplicaciones móviles; coches, camiones, maquinaria agrícola, y también en aviones, drones y buques de todo tipo, ya sea para propulsión o para generar electricidad auxiliar.

En este contexto, se considera apropiado hacer una revisión de situación y comparar unos sistemas y combustibles AIP con otros, para evaluar la situación cara al futuro y confirmar o modificar las hipótesis iniciales sobre su viabilidad y competitividad.

PARTE 1 – COMBUSTIBLES AIP

Combustibles y portadores de hidrógeno

Un sistema AIP consume un combustible y oxígeno para generar electricidad. Hay dos

familias de sistemas AIP; con motores térmicos y con pilas de combustible.

Los sistemas que emplean una máquina térmica son tres; el alemán Walther, el francés MESMA y el sueco Stirling-Kockums. Todos ellos queman un hidrocarburo con aportación de oxígeno, produciendo energía mecánica que mueve un generador eléctrico o directamente las hélices.

El sistema Walther es ya una reliquia histórica. Desarrollado por Alemania al final de la 2^a Guerra Mundial, se construyeron algunos submarinos con este sistema, pero no dieron los resultados esperados. Las pruebas realizadas por los aliados tras la guerra mostraron sus defectos, especialmente en seguridad y fiabilidad, por lo que fue rápidamente abandonado. El sistema francés es obsoleto y ya no se usa. Se basa en motores de combustión interna en circuito cerrado. Ninguno de estos dos sistemas se estudiará en lo que sigue.

El sistema sueco se basa en motores de combustión externa y es empleado por varias armadas europeas y por Japón. Es significativo que este último país, tras instalarlo en 10 submarinos, lo ha eliminado en las dos últimas tandas de submarinos que ha puesto en servicio en los últimos 5 años. A pesar de que esto indica su probable obsolescencia, se estudiará en lo que sigue.

Todos los sistemas basados en pilas de combustible funcionan oxidando hidrógeno (H_2) con oxígeno (O_2) y así producir electricidad y agua. Por tanto, necesitan hidrógeno. De los llamados combustibles AIP, la pila de combustible solo aprovecha la energía derivada de su contenido de hidrógeno. No se aprovecha la energía derivada de otros componentes como el carbono o el nitrógeno. Por ello, los combustibles AIP no son más que portadores de hidrógeno. Lo ideal sería llevar H_2 a bordo, pero eso es problemático.

El hidrógeno es muy liviano y transportarlo ocupa un gran volumen, aparte de necesitar instalaciones pesadas y costosas; a 700 bar solo lleva 40kg/m^3 y líquido a -253°C lleva apenas 70kg/m^3 . Hay varias formas más eficientes de transportar hidrógeno que llevan do el propio elemento:

- a. Hidruro de magnesio MgH_2 .
- b. Amoniaco líquido NH_3 .
- c. Hidrocarburos gaseosos; metano, propano o butano, en particular.
- d. Hidrocarburos líquidos; gasoil.
- e. Alcoholes; metanol, etanol y éter dimetílico (DME).

Para extraer el H_2 de estos portadores hay varios procesos:

1. Para el hidruro de magnesio, hay que calentarlo a 285°C y se disocia emitiendo H_2 gaseoso. El magnesio permanece sólido.
2. Para el amoniaco se usa un disociador o cracker, también a base de altas temperaturas y catalizadores, emitiendo una mezcla de N_2 y H_2 .
3. Para los restantes combustibles/portadores, que son todos ellos hidrocarburos, se usa el reformado por vapor de agua, a altas presiones y temperaturas, produciendo una mezcla de vapor de agua, H_2 , CO_2 y CO gaseosos y mucho calor. El CO se elimina con más agua convirtiéndolo en CO_2 . Luego se condensan el agua y CO_2 , dejando un flujo de H_2 limpio. Este sistema tiene el atractivo de que la parte de la energía del combustible que no procede del H_2 se aprovecha -mediante complejos procesos catalíticos- para disociar agua produciendo moléculas adicionales de H_2 , por lo que la producción de H_2 supera al contenido inicial de este elemento en el combustible/portador. Además, el agua que se emplea procede de la que produce la pila de combustible. Por otro lado, algunos reformadores necesitan una aportación de oxígeno.

Tabla 1: Principales portadores de H₂ para el sistema AIP

COMB.	PCI kWh/kg	Fracción H ₂ (*)	Temp. transporte	Presión transporte	Dens. liq. kg/m ³	H ₂ (*) kWh/kg	H ₂ (*) liq. kWh/m ³
Metano (líquido)	13,9	8/16	-163°C	Atm.	423	16,65	7.042
Propano (líquido)	12,9	20/44	-42°C Ambiente	Atm. >8 bar	493	15,14	7.464
Butano (líquido)	12,7	26/58	-0,5°C Ambiente	Atm. >2 bar	582	14,93	8.689
Amoniaco (líquido)	6,25	3/17	-35°C ó Ambiente	Atm. ó 11-19 bar	696	5,87	4.085
Metanol	6,3	6/32	Ambiente	Atm.	792	6,24	4.942
Etanol	7,5	12/46	Ambiente	Atm.	789	8,69	6.856
DME (líquido)	7,9	12/46	-24°C Ambiente	Atm. 6 bar	668	8,69	5.804
Gasolina	12,2	50/114	Ambiente	Atm.	720	14,60	10.512
Gasoil	11,8	74/170	Ambiente	Atm.	850	14,50	12.325
Hidruro de magnesio	n/a	2/26,3	Ambiente	Atm.	1.450	2,53	3.669

(*) incluyendo el H₂ que se genera en el reformado por vapor

Por ello, los combustibles que vamos a considerar son aquellos con la máxima capacidad de transporte de hidrógeno, es decir de energía para el sistema AIP, teniendo en cuenta el H₂ adicional producido en el reformado, según la Tabla 1.

Los hidrocarburos son los combustibles que, en peso, más energía llevan en forma de H₂. A distancia siguen los alcoholes, el amoniaco y por último el hidruro de magnesio. En volumen el orden es similar, aunque los gases GNL/GLP pierden posiciones por su baja densidad.

Algunos combustibles podrían ofrecer ventajas en otros aspectos, aparte de la densidad energética. Por ejemplo:

- El gasoil tiene comunalidad con los diésel-generadores, es líquido, conocido, seguro, poco inflamable, barato y se obtiene en cualquier puerto.
- El amoniaco y el metanol, como se verá más adelante, pueden tener reformadores o dissociadores más pequeños y ligeros, cosa importante en un submarino, y en el futuro pueden estar disponibles en muchos puertos, ya que se están empezando a usar en buques mercantes de forma masiva.
- El hidruro de magnesio es el más sencillo de disociar por calor, sin necesitar un reformador.

- Hay una variante de amoniaco sólido que se disocia por calor y es estable por debajo de 80°C lo que elimina el peligro de fugas durante el transporte.

En cambio, también hay desventajas:

- El metano ocupa mucho volumen, por su baja densidad en forma líquida, y es difícil de transportar; se requiere -163°C a presión atmosférica, siendo inviable transportarlo a presión.
- El amoniaco, propano y butano son gaseosos en condiciones normales, lo que obliga a llevarlos licuados con refrigeración o presurizados en depósitos de formas que no aprovechan bien el volumen disponible.
- El DME no ofrece ninguna ventaja frente al etanol, del que es isómero y es más difícil de transportar ya que es gaseoso en condiciones normales.
- Metanol y amoniaco son tóxicos, especialmente el amoniaco. El metanol es además muy inflamable.
- La gasolina no ofrece ventajas frente al gasoil y es mucho más inflamable.
- El hidruro de magnesio es sólido, su recarga es lenta y necesita instalaciones especiales.
- Tanto el hidruro de magnesio como el amoniaco sólido tienen una capacidad de transporte de H₂ baja, resultando muy pesados y limitando la autonomía.

Este es un cribado preliminar, en situaciones ideales y rendimientos ideales. Más abajo se analizarán condiciones reales.

Oxígeno

El submarino transporta su propio oxígeno para el AIP. Debe llevarse en forma líquida (LOX) a unos 183°C bajo cero, lo cual es bastante complicado y apareja peso y empacho considerables. De hecho, es el principal factor limitante en la capacidad de las instalaciones AIP.

La proporción oxígeno/combustible es muy importante. La proporción estequiométrica es 8/1 en peso relativo al H₂. En realidad, el consumo en una pila de combustible es algo superior y se tomará siempre en este estudio una relación 9/1 que coincide aproximadamente con los datos reales consultados.

El peso y volumen de este O₂ habrá que considerarlo en los cálculos, incluyendo el empacho y peso de los tanques para su transporte. Sin embargo, es independiente del combustible empleado porque las pilas se alimentan siempre con H₂ y su rendimiento se ha considerado igual para todos los combustibles.

La excepción a esta regla se dará cuando se genere la electricidad mediante máquinas de combustión tipo Stirling que necesitan un exceso de O₂ superior al indicado.

Algunos reformadores necesitan aportación de oxígeno adicional. Este es el caso del gasoil y el metanol, y probablemente también del GNL/GPL.

Inflamabilidad y toxicidad de los nuevos combustibles

Algunos de los nuevos combustibles planteados son tóxicos y todos son inflamables en mayor o menor medida. Esto presenta in-

convenientes de diverso grado para unos u otros respecto a su uso en el submarino AIP.

Respecto al riesgo de fuego o explosión, ninguno de estos combustibles lo tiene tan alto como el hidrógeno con que funcionan las pilas de combustible. De los combustibles analizados, los GLN (metano) y GLP (propano, butano) son los más peligrosos, seguido de los alcoholes. El amoniaco es en realidad poco inflamable y muy poco explosivo, por lo que el nivel de seguridad a bordo frente a incendios o explosiones será en general más elevado. Por lo tanto, los riesgos de incendio y explosión para los submarinos no parecen ser significativamente diferentes de los del etanol, es decir, aquellos ya atendidos en el S80+.

Otro riesgo de seguridad es la toxicidad, especialmente para el metanol y particularmente para el amoníaco.

El metanol se ha utilizado como combustible marino en barcos comerciales desde 2016. Los buques que funcionan con metanol acumulan hasta ahora bien más de un millón de horas de servicio. Ni el fuego, la explosión ni la toxicidad parecen haber sido un problema de seguridad significativo.

La mayor toxicidad del amoníaco a menudo se ha mencionado como la principal dificultad para su uso como combustible marino, y especialmente para los submarinos. Hasta la fecha, las medidas de seguridad para el amoníaco en la propulsión de barcos de superficie han sido aprobadas por varias sociedades de clasificación importantes. Se planean las primeras pruebas para la propulsión con amoníaco en un barco comercial para 2026. El despliegue completo de barcos comerciales está planeado para 2027 en adelante. El desarrollo del amoníaco como combustible marino está aproximadamente 10 años detrás del metanol. Con esta calificación, el uso potencial del amoníaco

en submarinos AIP tendría que esperar hasta la próxima década, si es que alguna vez se realiza. Además, para ser atractivo, el amoniaco tendría que ofrecer ventajas muy claras sobre otros combustibles. Más adelante se analizará si esto es lo que ocurre, o no.

Instalaciones reales: datos y estimaciones de peso y volumen

Los cálculos anteriores suponen relaciones ideales, estequiométricas, con rendimientos del 100% en todas las etapas, pero en el mundo real hay rendimientos siempre inferiores a la unidad y no son iguales para todos los combustibles. Se dispone de datos reales para algunas instalaciones en funcionamiento o en proyecto de etanol, metanol, amoniaco y gasoil, como:

- A. El sistema AIP BEST de 300 kW de los submarinos de clase S80+. Un sistema avanzado, desarrollado para esta aplicación militar y que puede considerarse el estado del arte. [Refs. 3, 4]
- B. Un reformador de metanol para submarinos AIP diseñado y probado por el grupo alemán TKMS hace unos 15 años, sin que conste que se haya instalado en submarinos. [Ref. 5]
- C. El sistema Kockums con motor Stirling y combustible diésel, empleado en varias clases de submarinos AIP modernos. [Refs. 8, 9]
- D. El sistema de la empresa Amogy de 200 kW, a base de amoniaco. Está diseñado

para su uso en vehículos de superficie; camiones, maquinaria agrícola, minería o buques. Un sistema comercial que prima la movilidad y el empacho sobre la eficiencia. [Refs. 10, 11]

- E. El sistema de 125 kW a base de amoniaco que se espera desarrollar en el Proyecto Hidram en el que participan empresas españolas y que se completará en 2024 por lo que sus resultados se verán pronto. [Ref. 12]
- F. Un sistema de pilas de combustible PEM de alta temperatura (PEMHT) a base de metanol, propuesto y probado muy recientemente por el grupo naviero Maersk. Potencia probada 200 kW, pero parece ser escalable a 1 MW o más. [Ref. 17]

Con objeto de analizar y comparar en una misma base los resultados con los diferentes combustibles AIP se ha preparado una hoja de cálculo con un balance de energía y consumo para cada combustible considerado.

El rendimiento global (η_t) es el cociente entre la energía eléctrica producida y la energía contenida en el combustible. El rendimiento de reformador (η_r) es el cociente entre la energía del H₂ que sale del mismo y la energía del combustible que entra. El rendimiento de la pila (η_p) es el cociente entre la energía eléctrica producida y la energía del H₂ que entra en la pila.

Los resultados se resumen en la Tabla 2 siguiente:

Tabla 2 – Consumos de combustible reales reportados por las partes interesadas

Combustible	kg/ kWh _e	(η_t)	(η_r)	(η_p)	Datos
Etanol	0,373	36%	65%		Jalvasub
Metanol	0,385	41%	75%		TKMS
	0,437	36%	66%	55%	Maersk
Amoniaco	0,452	35%	64%		Amogy
	0,430	37%	67%		Hidram
Gasoil	0,260	36%	n/a	n/a	Kockums

Tabla 3: Peso y volumen real de combustible y LOX por MWh disponible para AIP

Combustible y desarrollador	Comb. t/MWhe	Oxígeno t/MWhe	Total t/MWhe	Comb. m³/MWhe	Oxígeno m³/MWhe	Total m³/MWhe
Etanol/AIP BEST	0,373	0,491	0,864	0,473	0,431	0,903
Metanol/Maersk	0,437	0,491	0,928	0,551	0,431	0,982
Amoniaco/Amogy	0,550	0,491	1,041	0,790	0,431	1,221
Amoniaco/Hidram	0,430	0,491	0,921	0,618	0,431	1,048
Metanol/TKMS	0,485	0,590	1,075	0,612	0,517	1,129
Gasoil/Stirling	0,260	0,980	1,240	0,306	0,839	1,165
HidruroMg/TKMS	0,710	0,491	1,201	0,568	0,431	0,999

Tabla 4 – Peso y volumen estimado de combustible y O₂ por MWh disponible para AIP

Combustible	Combustible t/MWhe	Oxígeno t/MWhe	Total t/MWhe	Combustible m³/MWhe	Oxígeno m³/MWhe	Total m³/MWhe
Metano/ref.	0,201	0,590	0,791	0,476	0,517	0,993
Propano/ref.	0,217	0,590	0,806	0,440	0,517	0,956
Butano/ref.	0,220	0,590	0,810	0,378	0,517	0,895
Gasoil/FC2G	0,235	0,590	0,825	0,277	0,517	0,793
Metano/SOFC	0,200	0,450	0,650	0,473	0,394	0,867

En cuanto al oxígeno, la aportación de combustible por kWh es la misma en casi todos los sistemas porque depende del rendimiento de la pila y se ha supuesto el mismo para todos y por tanto la misma entrada de H₂ y O₂.

Se exceptúa el sistema Stirling, según datos disponibles, ya que no usa pilas de combustible. A falta de datos, también se añade un extra de oxígeno del 20% para el reformador del sistema TKMS-metanol.

Con estos datos tendremos la Tabla 3.

Este primer cribado indica una ventaja del etanol (AIP/BEST) seguido por los sistemas de metanol y amoniaco que realizan la dissociación catalítica del combustible, sin emplear un reformador.

Empleando un esquema similar se han realizado cálculos estimativos para otros cuatro combustibles ya consolidados como combustibles marinos y que necesitan un reformador: metano, propano, butano y ga-

soil, además de una variante sin reformador usando metano y pilas de combustible de alta temperatura (SOFC) de la que hablará más abajo. Los resultados se indican en la Tabla 4.

Todos estos combustibles podrían ofrecer ventajas frente al etanol, en el supuesto, hipotético, de que se desarrollase un reformador o pilas SOFC eficientes y compatibles en peso y tamaño con un empleo en submarinos.

Puesto en forma gráfica, y tomando como base 100 el sistema de etanol del S80+, tenemos la Fig. 1.

Por tanto, se puede dividir el campo de estudio entre combustibles prometedores, a la izquierda, y menos prometedores, a la derecha.

Falta por ver el impacto de los respectivos sistemas técnicos necesarios; reformadores y asociados, además de las pilas de combustible o maquinas térmicas empleadas. De eso trata la Parte 2 de este análisis.

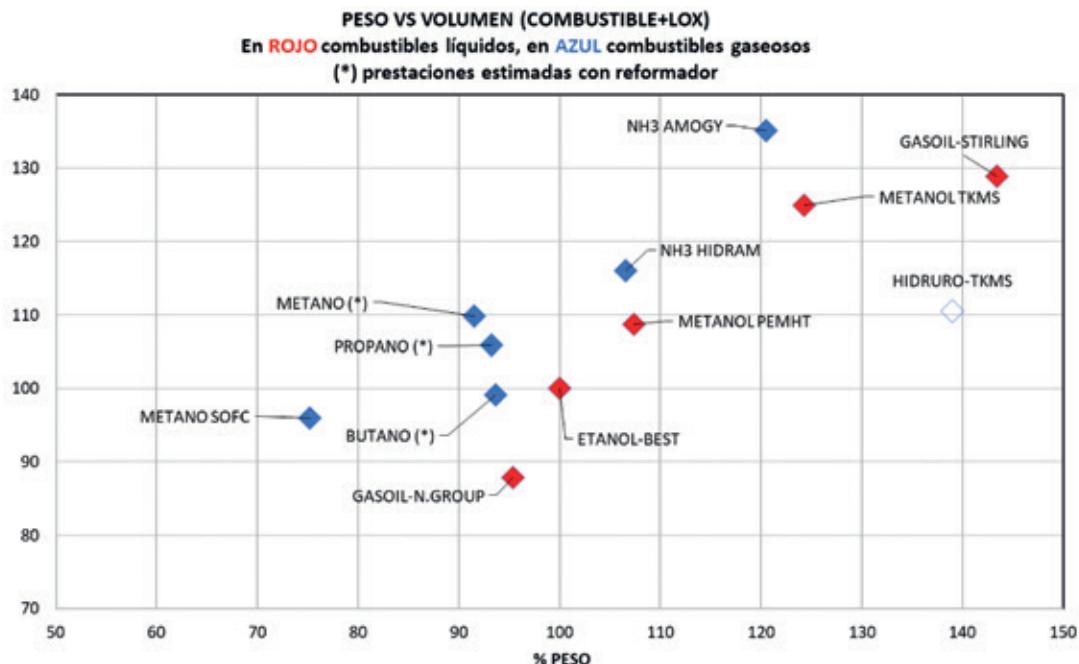


Fig. 1 - Comparación de peso y volumen de combustible y oxígeno de varias alternativas

PARTE 2 – EQUIPOS AIP

Reformadores o disociadores

El pulmón de un sistema AIP es el equipo que extrae el hidrógeno del combustible para alimentar con él la pila de combustible. Hay dos clases que dependen del combustible utilizado; reformadores y disociadores.

El reformador es un sistema que rompe las moléculas de hidrocarburos, separando el hidrógeno, mediante catalizadores y con vapor de agua a altas presiones y temperaturas. Se alimenta con combustible y agua. Se produce H₂ para alimentar la pila de combustible y una mezcla CO₂/CO que en algunos tipos de pila se deben separar para no contaminar la pila. El CO debe primero convertirse en CO₂ mediante vapor de agua y luego se condensa para eliminarlo. El agua procede de la propia pila de combustible.

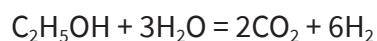
Hay información sobre reformadores para etanol, e información parcial para metanol y gasoil. Se está buscando información sobre posibles reformadores para metano, propa-

no y butano, aunque por el momento se han hecho estimaciones basadas en los arriba citados.

Los disociadores se utilizan para amoníaco y para los hidruros metálicos. Se basan en la aplicación de calor para dissociar las moléculas de NH₃ o de MgH₂. Hay bastante información sobre los sistemas de NH₃ y muy poca para los hidruros.

Reformador para etanol

Para el submarino S80+ y tras un largo y complejo proceso, se ha desarrollado el sistema AIP BEST que incluye un reformador de etanol que trabaja con un proceso que podría resumirse como:



Es un proceso endotérmico por lo que hay que aportar calor en forma de combustible adicional. En el caso del sistema AIP BEST se ha conseguido un rendimiento energético del 65% que debe considerarse excelente. Para ello se aprovecha parcialmente la ener-



Fig. 1 - Comparación de peso y volumen de combustible y oxígeno de varias alternativas

gía residual que no se transforma en H₂, es decir, el otro 35%.

El reformador del S80+ se ha instalado en la sección AIP del submarino, que tiene una planta útil de unos 60 m² y el techo en forma de arco con una altura máxima en el centro de unos 3 m (Fig. 2). En base a las infografías publicadas, puede deducirse aproximadamente lo siguiente:

El reformador y el sistema de eliminación de CO₂ ocupan unos 20 m², que sumando la pila y otros sistemas electrónicos y de control totalizan unos 30 m².

La altura media es de unos 1,5 m y, por tanto, el volumen de estos equipos se estima en unos 45 m³. Se desconoce el peso, pero se estima en 18 t (unos 400 kg/m³). El reformador solo y sus sistemas auxiliares tendría un peso de unas 15-16t y un empacho de unos 40 m³. El resto sería la pila; 2-3 t y unos 5 m³.

No es una instalación particularmente compacta, si la comparamos con otros sistemas que se describen a continuación. Por ello, se

considera posible optimizarla y agruparla lo suficiente en un módulo para permitir la instalación en menos espacio, o bien en el mismo espacio, pero con un sistema AIP de mayor potencia.

Reformador de metanol

En los años anteriores a 2010, la empresa alemana HDW, hoy TKMS, experta mundial en submarinos, desarrolló un reformador para metanol adaptado al sistema AIP (Fig. 3).

La Ref. 5 describe este sistema, destinado a los submarinos clase U212, más pequeños que el S80+ y que actualmente usan un sistema AIP basado en hidruros metálicos.

La potencia total de las pilas de combustible es de 240 kW. Afirman que el rendimiento eléctrico es hasta el 60%.

Se indica que en TKMS consideraron también reformadores de etanol y gasoil, pero los descartaron por necesitar temperaturas muy altas (700-850°C) mientras para el metanol basta con 250°C.

La reacción química puede resumirse como:

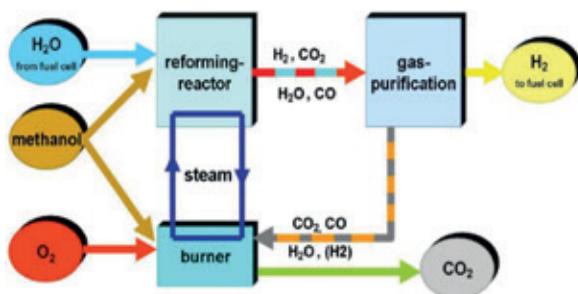
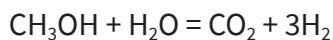


Fig. 3 - Esquema del reformados de metanol de HDW (Ref 13)

El reformador se probó en 2010 conectado a una pila de combustible de submarino, aparentemente con muy buenos resultados en lo referente a la calidad del hidrógeno suministrado. El rendimiento medido como cociente de la H₂ entrante y H₂ saliente superaba el 90%, lo que implica un rendimiento del reformador del 60%.

Además, el sistema tiene un consumo adicional oxígeno, como ya se ha indicado.



Fig. 4 - Módulo de reformador de metanol de HDW (Ref. 13)

El reformador se encapsuló en un módulo apto para un submarino (Fig. 4), cuyas medidas aproximadas -basadas en el tamaño del U212- se estiman en 3x1 m de planta y 3 m

de altura, total unos 9 m³. Esto es la cuarta parte de lo que ocupa el reformador de etanol del S80+.

Sin embargo, finalmente los submarinos U212 y U214 siguieron usando el sistema AIP con hidruros metálicos. Se desconoce el motivo de no haber utilizado este sistema de metanol a pesar de los resultados aparentemente muy positivos. O quizás no lo fueron tanto.

Metanol sin reformador

Informaciones muy recientes (verano 2024) indican que la naviera danesa Maersk con el especialista en pilas de combustible Blue World Technologies han puesto a punto pilas de combustible PEM de alta temperatura (PEMHT) de 200 kW que usan metanol directamente, sin reformador. Estas pilas se describirán en más detalle en el apartado de pilas de combustible más abajo.

Reformador de gasoil

En 2019, la empresa francesa Naval Group publicó los resultados [Ref. 6] de un reformador de gasoil, para integrarlo en su sistema AIP de 2^a generación llamado FC2G destinado reemplazar es sistema MESMA en submarinos no nucleares, principalmente los tipos Scorpene y Barracuda.

Se eligió el gasoil como combustible más idóneo frente a otras alternativas porque “tiene el más alto punto de ignición, reduciendo el riesgo de incendio (seguridad), es el menos tóxico para exposición de la tripulación (seguridad), es fácil de manejar en operaciones de carga y descarga a bordo (seguridad/logística) y las tripulaciones saben cómo se utiliza a bordo (seguridad/adiestramiento). Además, tiene mejor respuesta y densidad de hidrógeno (prestaciones) y está disponible globalmente con alto grado de pureza (logística/operaciones), entre otros atractivos”.

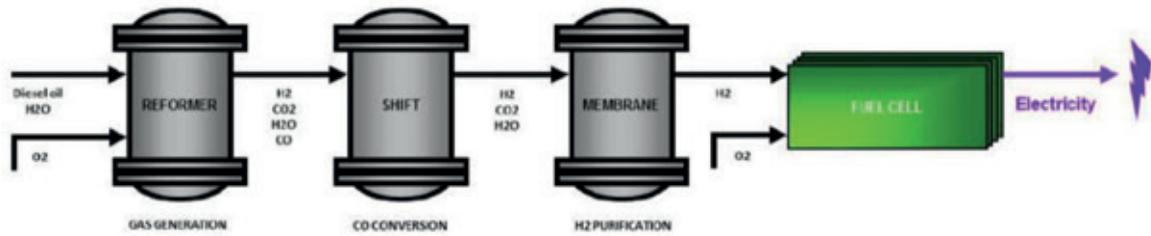
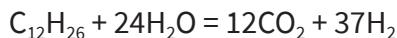


Fig. 5 - Esquema de funcionamiento del FC2G de Naval Group

El proceso se esquematiza en la Fig. 5.

La reacción química resumida sería:



Se reporta que se probó en 2019 un sistema a escala natural durante 18 días en condiciones similares a las de un submarino en inmersión, con resultados plenamente satisfactorios. Posteriormente, se han registrado 6.000 horas de operación en varios escenarios operativos sin incidentes señalables.

El módulo FC2G se ha empaquetado en una sección de unos 8 m de largo y un perfil adaptado a cascos circulares de 6m de diámetro o superior (Fig. 6).



Gig. 6 - Sistema FC2G de Naval Group (Ref 15)

Se compone de dos secciones, el módulo de oxígeno y el módulo de energía, que contiene

el reformador, el reactor de cambio de fase (eliminación de CO), la membrana de purificación y la pila de combustible PEM. Todo ello está integrado en una estructura común sobre soportes elásticos, para minimizar la firma acústica. La circulación proa-popa se hace por el costado del módulo.

El módulo con todo el sistema, incluyendo el tanque de O₂ tiene una longitud de 8,3 m y se supone que cabe en un casco circular de 6m de diámetro. Sin el O₂, la longitud es de unos 4,5 m. La planta son unos 14 m² y el volumen del módulo estima en unos 64 m³ incluyendo un pasillo interno para mantenimiento. En empacho y probablemente en peso, se trata de un volumen 40% mayor el del sistema AIP BEST del S80+ y con una potencia eléctrica 10% inferior.

Pese a la evidente desventaja de empacho y peso, las ventajas del gasoil y de tener un buque unifuel hacen necesario explorar este sistema más a fondo.

Noticias de 2023 [Ref. 7] indican que este sistema, con una potencia de 270 kW, se ha licenciado para su instalación en los submarinos Scorpene para la India, la clase Kalvari, durante la primera revisión que tendrá lugar a partir de 2026 y con colaboración de la industria local. Para ello se alargarán los cascos en 8,3 m.

Gasoil sin reformador: motor stirling

Hay un sistema de AIP que utiliza gasoil y lo quema directamente en una cámara de

combustión, con O₂ añadido, sin necesidad de reformador. Se trata del motor Stirling, de combustión externa, conectado a un generador. Es un sistema muy probado; está instalado en submarinos de Suecia, Japón y otros países. Se han podido recabar datos de este sistema [Refs. 8, 9] incluyendo la Figura 7, que en esencia indican lo siguiente:



Fig. 7.1 - Sistema Kockums Stirling Mark 3 (izda.) (website)

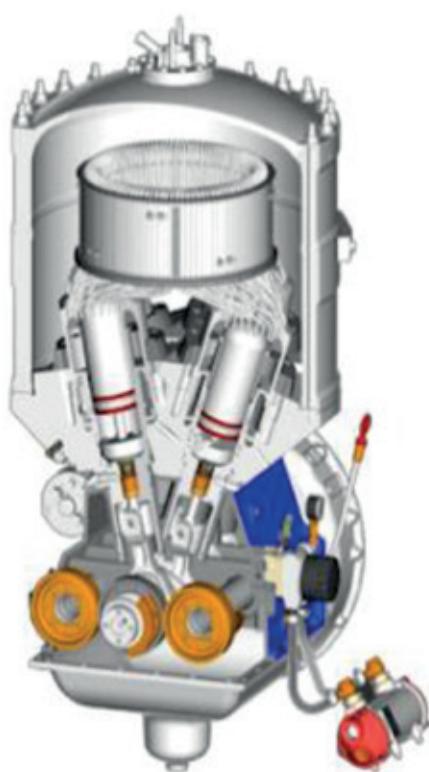


Fig. 7-2 - Sistema Kockums Stirling Mark 5 (dcha.) (website)

1. El sistema AIP Kockums Mark 5 Stirling se basa en un motor bicilíndrico de ciclo Stirling configurado en V que funciona con helio a 140 bar como gas para transferencia de calor.
2. La cámara de combustión trabaja a 20 bar, lo que complica la exhaustación por debajo de los 200 m de profundidad, aunque el problema parece soluble con compresores de gases de exhaustación.
3. El módulo estándar es de 75 kWe con unas dimensiones aproximadas de 2,5x2,5x2,5 y un peso estimado de unos 6.000 kg. Se suelen emplear hasta 4 módulos por buque, como en la clase Soryu de Japón, que suman 300 kW.
4. El consumo de gasoil es de 0,26kg/ kWh, lo que supone un rendimiento de $\eta=32\%$, ligeramente inferior al de los otros sistemas.
5. El consumo de O₂ es muy alto 0,98 kg/ kWe que es más del doble de lo que consumen otros sistemas. Esto es un importante problema, ya que la generalidad de los sistemas AIP están limitados por la cantidad de LOX que se puede llevar a bordo.
6. Se considera un sistema silencioso, a pesar de que tiene trenes alternativos, habiendo tenido resonados éxitos en maniobras con la US Navy.
7. Tras instalarlo en muchos submarinos, la marina de Japón lo ha abandonado para reemplazarlo por baterías de litio.

En conjunto es un sistema bastante pesado y voluminoso, tanto por el equipo AIP como por la carga de LOX necesaria. La decisión japonesa de abandonarlo para sus nuevos submarinos es un indicio de que puede ya ser obsoleto.

Reformador para metano, propano y butano

Hay informes del desarrollo de un reformador para biogás, de proyecto español, que sería también compatible con el metano

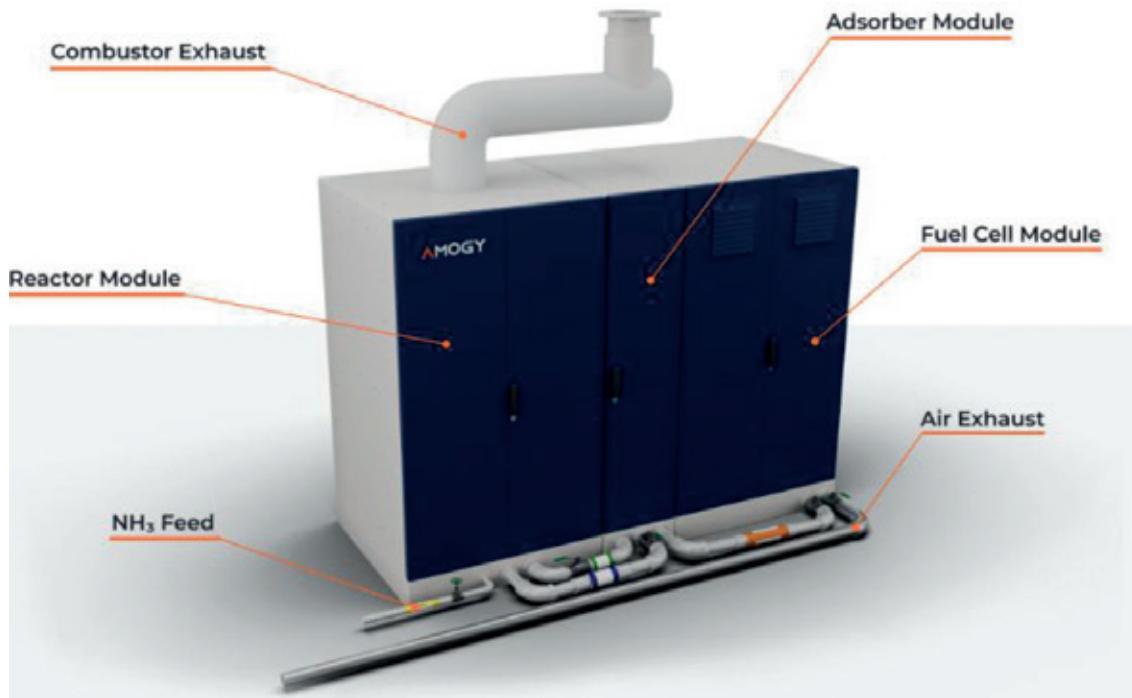
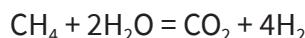


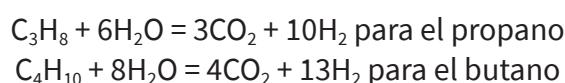
Figura 8 - Módulo de Amogy de 200 kW (Ref. 16)

puro o el gas natural. La reacción con un reformador de vapor sería:



Como aún no se conoce su rendimiento real, se ha supuesto que los reformadores para estos procesos son tan eficaces como el del AIP BEST y el rendimiento es similar (65%). Obviamente, esto puede no ser fácil ni rápido de conseguir, si es que se consigue. Esto dejaría el rendimiento global del sistema AIP en un 36% que es del mismo orden que el del AIP BEST.

Sistemas similares serían necesarios en el caso de usarse otros hidrocarburos, aunque no se conoce por ahora de su existencia o eventuales prestaciones. Las respectivas reacciones químicas resumidas serían:

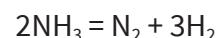


Se aplican los mismos comentarios que para el metano. Se ha supuesto un rendimiento global del 36%. Cuando haya datos más pre-

cisos, se ajustarán los cálculos en consonancia.

Disociadores de amoniaco

Para el amoniaco el proceso es en principio distinto. Se trata simplemente de romper la molécula de NH₃ en una reacción que se resume en:



Para eso no se usa un reformador, sino un dissociador, que es un sistema mucho más simple. La molécula de amoniaco se descompone en presencia de catalizadores con presiones y temperaturas relativamente bajas y con un menor desprendimiento de calor si se compara con los reformadores.

Luego, si se usan pilas PEM, hay que separar el NH₃ residual, lo que se realiza con membranas.

Como consecuencia los dissociadores son más pequeños y ligeros que los reformadores, lo que permite en teoría cargar más

combustible y O₂ o bien instalar sistemas AIP de mayor potencia en el mismo espacio y con el mismo o menor peso. Esta posibilidad y sus eventuales ventajas se analizan en otros apartados de este trabajo.

Hay bastantes datos de un sistema de la empresa americana Amogy, que ofrece un módulo comercial (COTS) de 200 kW para aplicaciones marinas, no submarinos (Refs. 10, 11).

Este módulo de 200 kW (Fig. 8) tiene unas dimensiones muy reducidas, en comparación con los reformadores arriba citados 1,2x2,75 m en planta y 2,2m de altura. Son 3,3 m² y 7,3 m³. El peso del módulo es 4t. La diferencia con los sistemas a base de hidrocarburos es abismal en todos los sentidos.

En la mitad del espacio que ocupan los sistemas AIP BEST o FC2G se podrían poner 3-4 de estos módulos dejando la otra mitad para ampliar la cantidad de combustible y/o O₂. Como contrapartida, este sistema de Amogy usa amoniaco como combustible, un compuesto complicado de usar, por su toxicidad, y porque su transporte requiere tanques a presión o con aislamiento frigorífico, por lo que requiere más espacio que los combustibles líquidos.

Las pilas SOFC pueden quemar directamente amoniaco, que se disocia dentro de la pila por las altas temperaturas (más de 500°C). No se conoce el rendimiento alcanzable en este caso se presupone que será más alto que las pilas PEM de baja temperatura.

Hay datos de otro sistema de amoniaco; el derivado del proyecto español Hidram, cuyos rendimientos son algo mejores que el de Amogy. En cuanto a peso y volumen, se supone que serán también similares. Hay actualmente en España dos proyectos para usar amoniaco en pilas de combustible (Refs. 12 y 13).

Resumen sobre reformadores y disociadores

Los reformadores son más complejos, pesados y voluminosos al aumentar la complejidad de las moléculas de las que se extrae el hidrógeno. Los combustibles con una sola molécula de carbono o nitrógeno, el metanol y el amoniaco, necesitan reformadores más simples e incluso se pueden utilizar directamente en pilas de alta temperatura sin reformador o mediante un disociador más sencillo que un reformador por vapor.

Hay reformadores operativos de metanol, etanol y gasoil específicamente diseñados para submarinos, de los grupos TKMS, Navantia y Naval Group respectivamente. Todos ellos han sido probados a escala natural en tierra y ninguno se ha instalado por ahora en un submarino. De todos ellos, el de TKMS parece en hibernación, el de Navantia (AIP-BEST) está operativo y se está instalando ya en la clase S80+ y el de Naval Group (FC2G) está previsto que se instale en la clase Kalvari de la India cuando llegue su primera gran carena, a partir de 2027.

El peso y empacho del reformador será clave en las comparaciones de peso y empacho total de los diversos combustibles AIP y sus sistemas respectivos, como se verá más adelante.

Pilas de combustible

El corazón del sistema AIP son las pilas de combustible. En este estudio se ha supuesto que todas las alternativas utilizan las mismas pilas de combustible, con el mismo rendimiento y el mismo consumo de oxígeno. El desarrollo de pilas de combustible está evolucionando a gran velocidad. No es lo mismo una instalación comercial (COTS), ya en el mercado, que una en fase de desarrollo a escala industrial, o una aún en fase de laboratorio, digamos el estado del arte (SoA).

Para determinar el peso y empacho de las pilas de combustible se han utilizado datos de equipos comerciales, COTS.

El primer paso [Refs. 14, 15, 16] es determinar cuál es el estado del arte en pilas de combustible para usos comerciales, saber hasta dónde llega la tecnología actual y hasta dónde se podrá llegar en el futuro próximo.

Pilas PEM

El estado del arte comercial (COTS) de las pilas de membrana protónica (PEM), las utilizadas en el S80+, se puede definir con las ofertas comerciales de una empresa como Ballard [Ref. 16] que ha desarrollado productos para aplicación en buques: el módulo FCWave de 200 kW con peso de 1.000 kg y empacho 2,1 m³, ver Fig. 9. Esto son prestaciones de:



Fig. 9 - Módulo Ballard de 200 kW

- 0,20 kWe/kg densidad de energía gravimétrica
- 95 kWe/m³ id. volumétrica
- 476 kg/m³ densidad aparente

Son módulos plug-and-play que por tanto incluyen los elementos auxiliares y de control necesarios, así como el armario que contiene todo. Los módulos pueden conectarse en batería para conseguir potencias superiores. El rendimiento sería hasta 53,5%. La temperatura del refrigerante sería 65°C que no es aprovechable. Estos son los valores que se han tomado para el estudio.

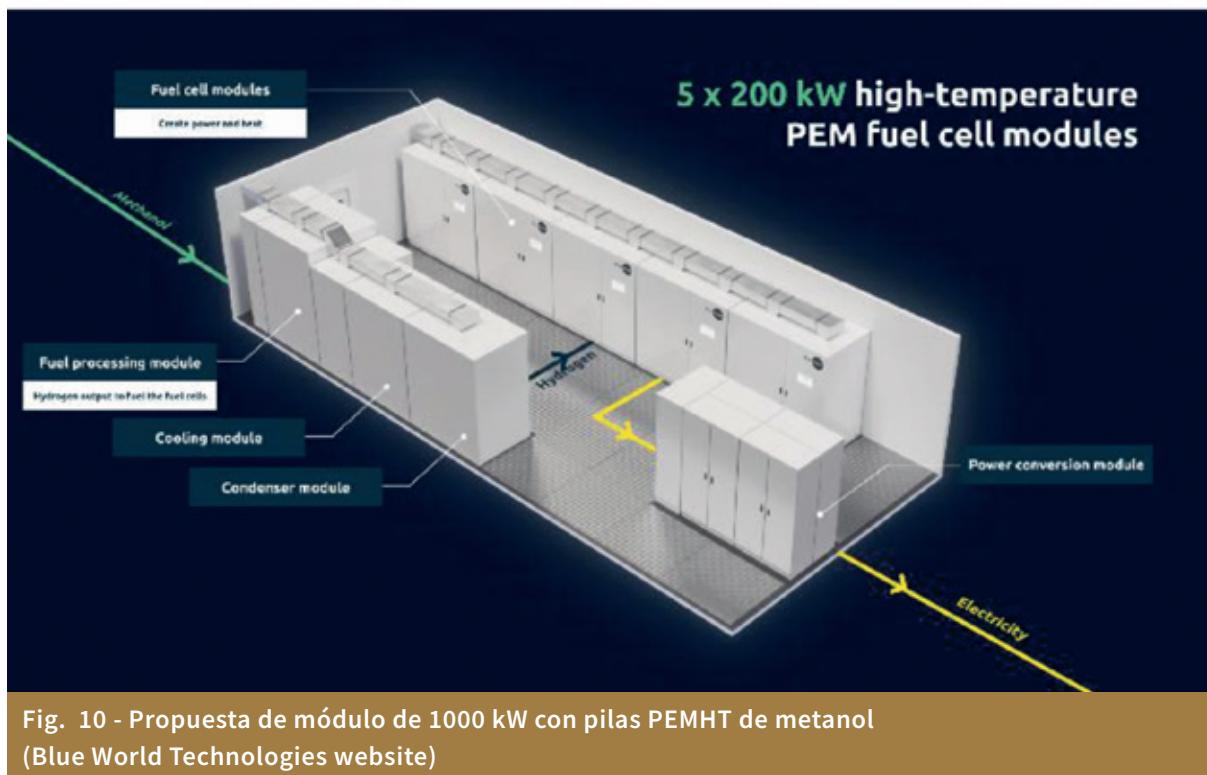
Pilas PEMHT de metanol

Informaciones de prensa recientes (verano 2024) indican que la naviera danesa Maersk en colaboración con Blue World Technologies, han puesto a punto pilas de combustible PEM de alta temperatura de 200 kW que usan metanol directamente, sin reformador [Ref. 17]. Se reportan pruebas a escala real, incluyendo la posibilidad de escalar la potencia rápidamente hasta alcanzar el rango de multi-megavatios para su aplicación en buques.

La Fig. 10 indica un diagrama de un sistema para 1.000 kW (5x200 kW) aunque la existencia de un aparato marcado "hydrogen output to fuel cells" parece indicar que hay un elemento reformador o dissociador y que las pilas se alimentan con H₂, aunque quizás con requisitos de pureza menos exigentes. Son temas que habría que aclarar.

Las pilas PEMHT producen agua a 150°C y en cantidad considerable, lo cual permitiría alimentar un recuperador como los que se describen más abajo, recuperando más del 10% de esa energía residual aumentando la producción eléctrica y por ende la autonomía.

Pero lo más importante es que, según indican, la instalación de un módulo de 1.500 kWe



podría hacerse dentro de un contenedor ISO de 40' y podría alcanzar el nivel comercial en 2027. Eso supone una superficie inferior a 30 m² y un volumen inferior a 70 m³, lo cual es compatible, redistribuyendo los componentes, con el espacio AIP disponible en el submarino S80+.

Por tanto, habría que considerar que sistemas AIP de hasta 1,0-1,5 MW a base de metanol y compatibles con el submarino S80+ podrían estar disponibles a corto-medio plazo.

En el artículo de Maersk se habla de llegar a un rendimiento del 55% pero no está claro sobre qué base de cálculo, cuando los sistemas con reformadores están en 36-41%.

Será importante aclarar si las pilas PEMHT pueden superar esos valores de forma significativa, porque, como se ha visto arriba, la mejora de rendimiento AIP es equivalente a un aumento de la energía AIP disponible; más kWe con la misma cantidad de combustible y LOX.

Pilas de combustible SOFC

Para ciertos combustibles podría interesar emplear pilas de óxido sólido (SOFC) que son más tolerantes a ciertas impurezas (CO, CO₂) y pueden funcionar directamente con amoniaco ya que se disocia dentro de la pila gracias a las altas temperaturas.

Otro atractivo de las pilas SOFC es la alta temperatura de funcionamiento, que permite aprovechar la energía residual de refrigeración, pudiendo llegar a un rendimiento combinado del 73%. La desventaja es el mayor peso y empacho, que podría compensarse con un menor consumo de combustible.

El nivel COTS de las pilas de óxido sólido (SOFC) se puede definir con las ofertas de BOSCH-CERES [Ref. 18] con un módulo de 100 kWe con rendimiento 60% y con un empacho total de 3 m³ (1x1,5x2). La potencia específica será:

- 0,05 kWe/kg
- 33 kWe/m³

Puede parecer muy baja, pero este módulo incluye un reformador suficiente para la pila SOFC y puede funcionar con biometano o gas natural. Estos módulos también pueden conectarse en batería para dar potencias más altas.

Pilas de combustible en buques

Las pilas de combustible no son novedad en aplicaciones navales y su uso está creciendo con rapidez. Hay ya varios buques en operación, incluso en España, con pilas de combustible de varios cientos de kilovatios para propulsión o usos auxiliares y hay proyectos avanzados para instalaciones en buques con potencias en el rango de megavatios en Europa, América y Asia.

Llegar a los 3.000-4.000 kW distribuidos en varios módulos no parece una quimera sino algo al alcance de la mano. El reparto de la potencia en varios módulos tiene la ventaja añadida de la seguridad, en el caso del submarino AIP, ya que la planta de pilas de combustible se puede distribuir en varios compartimentos separados.

Resumen sobre pilas de combustible

Las pilas de combustible no parecen que sean un problema, ni para un eventual cambio de combustible, ni para un aumento de la potencia AIP. Las pilas SOFC de alta temperatura y especialmente las PEMHT de alta temperatura merecen estudiarse detalladamente, además de las PEM de baja temperatura. Es un tema maduro, pero mejorable.

Tabla 5 - Peso y empacho de los tanques de almacenamiento

Combustibles	Tipo	m ³ bruto/neto	peso extra (t/m ³)
Metano, oxígeno	Criogénico	186%	0,370
Propano, butano, amoniaco	Presurizado	128%	0,275
Propano, butano, amoniaco	Refrigerado	128%	0,272
Etanol, metanol, gasoil	Estructural	102%	0

Tanques para almacenamiento de gases

Varios de los combustibles citados (metano, propano, butano, amoniaco) son gases a presiones y temperaturas normales. Habrá que llevarlos a bordo en estado líquido, por las limitaciones de espacio del submarino.

Esto requiere llevarlos a presión o refrigerados. Las presiones y temperaturas para cada posible combustible se han indicado en la Tabla 1 al principio de este informe.

El metano deberá ser refrigerado y transportado en tanques criogénicos (-162°C). El propano, butano y amoniaco se transportan normalmente presurizados y a temperatura ambiente.

El tanque presurizado tiene la ventaja de no tener evaporación (boil-off), que es una ventaja en un submarino. Sin embargo, requieren una sección cilíndrica, que desperdicia mucho volumen, limitando la cantidad que podría llevarse en un submarino.

En los tanques presurizados se deja un espacio libre del 15% y en los tanques estructurales para líquidos un 2%. Se han tomado datos de tanques comerciales de capacidades 10-30 m³ que son similares a las previstas para un sistema AIP. Los resultados se incluyen en la Tabla 5.

Peso y empacho de la planta aip

Utilizando los datos de las secciones anteriores, se han calculado los pesos totales

Tabla 6: Peso y empacho de instalaciones AIP (estimación propia)

Origen/combustible	kg/ kWe	m ³ / kWe
TKMS/hidruros	14	0,035
Hidram/amoníaco	20	0,049
Amogy/amoníaco	21	0,053
Maersk/Metanol	33	0,049
TKMS/metanol	38	0,096
SOFC/metano	40	0,061
Metano	50	0,124
AIP BEST/etanol	60	0,150
Propano	64	0,159
Butano	77	0,193
TC2G/gasoil	99	0,247
Stirling/gasoil	108	0,271

planta AIP para las combinaciones analizadas. Los resultados comparativos se muestran en la Tabla 6 y la Figura 11 a continuación.

Si solo se considera el equipo relacionado con el AIP, sin incluir el combustible, LOX y los respectivos tanques o contenedores, el sistema AIP más compacto y ligero es el basado en hidruros metálicos (TKMS), ya que

es el más simple. Los sistemas sin reformador, como el amoníaco (Amogy, Hydram), el metano (Bosch SOFC) o el metanol (Maersk PEMHT), también permiten sistemas más compactos y ligeros.

En general, las moléculas más simples; amoníaco, metano y metanol, resultan en plantas AIP más simples y ligeras. Lo contrario ocurre con moléculas más complejas, propano, butano y especialmente diésel. El AIP-BEST basado en etanol está en una posición intermedia.

Pesos y volúmenes agregados: combustible, LOX, tanques y planta AIP

Contando con estos factores, la fotografía final de las comparaciones de pesos y volúmenes necesarios para cada uno de los combustibles analizados y viables es la que se indica en las Figs. 12 y 13, respectivamente pesos y volúmenes que se corresponderían a un sistema AIP de 300 kW con energía AIP para 15 días a plena potencia (108 MWh).



Fig. 11 – Peso y volumen aproximados de una planta AIP de 300 kW (estimación propia)

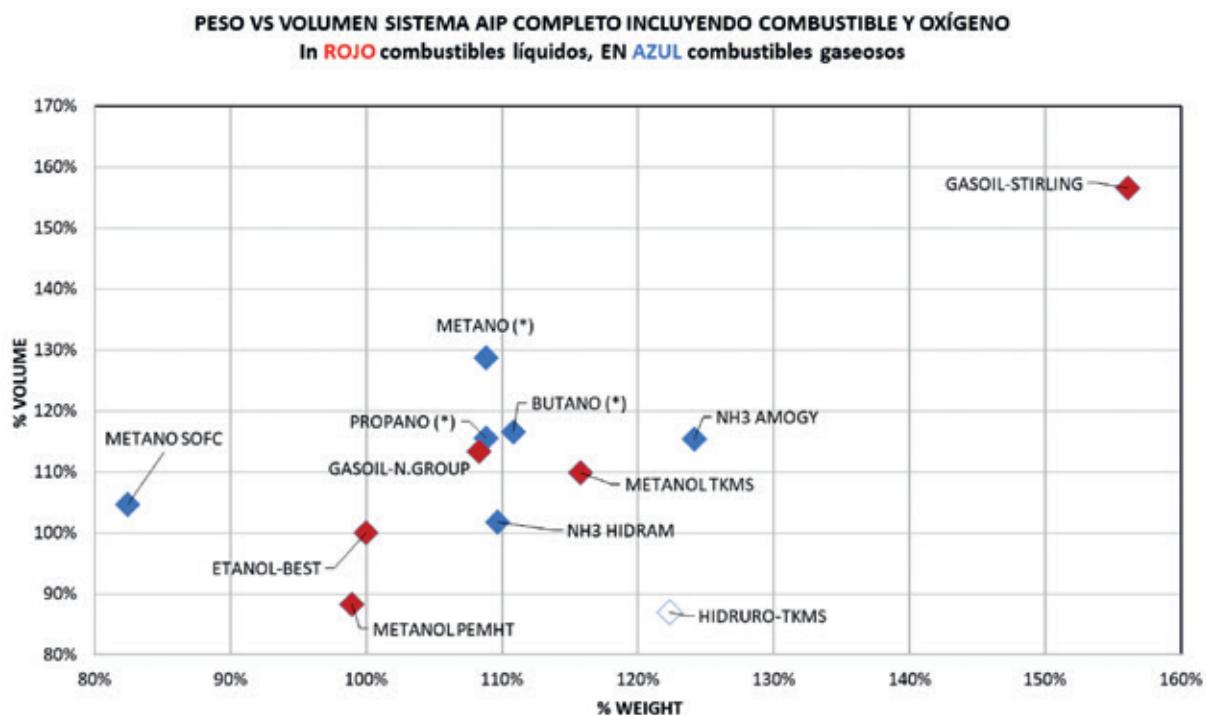


Fig. 12 - Pesos totales del sistema AIP y sus componentes, según el combustible

En razón al peso, para esta configuración de potencia y autonomía pueden descartarse los sistemas de Kockums-Stirling, el de hidruros y los de amoniaco de Amogy, ya que son sustancialmente más pesados que el resto. Como el gasoil, metano, propano y butano con reformador no ofrecen ventajas de peso respecto a los alcoholes y además sus reformadores son por ahora inexistentes o experimentales, tampoco se consideran alternativas a retener.

Finalmente, los sistemas a base de metanol-PEMHT tienen una ligera ventaja estimada de peso frente al etanol, dentro del margen de error del estudio, tan reducida que no justificaría cambiar de un sistema a otro. Solo un sistema metano-SOFC ofrece una alternativa interesante al AIP-BST.

Otra perspectiva del problema es ver la relación entre la capacidad energética del sistema en peso y volumen, la densidad energética gravimétrica y volumétrica, como se muestra en la Fig. 13. Esto es útil para comparar los sistemas AIP con los sistemas de

baterías. Como referencia, los sistemas de baterías más avanzados que están a punto de entrar en el mercado automotriz hoy (enero de 2025) tienen un rango de aproximadamente 400 Wh/kg y 800 Wh/litro, ver Ref. 21.

Las relaciones gravimétricas (Wh/kg) varían ampliamente entre los sistemas AIP. El metano/SOFC supera los 1000 Wh/kg, luego hay una concentración alrededor de 750-850 Wh/kg para varios sistemas: etanol-BEST, metanol-PEMHT, diésel-FC2G y sistemas de GNL/GLP con reformador. Por debajo de eso, están los sistemas de amoníaco, el sistema de hidruros de TKMS y, sustancialmente por debajo, el sistema Stirling-Kockums.

En cuanto a las relaciones volumétricas (Wh/litro), también hay amplias. Los valores más altos, alrededor de 670 Wh/litro, son para los sistemas de hidruros de TKMS y metanol-PEMHT. Luego, hay un grupo alrededor de 500-600 Wh/litro con todos los demás sistemas, excepto Kockums-Stirling, que está alrededor de 375 Wh/litro.

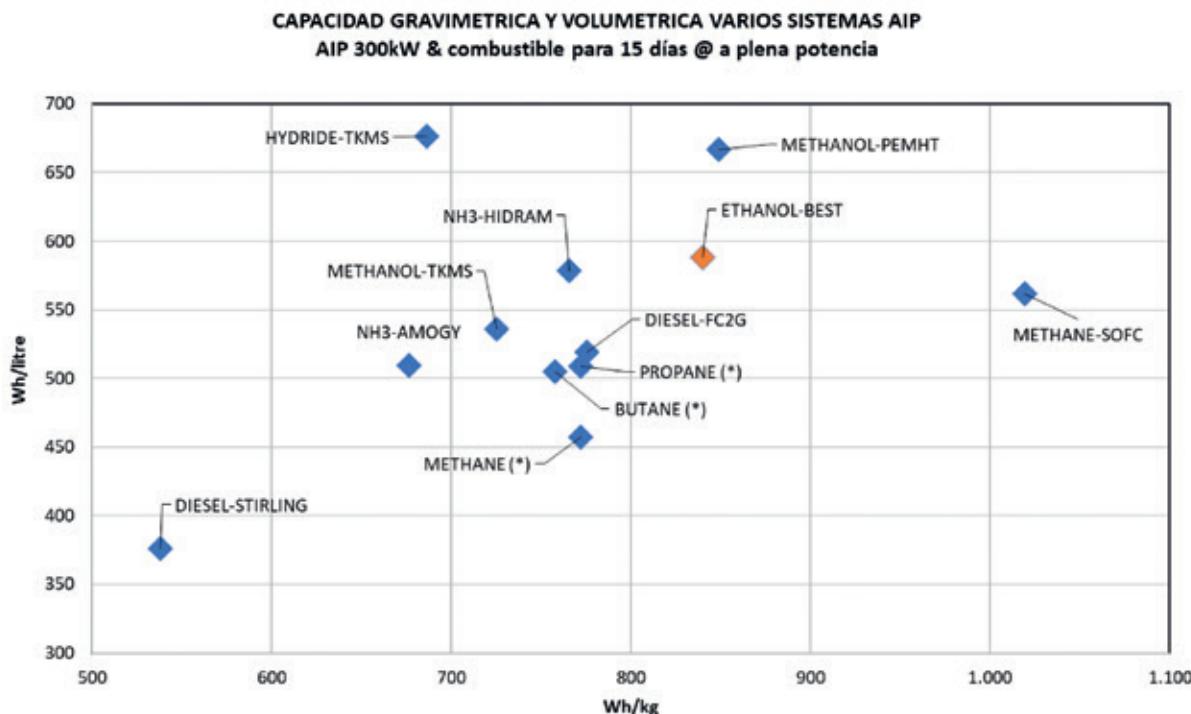


Fig. 13 – Capacidad gravimétrica y volumétrica aproximada de varios sistemas AIP

En cualquier caso, el volumen es menos crítico en las aplicaciones AIP, por lo que el principal factor de competitividad es el peso.

Importante: El sistema AIP-BEST basado en etanol de los submarinos españoles S80+ se clasifica muy bien, en el rango superior de los sistemas existentes y probados.

Para el futuro, el sistema de metano basado en SOFC ofrece una ventaja potencial de peso frente a todas las alternativas mencionadas, con solo un volumen total en la zona promedio. Esta es una alternativa que vale la pena explorar en profundidad.

Por ahora, los sistemas AIP duplican la densidad energética de las mejores baterías lisas para fabricación masiva, las de estado sólido, SSB, y multiplican por 4-5 a las baterías actualmente en uso en submarinos, las de ferrofostato de litio, LFP.

Las distancias se han reducido a menos de la mitad en 5 años. La velocidad de mejora de las baterías es simplemente asombrosa y es

previsible que, en una década, hayan dejado atrás a muchos sistemas AIP. De este tema trata la Ref. 21.

as siguientes secciones resumirán los resultados del análisis de cada uno de los combustibles que han mostrado potencial como alternativas al etanol utilizado en los submarinos españoles. Todos los cálculos y comparaciones son para una potencia AIP de 300 kW y una autonomía de 15 días a esa potencia (alrededor de 108MWh).

Amoníaco

La única ventaja del amoníaco es el pequeño tamaño y peso de los crackers necesarios para alimentar las pilas de combustible, compatibles con aumentos en la potencia AIP con pérdidas mínimas de autonomía. En el lado negativo, hay una alta toxicidad, un alto consumo de combustible en peso y volumen y ser gaseoso en condiciones ambientales (normales), por lo que necesita ser transportado refrigerado o comprimido. Dado que hay otros combustibles que

también requieren sistemas de pequeño tamaño y peso para alimentar las pilas de combustible, prevalecen los aspectos negativos del amoníaco como combustible para submarinos. En principio, puede descartarse.

Gasoil

Las cualidades positivas del diésel como combustible para submarinos son obvias y se han mencionado anteriormente. En cuanto a las dos tecnologías alternativas:

- El gran volumen y peso del sistema Stirling-Kockums lo hacen no competitivo. El hecho de que Japón haya abandonado esta alternativa después de construir diez submarinos con la misma, confirma esta conclusión. En principio, puede descartarse.
- La alternativa francesa FC2G tiene un peso y volumen similar al sistema de etanol. Sin embargo, la composición de peso y volumen no es la misma. FC2G necesita un reformador más pesado, pero menos combustible, ya que la densidad energética del diésel es el doble que la del etanol. Por lo tanto, el diésel sería una buena alternativa si se requiere una mayor autonomía AIP, con la misma potencia AIP, pero una mala elección si se necesita más potencia AIP (i.e. más velocidad en inmersión).

Propano y butano (GLP)

No ofrecen una ventaja significativa en comparación con el etanol o el metano, mientras que los respectivos reformadores aún están por desarrollarse. Hasta ahora, son solo propuestas teóricas. En principio, pueden descartarse.

Metano (GNL)

En el lado positivo, en combinación con pilas de combustible SOFC, el metano (GNL) ofrece un peso mucho menor y un volumen similar, tanto en maquinaria como en peso de combustible, en comparación con el etanol. Como

se detalla más abajo, se podría utilizar para aumentar significativamente la potencia AIP, sin cambiar la cantidad de energía AIP transportada, en el mismo espacio y con la misma asignación de peso -todo incluido- que una planta de etanol de 300 kW. En el lado negativo, su transporte necesita temperatura criogénica (-162°C) con tanques prismáticos y aislamiento grueso que, junto con su baja densidad, requiere tanques con un volumen aproximadamente un 25% mayor que el etanol para la misma reserva de energía o autonomía. La sección AIP tendría que ser rediseñada; sobre cubierta con la nueva maquinaria, bajo cubierta combinando el tanque de LOX y los tanques de GNL, ya sea lado a lado o separados de proa a popa. Una verificación rápida indica que hay suficiente volumen para esto en el S80+ o submarinos similares.

Metanol

La principal ventaja del metanol radica en ser líquido en condiciones normales y el reducido tamaño y peso de la maquinaria requerida. La principal desventaja es la toxicidad, aunque no es tan peligrosa como el amoníaco. De las dos alternativas analizadas, TKMS con reformador es ligeramente más pesado y ocupa un volumen similar al AIP-BEST. Con pilas de combustible PEMHT, el sistema es solo ligeramente más ligero y aproximadamente un 10% menos voluminoso que una planta de etanol de similar potencia AIP y autonomía. El menor peso de ambas plantas de metanol -sin contar el combustible y LOX- puede ser una ventaja en caso de necesitar una mayor potencia AIP, siendo el sistema PEMHT el mejor en eso, como se verá más abajo. Por tanto, el sistema puede ser interesante para altas potencias AIP.

El suministro mundial de metanol, o bio-metanol, estará disponible pronto en muchos puertos porque el metanol está destinado a convertirse en uno de los combustibles marinos principales.

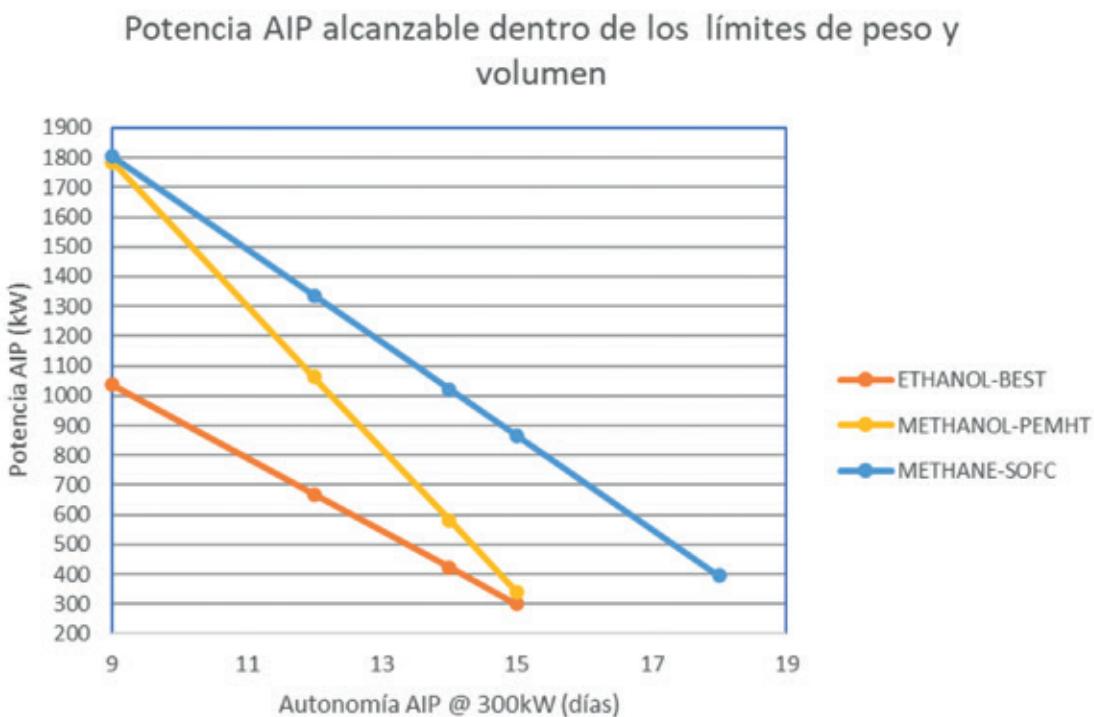


Fig. 14 - Potencia posible dentro del límite de peso total, para varias autonomías (estimación propia)

Impacto de aumentar la potencia AIP

Los submarinos coreanos KSS-III tienen un sistema AIP de hidruro metálico tipo TKMS con una potencia de 600 kW. Esto proporciona ventajas operativas que permiten el uso de AIP a velocidades sostenidas superiores a 10 nudos. Vale la pena analizar esta alternativa en mayor profundidad.

Para analizar el impacto de instalar una planta AIP más potente, se comparan a continuación los mismos sistemas AIP ya analizados; pero con una potencia AIP aumentada a 600 kW, manteniendo la misma reserva de energía AIP, es decir, 108 MWh.

Los cálculos muestran que solo un sistema, el metano/SOFC, tiene un potencial significativo para un aumento considerable de la potencia AIP sin exceder significativamente los límites de peso del sistema básico AIP-BEST. También existe un potencial marginal con el sistema de metanol/PEMHT. Otros combustibles y sistemas no pueden considerarse para aumentos de potencia AIP

compatibles con la autonomía AIP especificada.

Reducir la autonomía AIP libera peso disponible para aumentar la potencia AIP. El modelo facilita una estimación de la potencia AIP máxima posible con una autonomía especificada, como se muestra en la Fig. 14 a continuación para las tres mejores alternativas:

Con una autonomía de 15 días, el sistema de metanol-PEMHT permitiría solo un aumento marginal de potencia y el sistema de metano/SOFC podría permitir un impresionante sistema AIP de 865 kW.

Por el contrario, con 300 kW, utilizando para el combustible y LOX el peso disponible liberado por la planta AIP más ligera, solo el sistema metano/ SOFC podría aumentar la autonomía AIP en hasta 3-4 días aproximadamente.

Por otro lado, el sistema de metanol/PEMHT podría alcanzar 1.000 kW con una autonomía

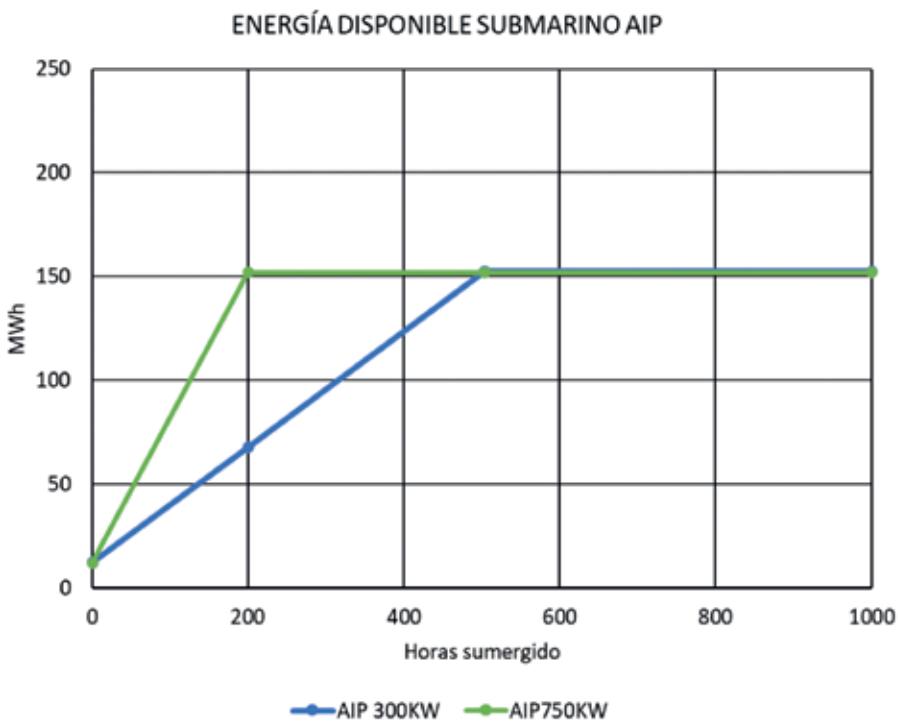


Fig. 15 - Energía disponible con un AIP de 750 kW (elaboración propia)

AIP de unos 12 días y el sistema de metano/SOFC podría hacerlo con una autonomía de 14 días. El sistema básico de etanol de 1.000 kW solo podría llevar combustible AIP y LOX para una autonomía de unos 9 días.

Puede verse que el binomio potencia-autonomía ofrece alternativas poderosas para algunas variantes, en concreto metano/SOFC y metanol/PEMHT, superiores a las posibles con el sistema AIP BEST. Como esto supone un cambio radical, es importante comprobar cuales serían los beneficios reales de aumentar la potencia AIP a cambio de perder autonomía y/o cambiar de combustible y sistema. En todo caso, suponen un rediseño del submarino, lo cual implica que no son aplicables a corto plazo.

Velocidad y autonomía con un aumento de la potencia AIP

Es importante cuantificar las potenciales ventajas de aumentar la potencia AIP, y para ello se ha usado el modelo simplificado descrito en otra publicación del autor (Ref. 20).

En un submarino AIP, la energía anaeróbica disponible sigue el patrón que se muestra en la Fig. 15. Empieza en $t=0$ con la energía de las baterías, aumenta con el tiempo con una pendiente correspondiente a la potencia del sistema AIP, hasta agotar la reserva de combustible AIP y/o LOX. A partir de ese punto, ya es constante.

La pendiente de la línea que une ese punto de encuentro con el origen es la máxima potencia que se puede mantener en inmersión aprovechando el 100% de la energía anaeróbica. Es la llamada “velocidad crítica”.

Si se aumenta la potencia AIP, la energía AIP disponible aumenta más rápido hasta llegar al límite de energía AIP total disponible, que no varía, puesto que depende de las baterías y el combustible AIP, no de la potencia de la planta AIP. Puede verse que la velocidad crítica aumenta sustancialmente.

Sin entrar en detalles, con el sistema simplificado que se describe en la Ref. 20, se ha hecho cálculos aproximados de autonomía

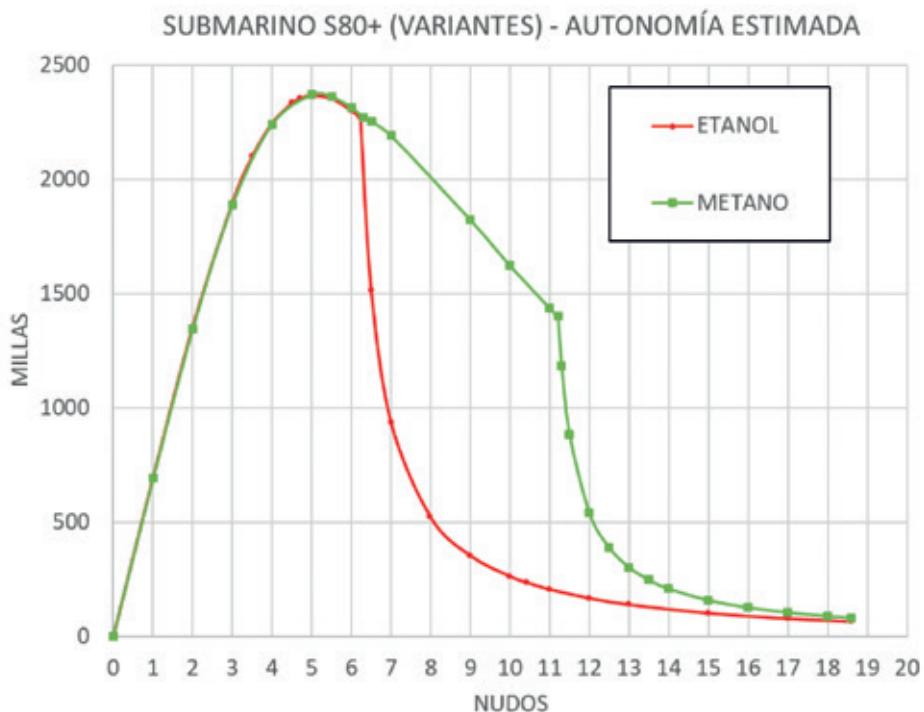


Fig. 16 - Impacto sobre autonomía (millas) de aumentar la potencia del AIP a 866 kW (elaboración propia)

para un submarino del tamaño del S80+ suponiendo un sistema AIP de 300 kW con energía AIP para 15 días y una variante de 866 kW con metano-SOFC y con la misma energía AIP. Ambos tendrían el mismo peso total. El resultado se refleja en la Fig. 17.

La mejora de autonomía con 866 kW de AIP comienza a 6,7 nudos, que es la velocidad crítica con 300 kW. Hasta esa velocidad la autonomía es la misma.

A partir de esa velocidad, la mejora de autonomía con 866 kW aumenta rápidamente, con un pico agudo (>650%) centrado en 11,2 nudos, la velocidad crítica con 866 kW. Tras el pico, la mejora de autonomía desciende rápidamente y a la velocidad máxima “solo” es 20% mayor que con AIP de 300 kW. Por tanto, hay un beneficio claro, aunque sea aplicable principalmente en un rango estrecho de velocidades medias; la autonomía con AIP de 866 kW supera al buque con 300 kW en un 200% o más entre 7 y 13 nudos en inmersión, pero hay ventaja incluso a la velocidad máxima.

Conclusiones

El análisis de un abanico de posibles combustibles y tecnologías de sistemas AIP para submarinos, algunos de muy reciente desarrollo, confirma la continuada vigencia del sistema AIP BEST a base de etanol adoptado para el submarino español S80+ a principios del S. XXI, a pesar de tener ya más de dos décadas desde su concepción.

Aún está entre las mejores opciones y a muy poca distancia de las que pudieran ofrecer mejor potencial si es que se desarrollasen.

Solamente los sistemas basados pilas de combustible SOFC con metano/LNG podrían ofrecer una alternativa digna de estudio, y no necesariamente por ofrecer mayor autonomía, que también, sino por permitir una mayor potencia AIP dentro de los parámetros de peso y espacio del submarino, con importante aumento de autonomía en velocidades medias 7-13 nudos. Esto sería a costa de una importante reingeniería del sistema AIP y toda la rebanada del submarino que lo

contiene, lo que lo excluye como solución a corto plazo.

Lo anterior, junto con la laboriosa puesta a punto del sistema AIP del S80+, apunta a que los sistemas AIP están llegando a un punto asintótico de mejoras, mientras otras tecnologías anaeróbicas como las baterías están dando saltos de capacidad específica de más de un orden de magnitud cada década, lo que las puede acabar posicionando como alternativa viable a los sistemas AIP.

Japón ya parece haber decidido en esa dirección, ver Ref. 21, eliminando el sistema AIP y sustituyéndolo por baterías adicionales en los dos últimos submarinos de la clase Soryu, ya en servicio, y los seis de la clase Taigei, de los que tres están ya en servicio. El estudio de esa variante será objeto de un estudio aparte (Ref. 21).

Referencias

1. Sanjurjo Jul, José Manuel. ¿Podría España tener submarinos de propulsión nuclear? Algunas disquisiciones académicas. Revista General de Marina 2023, p 439 y sigs.
2. 2023-06-28 ¿Podría España tener submarinos de propulsión nuclear? Algunas Disquisiciones académicas - YouTube
3. Submarinos Clase S-80 Plus - Wikipedia, la enciclopedia libre
4. El programa S-80: Dos décadas luchando por mantenerse a flote (revistaejercitos.com)
5. Kummrich, S. Fuel cell methanol reformer for submarines. Proceedings of the World Hydrogen Energy Conference 2010.
6. Vasseur, X. Naval Group achieves breakthrough with its FC2G AIP system. Naval News, 30/07/2019. <https://youtu.be/8rBL54Hdixw>
7. DRDO's Fuel Cell-based Air Independent Propulsion system to soon be fitted onboard INS Kalvari, significantly enhancing its submerged endurance. Nota de prensa de Naval Group, 23/01/2023.
8. Submarine & Other Matters: Kockum's Mark 5 Stirling engine for A26 and Maybe Walrus Replacement (gentleseas.blogspot.com)
9. The Stirling AIP – redefining sea time (youtube.com)
10. Amogy to supply ammonia powerpack to Norwegian owner. Riviera News, 26 Jun 2023
11. Amogy Powerpack Datasheet. <https://amogy.co/products/>
12. Proyecto HIDRAM (hidramproject.com)
13. Proyecto APOLO - Fertiberia
14. World's Largest Marine Fuel Cell Systems | PowerCell Group
15. Naval – JALVASUB Engineering
16. FCwave Spec Sheet (ballard.com)
17. Maersk-backed green methanol fuel cell project presses ahead - Splash247
18. BOSCH-CERES solid-oxide-fuel-cell 100 kW datasheet.
19. Alfalaval.com/products/heat-transfer/power-generator/e-powerpack/
20. Gutierrez Fraile, Rafael. Potencia, energía, velocidad y autonomía AIP. Revista ingeniería Naval, julio-agosto 2025.
21. Gutierrez Fraile, Rafael. Tres submarinos distintos, tres estrategias convergentes; España, Corea del Sur y Japón. Trabajo presentado al 64º Congreso Internacional de Ingeniería Naval, Gijón marzo 2025.

2025 China-Spain Engineering Competency Enhancement Training Program for Engineers



En el marco del Memorando de Entendimiento entre el Instituto de la Ingeniería de España (IIE) y la Chinese Society of Engineers (CSE), se celebró entre los días 5 y 10 de septiembre de 2025 en la ciudad portuaria de Qingdao, provincia de Shandong (China), el China-Spain Engineering Competency Enhancement Training Program for Engineers.

El encuentro tuvo como objetivo reforzar las competencias profesionales de los ingenieros mediante un intenso programa de formación, visitas técnicas y sesiones de intercambio de experiencias, con el lema: "Bridging Engineers from China and Spain Through Engineering, Boosting the Enhancement of Engineering Competency".

Participación de los ingenieros navales españoles

Dentro de la delegación española, representando a la Asociación de Ingenieros Navales y

Oceánicos de España (AINE), asistieron los ingenieros navales Moisés Blanco, Carlos Graña y Adolfo Navarro, quienes compartieron programa y actividades junto con una veintena de ingenieros de distintas ramas procedentes de España y con 25 ingenieros de China.

La participación de los ingenieros navales permitió dar visibilidad al sector marítimo español y mostrar la aportación de la ingeniería naval en ámbitos de innovación tecnológica, sostenibilidad y cooperación internacional.

Desarrollo del programa

El programa incluyó visitas a algunos de los principales referentes tecnológicos e industriales de la región de Shandong, entre los que destacaron:

- Puerto de Qingdao – Terminal automatizada de contenedores, uno de los más avanzados

- del mundo, primer puerto verde de Asia que integra tecnologías Hydrogen + 5G.
- Plataforma COSMOPlat (Haier), reconocida entre otros productos y servicios como referencia mundial en internet industrial e industria 4.0.
 - Planta de desalación Qingdao Bafang, la mayor instalación municipal de China basada en membranas de ósmosis inversa.
 - Universidades y centros de investigación, como la Ocean University of China o el Qilu University of Technology, especializados en monitorización medioambiental marina e instrumentación oceanográfica.
 - Infraestructuras singulares, como el Jiaozhou Bay Cross-Sea Bridge y el Jiaozhou Bay Second Subsea Tunnel, actualmente el mayor túnel submarino en construcción a nivel mundial.

Reflexiones y aprendizajes

Los ingenieros navales asistentes destacan que la experiencia ha permitido comprobar de primera mano la capacidad y potencial de la industria china, constatando que en algunos ámbitos China se encuentra un paso por delante de Europa, particularmente en la integración de la digitalización, las infraestructuras a gran escala y las estrategias de desarrollo a largo plazo.

Asimismo, quedó patente que la gestión de datos e inteligencia artificial, la eficiencia energética, la integración de energías renovables y la respuesta a los retos medioambientales jugarán un papel fundamental en el futuro del desarrollo industrial y geopolítico global.

Participación en el Global Ocean Development Forum

Además de las visitas técnicas y las sesiones del programa, los ingenieros navales españoles participaron en el 2025 Global Ocean



Development Forum, donde se puso en valor el potencial de las empresas españolas vinculadas al ámbito marítimo. En este marco, se presentó el ejemplo de Astilleros Armón, como exponente de empresa que ofrece soluciones y productos de alto valor añadido en el sector de la construcción naval en España.

Agradecimientos

Los participantes desean expresar su agradecimiento al Instituto de la Ingeniería de España (IIE), del que la Asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos de España es miembro, así como a la Chinese Association for Science and Technology (CAST) y a la Chinese Society of Engineers (CSE), por la organización y el excelente acogimiento recibido durante todo el programa.

Conclusión

La participación en este programa ha representado una oportunidad única para estrechar lazos entre ingenieros de ambos países, conocer de primera mano proyectos de referencia internacional y compartir visiones sobre el futuro de la ingeniería. Como subrayan los propios asistentes, en Qingdao no solo se tendieron puentes a través de mares, túneles e infraestructuras, sino también entre personas, conocimientos y oportunidades futuras.

SIKA colabora en la construcción de los cajones portuarios de la nueva terminal de contenedores en Cádiz



Primera Fase (Fase 1.1):

- Objetivo: Establecer la infraestructura portuaria inicial para el traslado de la actividad de contenedores del Muelle Reina Sofía.
- Alcance: Construcción de una superficie de 22 ha, un muelle de 590 metros de longitud con 16 metros de calado, y un dique de abrigo de 320 metros. También incluyó trabajos de dragado.
- Empresas: Adjudicada a una UTE formada por FCC y Acciona para la construcción, y Concasa para la explotación.
- Inversión: 91 M€.

Segunda Fase (Fase 1.2 y 2):

- Objetivo: Ampliar la capacidad de la terminal y dotarla de conectividad estratégica para consolidar el puerto como centro logístico intermodal.
- Alcance: Ampliación del muelle en 510 metros adicionales (total de 1.100 metros de línea de atraque), incremento de la superficie de explanada en 10 ha (total de 40 ha para contenedores), finalización de un túnel de acceso terrestre de 1.300 m y construcción de ramales de acceso ferroviario.
- Empresas: Acciona encargada de la construcción de esta fase, Ferrovial para la finalización del túnel y accesos ferroviarios, y Concasa para la explotación.
- Inversión: 54,6 M€ para la terminal y 23,48 M€ para el túnel de acceso.
- Estado: Comenzó en marzo de 2024 y en diciembre de 2024, los ocho cajones que forman la ampliación de la línea de atraque de la segunda fase ya estaban fondeados. Se espera que esta fase esté lista a mediados de 2026, con el túnel de acceso finalizado a finales de 2025.

La importancia de los aditivos de Sika

Sika ha suministrado los aditivos necesarios para el hormigón utilizado en la fabricación de los módulos portuarios para la ampliación

de esta terminal portuaria. Ha sido un trabajo muy coordinado, constante y estrecho entre todas las partes implicadas, Acciona I+D y Hormigones Espínola (proveedor del hormigón para el cajonero). El departamento de I+D de Sika, lleva dedicando muchos años a



la investigación y el desarrollo de soluciones que se han implantado en este proyecto. Los ensayos necesarios para determinar las curvas de fraguado se han realizado utilizando equipos especializados como calorímetros, dispositivos Vicat y el innovador equipo Pulsmment, basado en ultrasonidos, que permite medir con precisión los tiempos de fraguado y las resistencias iniciales del hormigón.

Este proceso de investigación y ensayo se llevó a cabo en las instalaciones de Sika, en las de Acciona y en la planta de hormigón de Hormigones y Áridos Espínola S.L., replicando distintas curvas de deslizado y considerando diferentes tipos de cemento, condiciones de temperatura y otros factores. Este enfoque garantizó que el diseño final del hormigón estuviera perfectamente adaptado a las necesidades específicas del proyecto.

Para la confección de un hormigón de estas características, es crucial seleccionar los

aditivos adecuados que aseguren el rendimiento deseado. Entre los aspectos más destacados que hay que tener en cuenta se encuentran:

- Aditivo superplastificante de altas prestaciones: Permite una elevada reducción de agua, lo que se traduce en resistencias iniciales y finales más altas. Además, asegura un fraguado adecuado para el proceso de deslizado del hormigón.
- Producto plastificante: Esencial para regular el tiempo de trabajabilidad, la reología del hormigón y los tiempos de fraguado. Estos factores se ajustan en función de la climatología esperada y las condiciones específicas del deslizado.

El proceso puede parecer sencillo, pero no lo es. Es fundamental ajustar el diseño del hormigón y la dosificación de los aditivos a factores como el tiempo abierto necesario para transporte y puesta en obra, tener en cuenta las condiciones climatológicas esperadas (en este caso, las temperaturas de los meses de verano en Cádiz) y considerar todos los detalles de la puesta en obra, como el bombeo, trasiego, vertido directo o volumen de tongadas.

Para esta obra se han utilizado aditivos como Sika® Viscocrete 6008 NG, un nuevo aditivo superplastificante de gran capacidad de reducción de agua, y Sikament®-242 HW (High Workability), un aditivo plastificante especialmente diseñado para casos en los que las condiciones de trabajo son complicadas como es el caso de este hormigón que se ha realizado durante los meses más calurosos del año.

Cemento ecológico

Este proyecto también destaca por su compromiso con la sostenibilidad, ya que se ha empleado cemento ecológico de la compañía Cementos Holcim en su construcción.

Este tipo de cemento contribuye significativamente a la reducción de emisiones de CO₂, un factor clave en la Nueva Terminal de Contenedores del Puerto de Cádiz, donde ya se está utilizando. Gracias a estas soluciones, se logran avances importantes hacia una construcción más respetuosa con el medio ambiente.



Dique cajonero flotante Kugira

El cajonero Kugira (ballena en japonés), pertenece a Acciona. En su interior trabaja un equipo de más de un centenar de profesionales. Tiene 56 m de altura, 74 m de eslora y 49 m de manga y puede manufacturar cajones de hormigón de hasta 24.000 t.

Se empieza con la construcción de la solera (base) sobre la que se levantan las paredes del cajón. La armadura de esta solera se realiza sobre la pontona (superficie plana flotante), en la que se teje el armazón que servirá de soporte al hormigón. Completado el montaje, se introduce en el dique flotante y se lleva a cabo el hormigonado.

Una vez completado el hormigonado de la solera, se baja el encofrado, que actuará

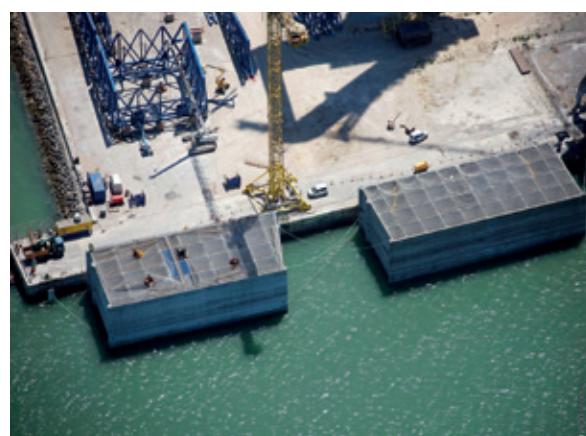
como molde para las paredes, y se comienza el hormigonado por bombeo a través de tres plumines alimentados por camiones hormigonera, que transportan el hormigón desde su lugar de fabricación.

El encofrado se desliza mediante un sistema similar al usado en empuje de puentes, permitiendo hormigonar las paredes de forma ininterrumpida. Con esto se consigue mayor precisión en el deslizado, del orden de milímetros. Además, la capacidad de flotación del Kugira le permite levantar un cajón de 18.000 t y hacerlo totalmente en seco.

En el “curriculum” de Kugira figura la construcción de la segunda fase de la nueva terminal de contenedores del puerto de Cádiz, la ampliación del muelle adosado del puerto de Barcelona, la construcción del puerto de Ferrol, el puerto de Açu (Brasil) o la construcción en A Coruña de 8 cajones para un cliente privado.

En este caso, se han construido ocho cajones de hormigón (48.000 m³ en total) de 63,68 m de eslora, 24 m de manga y 20,5 m de puntal.

Está comprobado que el uso de esta tecnología tiene mucho menos impacto en la flora y fauna marina. Se requiere un menor consumo de recursos y materias primas, que dependiendo de las características de cada obra, puede llegar a suponer un ahorro del 50 % (según informa Acciona), con el siguiente beneficio económico y ambiental.



El tráfico de mercancías por los puertos de interés general supera los 323,8 Mt en los siete primeros meses

Los puertos de interés general movieron 323.853.685 toneladas hasta julio de 2025, lo que supone un descenso del 2,3 % respecto al mismo periodo del año anterior, según datos provisionales. Estos datos reflejan el contexto de estancamiento del comercio mundial, por la incertidumbre e inestabilidad geopolítica y económica global.

Evolución por tipos de mercancías

La mercancía general registró en los siete primeros meses del año un descenso del 0,2 %, hasta 165,5 millones de toneladas, con un aumento del 4,4 % de la convencional, hasta 53,4 millones de toneladas, mientras que la contenerizada retrocedió un -2,3 %, (112,1 millones de toneladas) con relación al mismo periodo del año anterior.

Los TEUs registraron un aumento del 1,5 %, alcanzando 10,8 millones de unidades hasta julio. Continúa la tendencia a la baja de los TEUs en tránsito (-3,1 %) desde comienzo de este año, corrigiendo el fuerte crecimiento registrado en 2024 (+19,2%) por el cambio de rutas derivado de la inestabilidad en el Mar Rojo. Sin embargo, los TEUs import-ex-

port continúan la tendencia al alza (+8,7 %) en los puertos españoles.

Los graneles sólidos registraron un descenso del 5,5 % respecto al mismo periodo del año anterior, con un total acumulado de 46,4 millones de toneladas, donde los buenos resultados del mineral de hierro y otros minerales no metálicos no pudieron con la caída de los cereales y sus harinas.

Los graneles líquidos descendieron el 3,3 %, con 103,5 millones de toneladas, debido al menor movimiento de petróleo crudo y derivados.

El tráfico ro-ro creció un 3,1% hasta los 45 millones de toneladas. El número de buques mercantes por los puertos españoles disminuyó un 1,4 % respecto a los siete primeros meses del año anterior, con un total de 94.041 unidades, y el arqueo bruto se incrementó el 0,9 %.

El tráfico de pasajeros aumentó hasta julio el 6,5 % en relación al mismo periodo de 2024, hasta superar los 22,9 millones de movimientos.

Navantia Ferrol celebra la botadura de la fragata F111 *Bonifaz* de la Armada Española



El pasado 11 de septiembre, el astillero de Navantia en Ferrol acogía la botadura de la fragata F-111 *Bonifaz*, la primera unidad del programa F-110 para la Armada.

La F111, bautizada en honor al primer almirante de Castilla, Ramón Bonifaz, ha sido botada con un mes de adelanto sobre el calendario de ejecución acordado con el Ministerio de Defensa, y con un grado de terminación superior al 70 por ciento.

El acto contó con la participación del presidente del Gobierno, Pedro Sánchez y con Su Majestad la Reina Sofía quien, como madrina del buque, con el tradicional lanzamiento de una botella contra el casco un momento antes de que la fragata se deslizase por la grada hasta la ría. Al evento asistieron también el presidente de la Xunta de Galicia, Alfonso Rueda; la vicepresidenta

segunda del Gobierno, Yolanda Díaz; el delegado del Gobierno en Galicia, Pedro Blanco y el alcalde de Ferrol, José Manuel Rey. Asimismo han participado el Jefe de Estado Mayor de la Defensa (JEMAD), almirante Teodoro López Calderón; el Almirante jefe de Estado Mayor de la Armada, almirante Antonio Piñeiro; la secretaria de Estado directora del CNI, Esperanza Casteleiro; el secretario de Estado de Industria, Jordi García Brustenga; la presidenta de la Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (SEPI), Belén Gualda, y el presidente de Navantia, Ricardo Domínguez. En representación de la AINE, asistió el Presidente Territorial en Galicia, Jorge Dahl.

En la grada del astillero se han congregado unas 5.000 personas, en su mayoría plantilla de Navantia junto con sus familiares, así como de las empresas colaboradoras.

La fragata se ha deslizado hasta el mar tras recibir en su casco su ‘bautismo’ con una botella de vino Albariño y al son del himno de España interpretado por la Unidad de Música del Tercio Norte. Al Vicario D Vicente Hernández Chumillas, director de Asuntos Religiosos de la Armada, ha cumplido con el ritual de bendecir el buque.

A partir de este momento, la construcción del buque continuará en el muelle del astillero, hasta su entrega en 2028.

En Ferrol están en construcción tres de las cinco unidades de la serie, con cuatro bloques de la F112 en grada, tras el hito de puesta de quilla que tuvo lugar en abril de 2025; y el resto de los bloques de la F112 y nueve bloques de la F113 construyéndose en los talleres.

Características técnicas

El programa de construcción de fragatas F110, aprobado en 2019, contempla cinco unidades. Estos buques de escolta cuentan con capacidades antiaéreas, antisuperficie y antisubmarinas, además de poder operar en conjunto con otras unidades y colaborar en tareas de seguridad marítima con autoridades civiles.

Con este programa, Navantia entregará a la Armada uno de los buques más digitales y automatizados, con un gemelo digital y una red de sensores (el Sistema de Servicios Integrados) que facilitarán la toma de decisiones basadas en datos, buques más seguros, que pueden operar con tripulaciones reducidas e integrar en su operación vehículos no tripulados.

El programa F110 tiene un alto grado de nacionalización, con un 65% de equipos procedentes de suministradores nacionales junto

a tecnologías de socios internacionales y es un programa fundamental para toda la compañía.

Incorpora desarrollos de la propia Navantia como el núcleo del sistema de combate SCOMBA (desarrollado por la unidad de negocio de Sistemas de Navantia), actuando como el “cerebro” del buque, capaz de procesar en tiempo real información de sensores, radares y armamento, el sistema integrado de control de plataforma (SICP), así como motores y sistemas manufacturados en los centros de Navantia en Bahía de Cádiz y Cartagena.

Entre sus innovaciones está el mástil integrado, situado en la superestructura del casco, que optimiza el uso del espectro electromagnético y reduce la firma radar del barco.

Autonomía estratégica y empleo cualificado

El programa F110 supone un avance clave para la Armada y para el desarrollo industrial y tecnológico de Navantia y sus empresas colaboradoras. Refuerza la autonomía estratégica de España, impulsa la exportación y genera cerca de 9.000 empleos a lo largo de más de diez años, con la participación de unas 500 empresas de todo el país.

En su discurso, Ricardo Domínguez, presidente de Navantia agradeció a todos los trabajadores su entrega y esfuerzo para sacar adelante este programa, que “con desarrollos tecnológicos como el gemelo digital, el sistema de servicios integrado o el conjunto de sensores, antenas y radares de última generación, es símbolo de la innovación española y estamos convencidos de que será un éxito a nivel internacional como en su día lo fueron las fragatas F100.”



La DGMM publica la Memoria Anual del 2024



“Sin duda, este año ha sido el año de la proyección internacional”
Gustavo Santana

España este 2024 ha presidido por segundo año consecutivo el Consejo de la OMI. En mayo, la DGMM organizó la reunión número 57 del Comité del Memorando de París, que reunió en Madrid a delegaciones de 70 países implicados en erradicar la navegación de buques subestándar, mediante el sistema armonizado de control de buques extranjeros por el Estado rector.

Por otra parte, en el mes de octubre la OMI eligió Barcelona para celebrar el evento paralelo al Día Marítimo Mundial, que este año se conmemoraba bajo el lema ‘Navegar en el futuro: la seguridad, lo primero’. De nuevo, la administración marítima española se mostró al mundo con su mejor versión y el evento resultó un foro magnífico de debate y discusión sobre los grandes asuntos que nos ocupan: la descarbonización, la sostenibilidad, la falta de vocaciones, la digitalización y la automatización del transporte marítimo... Y en el centro de todos esos debates, la seguridad.

De puertas para adentro, la entrada en vigor del ETS para el transporte marítimo ha

exigido un sobreesfuerzo a nivel organizativo y de gestión que, según nuestras primeras percepciones, se ha saldado de forma positiva, sin obviar que hemos seguido reivindicando en la UE la necesidad de que se establezcan mecanismos de vigilancia de los efectos del ETS sobre el transporte marítimo y la actividad de los puertos europeos, ante el impacto que pudiera tener sobre los desvíos de rutas.

Otro de los grandes asuntos del año ha sido el trabajo desarrollado para dar luz a la Estrategia marítima nacional y el Plan de descarbonización. En este sentido, cabe señalar que la aprobación de uno y otro sigue su curso y no me queda más que felicitar a los implicados en su elaboración, porque desde la Dirección General de la Marina Mercante se ha hecho un gran trabajo que no pretende otra cosa que asentar las bases para que el futuro del sector marítimo en España sea sólido y se adapte a las nuevas necesidades.

Este año también hemos continuado nuestra labor en grupos de trabajo como el de buques autónomos -que sigue en su línea ascendente, planteando nuevas medidas, como la creación de una titulación específica para el manejo de pequeñas embarcaciones no tripuladas o el creado para actualizar la normativa relacionada con la náutica de recreo, con el fin de diseñar una propuesta

normativa de reglamento general de la navegación deportiva y de recreo que simplifique, racionalice y actualice la normativa vigente y dispersa en hasta 10 reales decretos sobre náutica deportiva y de recreo existentes.

Asimismo, hemos mantenido nuestros esfuerzos por ampliar la digitalización de los procedimientos relacionados con nuestros administrados.

El año pasado ya empezamos a expedir los certificados de formación en suficiencia y de formación marítima (es decir, todo lo que se conocía como certificados de especialidad) en formato electrónico y este año hemos trabajado en la puesta en marcha de una plataforma para gestionar la actividad inspectora de la DGMM, generando expedientes electrónicos.

Tráfico marítimo y seguridad en la navegación

En 2024 se ha producido un aumento de la demanda en las líneas de transporte de pasaje y vehículos, continuando con la tendencia positiva iniciada en 2021. El número total de pasajeros en las líneas regulares de cabotaje durante 2024 ascendió a 4.788.685.



El principal flujo de pasajeros se concentró en la línea Algeciras-Ceuta, con un total de 1.908.026 pasajeros, 947.302 en sentido Ceuta-Algeciras, y 960.724 en sentido Algeciras-Ceuta. El número total de vehículos transportados en régimen de pasaje ascendió a 1.445.774. La línea Algeciras-Ceuta fue de nuevo la más concurrida, con un total de 483.898 vehículos, 240.694 en sentido Ceuta-Algeciras y 243.204, en sentido Algeciras-Ceuta.

La carga rodada transportada, por otra parte, superó los 10,7 millones de metros lineales y el resto de la carga superó los 13 Mt. En 2024 la Operación Paso del Estrecho (OPE) registró sus máximos históricos, lo que repercute en el tráfico marítimo en España.

Registro de buques

En 2024 se resolvieron un total de 3.077 expedientes relacionados con los procesos de abanderamiento, nuevas construcciones, inscripciones definitivas o bajas de buques y embarcaciones.

En lo relativo a buques y embarcaciones de recreo se resolvieron 1.101 expedientes de abanderamiento y matriculación. Además, se inscribieron un total de 2.439 embarcaciones de recreo menores de 12 m de eslora por el régimen especial establecido en artículo 8 del Real Decreto 1435/2010. En este período se abrieron 152 expedientes por inicio de construcción y otros 706 por proceso de construcción de buques.

Asimismo, en este ejercicio se abrieron un total de 26.432 incidencias registrales en el Registro oficial de buques y en el Registro especial. En total, se gestionaron 42.443 trámites y se expedieron 91 patentes de navegación. Otro dato para destacar: se resolvieron 12.376 expedientes para la concesión o renovación del permiso de navegación a embarcaciones de recreo.



Actividad inspectora

En 2024 se han tramitado un total de 27.593 certificados mediante la aplicación informática de inspección marítima, tanto a buques sometidos a convenios OMI como a otro tipo de embarcaciones. El 92,8 % de las certificaciones se tramitaron por el personal de capitanías y distritos marítimos. El 5,2 % de las certificaciones se tramitaron por las organizaciones autorizadas (OAS.) y el 2 % restante se tramitaron por el personal de los servicios centrales.

Inspecciones a buques extranjeros y embarcaciones del pabellón nacional

Los inspectores de capitanías y distritos llevaron a cabo 1.524 inspecciones a buques mercantes de pabellón extranjero que arribaron a puerto o fondeadero español.

Inspecciones Lista Blanca

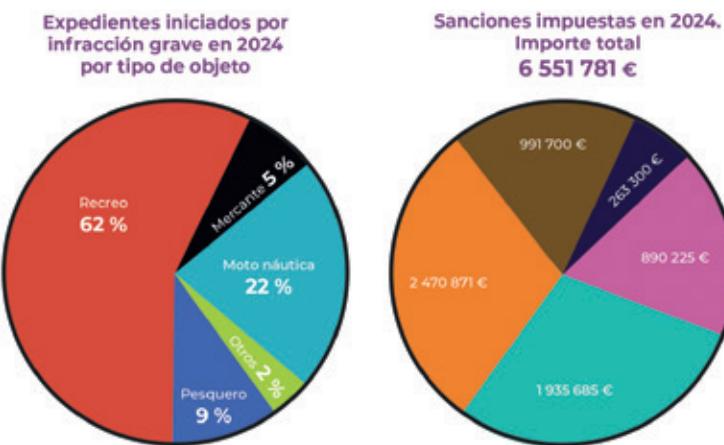
En el año 2004 se puso en marcha el plan Lista Blanca, consistente en la realización de inspecciones extraordinarias a buques españoles con el objetivo de mejorar nuestros resultados en el Paris MoU y permanecer en la Lista Blanca de banderas. Dentro de este plan, las capitanías marítimas han llevado a cabo en 2024 un total de 89 inspecciones.

Inspecciones para el control de los límites de contenido de azufre en el carburante

En este ámbito la DGMM ha superado el objetivo marcado, ya que las capitanías marítimas inspeccionaron 1.112 buques para comprobar, tanto en puerto como en el mar, que el combustible consumido por los buques era el reglamentario y cumplía los nuevos límites de contenido en azufre establecidos por la OMI y la legislación española. Además, se tomaron muestras en 314 de estos buques y se analizaron en el laboratorio para comprobar el contenido de azufre en el carburante. Se procedió a la apertura de los correspondientes expedientes sancionadores en los casos en que se detectó un nivel superior al permitido.

Otras inspecciones relacionadas con normativa europea

En este ámbito la DGMM realizó 23 inspecciones del Reglamento de reciclado de buques,



761 inspecciones sobre el control de la entrega de los desechos de los buques en puertos españoles y 76 inspecciones del control del cumplimiento de Reglamento de notificación, seguimiento y verificación de las emisiones de los buques.

Actividad sancionadora

La Unidad de expedientes sancionadores y la extensión de la organización en los servicios periféricos de la administración marítima continua su actividad. Durante el año 2024 se han iniciado 2.325 procedimientos administrativos sancionadores (desglosados en 2.219 por infracciones graves y 106 por infracciones leves) y han sido resueltos 1.872, incluidos parte de los procedimientos iniciados en 2024 y años previos. Asimismo, se han tramitado 132 recursos de alzada y 48 recursos contencioso administrativos.

Este año la Subdirección General de Normativa Marítima y Cooperación Internacional ha avanzado también en la digitalización con la implantación de una aplicación informática para gestionar los procedimientos administrativos sancionadores en materia de Marina Mercante. La nueva aplicación, que se ha puesto en marcha en varias capitánías marítimas, supone un paso esencial hacia el expediente electrónico.

Sanciones por contaminación

Durante el año 2024 se iniciaron 24 procedimientos administrativos sancionadores y

se impusieron multas que oscilaron entre 6.000 y 380.000 euros. Los sucesos más comunes que se han sancionado son: descargas ilegales de hidrocarburos procedentes de buques atracados o fondeados en zonas portuarias.

Procedimientos iniciados en 2024 por capitánías

Algeciras	244
Huelva	204
Tenerife	197
Almería	194
Vigo	184
Alicante	174
Cádiz	118
A Coruña	90
Villagarcía de Arousa	83
Melilla	81
Valencia	81
Las Palmas	79
Ceuta	75
Palma de Mallorca	65
Tarragona	61
Málaga	43
Sevilla	40
Pasajes	36
Ferrol	34
Motril	33
Bilbao	22
Santander	19
Barcelona	17
Gijón	14
Cartagena	11
Burela	10
Avilés	7
Ibiza	5
Castellón	1
Palamós	0



In Memoriam

El pasado 1 de junio, festividad de La Ascensión, falleció, en su casa de El Puerto de Santa María, nuestro muy querido amigo y compañero, Agustín Montes Martín, a los 84 años de edad. Perteneció a la Primera Promoción del Plan de Estudios de 1957, que salió de la Escuela en junio de 1964.

Inmediatamente, comenzó a trabajar en el Departamento de Reparaciones de Astilleros de Cádiz, cuyo activo más valioso era su dique seco “Nuestra Señora del Rosario”, en el que hacían sus revisiones reglamentarias los barcos más grandes y avanzados del momento. Aquello fue un gran comienzo para su futura carrera profesional.

En diciembre de 1966, contrajo matrimonio con María Elisa Posada González, compañera entrañable, que estuvo siempre a su lado. Tuvieron cuatro hijos, dos Doctoras en Medicina, un Ingeniero de Telecomunicaciones, y un Arquitecto, que les dieron siete nietos, recibiendo de esta familia, numerosa y ejemplar, grandes satisfacciones. Tuvieron también el privilegio de haber celebrado, hace más de 8 años, las “Bodas de Oro” de feliz matrimonio.

Cuando conocí a Agustín, a finales de 1958, como estudiante de la ETSIN, me llamó mucho la atención por ser un alumno muy trabajador, muy inteligente, y muy organizado, y cuando se reúnen estas tres características en grado sobresaliente, los resultados son difícilmente superables, como más tarde se comprobó. De hecho, la Cámara Oficial de Industria de Madrid le otorgó el Premio Ordinario, que esta Institución concedió al alumno, que obtuvo el mejor expediente académico, de la Promoción que terminó sus estudios en la citada Escuela en 1964.

Después de varios años en Reparaciones, Agustín pasó al Departamento de Nuevas Construcciones, en cuya Oficina Técnica comenzó a desempeñar cargos, cada vez de mayor responsabilidad, llegando a ser Director Técnico del Nuevo Astillero de la Bahía de Cádiz.

Una buena Oficina Técnica, dotada de competentes y experimentados profesionales, dirigida por un Jefe, que por su buen “saber hacer”, sea respetado y querido, capaz de entusiasmar a sus subordinados, y de sacar lo mejor de cada uno de ellos, es fundamental para la buena marcha de un Astillero. Unos buenos planos, métodos de trabajo, y correctas especificaciones de pedidos, dan lugar a muy buenos resultados, aunque el Departamento de Producción no esté tan bien cualificado. Y siempre es mucho más preferible esta alternativa que la contraria.

Ésta fue la gran labor, discreta y callada, de Agustín, en los dos grandes Astilleros de Cádiz, no siempre bien comprendida y apreciada, como se merecía el empeño, el trabajo y el tiempo que le dedicó, así como los muy positivos resultados que se cosecharon. Por ello, los que seguimos de cerca su vida activa, dedicada por entero a la Construcción Naval, estamos seguros de que puede estar muy satisfecho de su destacada trayectoria profesional, de su trabajo bien hecho, y de su deber, correcta y generosamente, cumplido. Tuvo, además, una gran competencia para resolver problemas difíciles, tanto técnicos como de relaciones humanas, y lo hacía con la prontitud requerida, y con la sencillez que le caracterizaban, procurando pasar desapercibido, y atribuyendo, en todos los casos, el éxito de su gestión al trabajo del equipo de

colaboradores que dirigía. En todas sus actuaciones, dejó siempre constancia de haber sido, y de haberse comportado, como una excelente persona y un extraordinario profesional. Los que tuvimos la suerte de haber compartido una parte de su vida, como compañeros, amigos o colaboradores, nos sentimos un poco desamparados. Ya no podremos pedirle una opinión o un consejo, pero su ejemplo permanecerá siempre en nuestro recuerdo. Una trayectoria profesional tan destacada y completa, como la de Agustín, no habría sido posible sin el apoyo continuo, sincero, absoluto, y desinteresado de su mujer, por lo que debemos reconocer a Mariely, la parte de mérito que a ella le corresponde, en los éxitos de su marido.

Y quien esto escribe, tiene una deuda perpetua de gratitud con Agustín, por haberme propuesto ir a trabajar con él a AESA-Puerto Real, por lo que un ofrecimiento así significa, tanto desde el punto de vista personal, como profesional. Agustín fue Profesor en la Escuela de Peritos Navales de Cádiz, y en 1970 opositó y obtuvo una cátedra en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Ferrol. Pero, después de tomar posesión de la misma, renunció a ella, para seguir su carrera profesional en Cádiz.

También inspeccionó la construcción, en Bilbao, de tres buques frigoríficos, para una Naviera gaditana. Por circunstancias imprevistas, tuve que operar dichos barcos, durante algún tiempo, lo que me permitió comprobar lo muy bien proyectados y equipados que estaban para atender, con eficiencia, el tráfico al que se destinaron.

Otra faceta destacada de Agustín fue la de haber sido tutor y mentor de muchos de los Ingenieros Navales, más jóvenes, que siempre recibieron de él un sabio consejo, o una acertada, oportuna, tranquila y humilde reflexión, que les fue de mucha utilidad para el ejercicio de sus carreras.

La Asociación de Ingenieros Navales concedió a Agustín, después de jubilado, el Título de “Asociado de Honor”.

Por su parte, el Colegio de Ingenieros Navales le había otorgado, en 1997, el “Premio López Bravo”, que es considerado como el Nóbel español en Construcción Naval. Después de jubilado, continuó su incansable y fecunda actividad, poniendo su natural disposición para el trabajo, conocimientos, y experiencia al servicio de los demás, durante casi veinte años.

Sobrellevó con entereza y resignación admirables, la única y última enfermedad de su vida. Durante esta etapa, parecía como si su mayor preocupación fuera la de evitar o reducir, los cuidados extraordinarios que estaba recibiendo de su esposa, hijos, nietos, y demás familiares y amigos, que con el mayor cariño y entrega, le acompañaron hasta el final.

Por haber sido una persona íntegra, profundamente religiosa, convencida de sus creencias, con unos principios éticos y morales, que aplicó siempre en sus relaciones con los demás, estamos seguros de que Dios le habrá acogido en su gloria, y estará gozando de la felicidad eterna. Termino con una breve oración en verso, a modo de responso, que comparto con todos los que la quieran rezar conmigo:

Santo y bueno es meditar
la brevedad del vivir,
mas tampoco hay que olvidar
que hemos de resucitar
para nunca más morir.

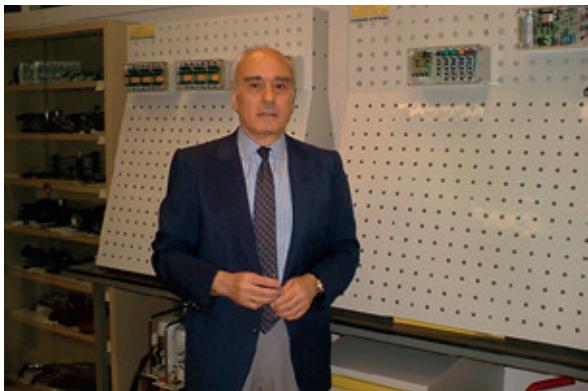
Con humilde contrición,
rota el alma de pesar
hice de ellos confesión,
y me otorgó su perdón
quien pusiste en tu lugar.

Cuando pienso de esta suerte,
me siento sereno y fuerte,
la muerte no me intimida,
que al lado allá de la muerte
es donde empieza la vida.

Esto amenga mi temor,
y mi esperanza acrecienta.
Por tus méritos, Señor,
cuando me ajustes la cuenta
habrá un saldo a mi favor.

Si acaso de mis pecados
me opreme la noche oscura,
tu voz, Jesús, me asegura
que están todos perdonados
y pagados con usura.

¡Descanse en Paz!



En la madrugada del 19 de julio falleció en Madrid Don Jesús Panadero Pastrana, Dr. Ingeniero Naval, Director hasta hace poco de la Escuela, ya jubilado pero plenamente activo en múltiples facetas profesionales.

Trabajador incansable a lo largo de toda su vida, tocó múltiples aspectos de la ingeniería naval, no limitándose a la especialidad de la que fue profesor: la maquinaria auxiliar y los distintos sistemas que se integran en algo tan complejo como la construcción y explotación de un buque.

Pero si algo caracterizó a Jesús Panadero, aparte del conocimiento concienzudo de las materias que explicaba, fue su cercanía como profesor, su actitud siempre abierta, en todo momento dispuesto a ayudar. Aspecto que de alguna forma le caracterizó fue el sorprendente conocimiento con nombre y apellidos de la práctica totalidad de aquellos que habían sido sus alumnos en la carrera. Fue admirado por no pocos compañeros del claustro de la Universidad por haber sabido combinar su desarrollo profesional de la ingeniería naval con su dedicación a la enseñanza e investigación. De hecho, su experiencia como ingeniero fue extraordinariamente importante, y quiso, en la medida de lo posible, transmitirla a sus alumnos con generosidad y acierto.

Fue un hombre de gran cultura, interesado por todos los saberes, que procuró facilitar a los alumnos de la Escuela mediante la or-

Jesús Panadero Pastrana

ganización de múltiples actos culturales: conferencias, conciertos, recitales, exposiciones. Especialmente interesado en la música, llegó a tocar varios instrumentos. También fue muy aficionado a los toros. Hablar con él era una delicia, pues tenía todo cuanto puede hacer agradable una conversación.

En la Escuela dejó huellas importantes. El acceso al recinto, con la colocación de un ancla, significando de forma inequívoca la identidad marinera del centro. Todo lo que constituye el control de accesos al edificio, barrera de entrada con circuito cerrado de televisión. Por supuesto, también la adecuación de los laboratorios y talleres docentes: taller de motores, canal de ensayos hidrodinámicos, taller mecánico. Y la creación de la Sala de video-conferencias, el centro de proceso de datos ubicado en la planta sótano, etc. Amén de la redecoración del interior de la Escuela con cuadros de constructores navales y marinos importantes españoles.

Creó un clima verdaderamente abierto, facilitando todo tipo de relaciones, lo que llevó a conseguir un convenio con la Armada que permitió la creación del Master Internacional en Ingeniería Naval Militar, actualmente en su sexta edición.

Toda la actividad de Jesús Panadero se desarrolló en un contexto de respeto a la tradición de la construcción naval española, a aquéllos que la hicieron posible —ingenieros y personal de los astilleros- y a quienes mostraron al mundo los buques de todo tipo construidos en nuestro país a lo largo de los años —marinos mercantes y de guerra-. Láminas de antiguas construcciones convenientemente rehabilitadas cubren las paredes

de la Escuela en una especie de homenaje a quienes proyectaron, construyeron y explotaron “Los buques de la Escuela de Navales”, título del libro que se publicó en 2008 –por iniciativa de él– y contiene copia de las citadas láminas y un comentario de cada uno de los buques escrito por el capitán de navío Don José María Blanco Núñez.

Evitaremos referirnos aquí a las muchas otras actividades desarrolladas en el campo de la investigación y desarrollo I+D+I, donde registró cinco patentes, en el campo de la ingeniería como profesional en astilleros, en compañías navieras, en centros de investigación, en empresas armadoras de buques de pesca, en sociedades de clasificación, etc., lo que exigiría un espacio enorme, del que no disponemos.

En el ámbito docente, y como Director de una Escuela Técnica Superior, luchó contra las muchas barreras que incomprendible-

mente impedían que en los concursos para la provisión de plazas de profesorado en la Universidad la actividad profesional realizada tuviera un peso adecuado en la evaluación de la capacidad e idoneidad de los aspirantes a las mismas. Al respecto hay que reconocer que, desgraciadamente, el profesor Panadero fracasó con rotundidad, no consiguiendo que la normativa vigente, claramente perjudicial no ya para la Universidad, sino para nuestro país, fuera modificada.

Desde aquí recordamos emocionadamente a Jesús, así como a su mujer, compañera de camino a lo largo de tantos años de lucha, así como a su hijo. Cuentan, seguro, con su ayuda, pues hombre de una fe profunda, sus deseos de plenitud están ya más que cumplidos. Descanse en paz.

Gerardo Polo
Catedrático Emérito de la U.P.M

Índice

1. ESTRUCTURA DEL CASCO

- 1.1 Acero del casco
- 1.2 Piezas estructurales fundidas o forjadas
- 1.3 Cierres estructurales del casco (escotillas, puertas, puertas/rampas)
- 1.4 Chimeneas, palos-chimenea, palos, posteleros
- 1.5 Rampas internas
- 1.6 Tomas de mar

2. PLANTA DE PROPULSIÓN

- 2.1 Calderas principales
- 2.2 Turbinas de vapor
- 2.3 Motores propulsores
- 2.4 Turbinas de gas
- 2.5 Reductores
- 2.6 Acoplamientos y embragues
- 2.7 Líneas de ejes
- 2.8 Chumaceras
- 2.9 Cierres de bocina
- 2.10 Hélices, hélices-tobera, hélices azimutales
- 2.11 Propulsores por chorro de agua
- 2.12 Otros elementos de la planta de propulsión
- 2.13 Componentes de motores
- 2.14 Propulsión Diésel-Eléctrica

3. EQUIPOS AUXILIARES DE MÁQUINAS

- 3.1 Sistemas de exhaustación
- 3.2 Compresores de aire y botellas de aire de arranque
- 3.3 Sistemas de agua de circulación y de refrigeración
- 3.4 Sistemas de combustible y aceite lubricante
- 3.5 Ventilación de cámara de máquinas
- 3.6 Bombas servicio de máquina
- 3.7 Separadores de sentina

4. PLANTA ELÉCTRICA

- 4.1 Grupos electrógenos
- 4.2 Cuadros eléctricos
- 4.3 Cables eléctricos
- 4.4 Baterías
- 4.5 Equipos convertidores de energía
- 4.6 Aparatos de alumbrado
- 4.7 Luces de navegación, proyectores de señales. Sirenas
- 4.8 Aparellaje eléctrico
- 4.9 Proyectos "Llave en Mano"

5. ELECTRÓNICA

- 5.1 Equipos de comunicaciones interiores
- 5.2 Equipos de comunicaciones exteriores
- 5.3 Equipos de vigilancia y navegación
- 5.4 Automación, Sistema Integrado de Vigilancia y Control
- 5.5 Ordenador de carga
- 5.6 Equipos para control de flotas y tráfico
- 5.7 Equipos de simulación

6. EQUIPOS AUXILIARES DE CASCO

- 6.1 Rebozes atmosféricos, indicadores de nivel de tanques
- 6.2 Aislamiento térmico en conductos y tuberías
- 6.3 Sistema de ventilación, calefacción y aire acondicionado
- 6.4 Calderas auxiliares, calefacción de tanques
- 6.5 Plantas frigoríficas
- 6.6 Sistemas de detección y extinción de incendios
- 6.7 Sistema de baldeo, achique y lastrado

- 6.8 Equipos de generación de agua dulce
- 6.9 Sistemas de aireación, inertización y limpieza de tanques
- 6.10 Elementos para estiba de la carga
- 6.11 Sistemas de control de la contaminación del medio ambiente, tratamiento de residuos
- 6.12 Plataformas para helicópteros
- 6.13 Valvulería servicios, actuadores
- 6.14 Planta hidráulica
- 6.15 Tuberías

7. EQUIPOS DE CUBIERTA

- 7.1 Equipos de fondeo y amarre
- 7.2 Equipos de remolque
- 7.3 Equipos de carga y descarga
- 7.4 Equipos de salvamento (botes, pescantes, balsas salvavidas)

8. ESTABILIZACIÓN, GOBIERNO Y MANIOBRA

- 8.1 Sistemas de estabilización y corrección del trimado
- 8.2 Timón, Servomotor
- 8.3 Hélices transversales de maniobra
- 8.4 Sistema de posicionamiento dinámico

9. EQUIPAMIENTO Y HABILITACIÓN

- 9.1 Accesorios del casco, candeleros, pasamanos, etc.
- 9.2 Mamparos no estructurales
- 9.3 Puertas, portillos, ventanas, limpiaparabrisas, vistaclaras, cortinas antideslumbrantes
- 9.4 Escalas, tecles
- 9.5 Recubrimientos, pintura. Tratamiento de superficies
- 9.6 Protección catódica
- 9.7 Aislamiento, revestimiento
- 9.8 Mobiliario
- 9.9 Gamba frigorífica
- 9.10 Equipos de cocina, lavandería y eliminación de basuras
- 9.11 Equipos de enfermería
- 9.12 Aparatos sanitarios
- 9.13 Habilitación, llave en mano

10. PESCA

- 10.1 Maquinillas y artes de pesca
- 10.2 Equipos de manipulación y proceso del pescado
- 10.3 Equipos de congelación y conservación del pescado
- 10.4 Equipos de detección y control de capturas de peces
- 10.5 Embarcaciones auxiliares

11. EQUIPOS PARA ASTILLEROS

- 11.1 Soldadura y corte
- 11.2 Gases industriales
- 11.3 Combustible y lubricante
- 11.4 Instrumentos de medida
- 11.5 Material de protección y seguridad
- 11.6 Equipos para puertos y plataformas

12. EMPRESAS DE INGENIERÍA Y SERVICIOS

- 12.1 Oficinas técnicas
- 12.2 Clasificación y certificación
- 12.3 Canales de Experiencias
- 12.4 Seguros marítimos
- 12.5 Formación
- 12.6 Empresas de servicios
- 12.7 Brokers

13. ASTILLEROS

1. ESTRUCTURA DEL CASCO

1.3 Cierres estructurales del casco



SP Consultores y Servicios, S.L.
Rampas Ro-Ro. Tapas de Escotillas. Sistemas hidráulicos. Reparaciones.
 Sevilla • Vigo • Algeciras • Barcelona
 sp@spconsulto.com
 www.spconsulto.com

2. PLANTA DE PROPULSIÓN

2.3 Motores Propulsores



PASCH
Motores diesel.
Propulsores y auxiliares 10 a 2.000 CV
 Campo Volantín, 24 - 3º
 48007 BILBAO
 Tel.: 94 413 26 60
 E-mail: infobilbao@pasch.es

2.5 Reductores



REINTJES España. S.A.U.
REDUCTORES MARINOS DESDE 250 HASTA 30.000 KW
 Avda. Doctor Severo Ochoa, 45 - 1º B
 P.A.E. Casablanca II
 E-28100 Alcobendas (Madrid)
 Tel. +34 91 657 2311
 Fax +34 91 657 2314
 E-mail: comercial@reintjes.es
 www.reintjes-gears.com



Masson Marine Ibérica

Reductores-inversores desde 300 hasta 10.000 kw con PTO, PTI y frenos para paso fijo y variable.

Avda. San Pablo, 28, Nave 22
 28823 Coslada - Madrid
 Tel.: 91 671 47 66 - Fax: 91 674 78 33
 info@masson-marine.es
 www.masson-marine.com

2.11 Propulsores por chorro de agua

PASCH



Hidrojets para motores de 81 a 1986 kW

Campo Volantín, 24 - 3º • 48007 BILBAO
 Tel.: 94 413 26 60
 E-mail: infobilbao@pasch.es

2.12 Otros elementos de la planta de propulsión

COTERENA

TALLER DE REPARACIÓN MARINO Y TERRESTRE, Y SUMINISTRADOR DE REPUESTOS.

Muelle de reparaciones de Bouzas, s/n
 P.O. Box 2.056 - 36208-VIGO (Spain)
 Telf + 34 986 23 87 67
 FAX + 34 986 23 87 19
 Email: coterena@coterena.es



VULKAN COUPLINGS

VULKAN Española S.A.

Acoplamientos elásticos, suspensiones elásticas. Embragues, frenos, tomas de fuerza (PTO/PTI), ejes cardán, ejes de composite. Sistemas de Filtración de aire y equipos de ventilación. Estudio y soluciones de vibraciones y acústicas. Silenciosos de escape standard y especiales. Cálculos vibraciones torsionales, 6DOF, 12DOF para suspensión elástica, ICE Class y cálculos especiales. Servicio Postventa: asistencias técnicas y repuestos.

Avda. Montes de Oca 19 – Nave 7
 E-28703 San Sebastián de los Reyes
 Madrid - España
 T +34 913590971 | F +34 913453182
 vulkan@vulkan.es
 www.vulkan.com



Inserте
aquí su
publicidad

2.13 Componentes de motores



Repuestos para motores Diesel y Gas. Repuestos y servicio para Cierres de Bocina. Componentes línea de ejes.

c/ García Camba, 6 • Oficina 403
36001 Pontevedra
Telf + 34 692 549 549
Email: info@rolloymarine.com
www.rolloymarine.com



Inserte
aquí su
publicidad



VULKAN Española S.A.

Acoplamientos elásticos, suspensiones elásticas. Embragues, frenos, tomas de fuerza (PTO/PTI), ejes cardan, ejes de composite. Sistemas de Filtración de aire y equipos de ventilación. Estudio y soluciones de vibraciones y acústicas. Silenciosos de escape standard y especiales. Cálculos vibraciones torsionales, 6DOF, 12DOF para suspensión elástica, ICE Class y cálculos especiales. Servicio Postventa: asistencias técnicas y repuestos.

Avda. Montes de Oca 19 – Nave 7
E-28703 San Sebastián de los Reyes
Madrid - España
T +34 913590971 | F +34 913453182
vulkan@vulkan.es
www.vulkan.com

7. EQUIPOS DE CUBIERTA

7.1 Equipos de fondeo y amarre



**Anclas y cadenas para buques
Estachas y cables**

GRAN STOCK PERMANENTE

Parque Empresarial de Coirós
Parcela 10
15316 COIRÓS (A Coruña)
Telf.: 981 17 34 78 - Fax: 981 29 87 05
Web: <http://www.rtrillo.com>
E-mail: info@rtrillo.com

8. ESTABILIZACIÓN, GOBIERNO Y MANIOBRA

8.1 Sistemas de estabilización y corrección del trimado



Equipos de estabilización y trimado dinámico para barcos de hasta 45 m

Campo Volantín, 24 - 3º • 48007 BILBAO
Tel.: 94 413 26 60
E-mail: infobilbao@pasch.es

9. EQUIPAMIENTO Y HABILITACIÓN



**Diseño conceptual.
Diseño de Interiores.
Diseño arquitectónico.
Habilitación naval.**

Estrada Diliz, 33
48990 Getxo (VIZCAYA)
Tels.: 94 491 10 81 / 491 40 54
Fax: 94 460 82 05
E-mail: oliver@oliverdesign.es
<http://www.oliverdesign.es>

9.6 Protección catódica



**Protección catódica.
Fabricante ánodos de sacrificio.
Distribuidor oficial pinturas JOTUN.**

Maquinaria de pesca NOSFOR.
Rúa Tomada, 74 Navia
36212 Vigo (PONTEVEDRA)
Tel.: 986 24 03 37
E-mail: cingal@cingal.net
<http://www.cingal.net>

12. EMPRESAS DE INGENIERÍA Y SERVICIOS

12.1 Oficinas técnicas



**Ingeniería Naval. Diseño de buques.
Proyectos de modernización.
Consultoría naval.
Inspección y dirección de obra.
Tasaciones.**

Calle Montero Ríos 30, 1º
36201 Vigo (España)
Tel. +34 986 43 05 60
Email: fcarceller@carceller.com
www.carceller.com



**Diseño conceptual.
Diseño de Interiores.
Desarrollo de proyectos.
Habilitación naval.**

Estrada Diliz, 33
48990 Getxo (VIZCAYA)
Tels.: 94 491 10 81 / 491 40 54
Fax: 94 460 82 05
E-mail: oliver@oliverdesign.es
<http://www.oliverdesign.es>



Empresa española con más de 40 años de experiencia en la resolución de problemas de vibraciones y ruido. Especialistas en ingeniería, consultoría, cálculo naval y diseño de buques silenciosos.

Áreas de especialización:

- Gestión integral de vibraciones y ruido.
- Cálculo y simulación naval.
- URN - Ruido Radiado al Agua.
- Medidas y ensayos especiales.
- Industria 4.0 aplicada al entorno naval.
- Pruebas de mar.
- CBM - Mantenimiento predictivo basado en condición.
- Consultoría técnica y análisis causa-raíz de averías.
- Proyectos I+D+i.
- Formación técnica especializada. (acceso link).

Confíe en un partner especializado, con experiencia contrastada y comprometido con la excelencia técnica.

Avda. Pio XII 44, Bajo izquierda
Edificio Pyomar Torre 2
28016 - Madrid

- www.tsisl.es
- www.tsisl.es/es/formacion
- infotsi@tsisl.es
- +34 91 345 97 30



INGENIERÍA NAVAL Y OFFSHORE

Ingeniería Conceptual, Básica y de Aprobación de Buques y Unidades Offshore. Ingeniería de Detalle: Acero y Armamento. Buques en operación: Soporte Técnico, Inspección y Varada. Integración en equipos de proyecto. Gestión y dirección de proyectos. Análisis Elementos Finitos, Estudios hidrodinámicos (CFD), Comportamiento en la Mar. Estudios de Seguridad, Transportes, Fondeos, Remolques, Estudios de Riesgos, DP FMEA. Análisis de Emisiones y Eficiencia Energética. Consultoría Técnica. Inspectores acreditados: ISM, IHM e eCMID. FORAN V80– ANSYS (Mechanical/AQWA/CFX)– RHINOCEROS – SOLIDWORKS - MATLAB. c/ BOLIVIA, 5 • 28016 MADRID Tel.: +34 91 458 51 19 c/ Marqués de Valladares, 3 3º D 36201 • Vigo (Spain) E-mail: seaplace@seaplace.es web: www.seaplace.es



GESTENAVAL
NAVAL ARCHITECTS & SURVEYORS

Design, Engineering, Stability Books, Surveys, Expert Reports, Appraisals.

Forensic Naval Architecture
UKCA & CE Recreational Craft
Marking

ABUC Statements of Conformity

CFD Studies

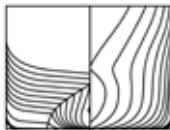
Méndez Núñez, 35 -1º
36600 Villagarcía de Arosa

Phone: +34 986508436

E-mail: info@gestenaval.com

Web: www.gestenaval.com

12.2 Clasificación y certificación



ORP MARÍTIMA S.L.

Informes técnicos periciales
Naval, Marítimo, Industrial,
Energía, Transporte.

Asistencia en procesos judiciales,
arbitrales y de mediación.
Nacional e internacional.

Calle Écija 7, Madrid.

Tf. +34 661 83 00 89

frontdesk@orpmar.com

www.orpmar.com



Programa Editorial Editorial Program 2025

ENERO • JANUARY

Propulsión: ahorro energético. Motores, reductores, líneas de ejes, hélices. Combustibles y lubricantes.

Propulsión: energy saving. Engines, reduction gears, shaft lines, propellers. Fuel and lubricants.

FEBRERO | FEBRUARY

Reparaciones y transformaciones. Astilleros de reparación.

Pinturas y protección de superficies.

Repairs & Conversions. Repair yards. Paint and surface protection

MARZO • MARCH

Pesca. Acuicultura. Política pesquera

Fishing. Aquaculture. Fishing legislation

ABRIL | APRIL

Seguridad marítima. Flota de remolcadores. LNG.

Maritime Security & Safety. Tugboats fleet. LNG.

MAYO • MAY

Industria auxiliar. Gobierno y maniobra

Auxiliary industry. Steering and manoeuvre

JUNIO | JUNE

Construcción naval. Tendencias

Shipbuilding. Trends

JULIO-AGOSTO • JULY-AUGUST

Ingeniería. Formación. Sociedades de clasificación

Engineering. Training. Classification societies

SEPTIEMBRE • SEPTEMBER

Marina mercante. Puertos. Náutica. Habilitación. Ferries. Cruceros.

Merchant ships. Harbours. Pleasure crafts. Accommodation. Ferries.

Cruiseships.

OCTUBRE | OCTOBER

Sector naval militar. Electrónica y Automatización

Naval sector. Electronics and Automation

NOVIEMBRE • NOVEMBER

Offshore • Offshore

DICIEMBRE | DECEMBER

Energías renovables y Medio ambiente Resumen del Sector Marítimo 2025

Renewable energy and environment

CADA NÚMERO CONTIENE ADEMÁS • EACH ISSUE ALSO INCLUDES:

Artículos técnicos • Technical articles

Descripciones de buques • Ship descriptions

Noticias nacionales e internacionales • International and national news

Artículos sobre legislación, economía, fiscalidad y normativa

Articles above legislation, economy, taxes and regulations

Filipinas y el Pacífico

La construcción naval,
la navegación y la metalurgia

1575 - 1850



WWW.INGENIEROSNAVALES.COM/TIENDA/



Cádiz

11-13 de noviembre



MBG

MARITIME BLUE GROWTH

Encuentro internacional dirigido y liderado por el propio sector marítimo español, que aborda de forma transversal la economía circular azul.



Congreso

Más debate. Más dinámico. MBG sustituye las ponencias por Diálogos Abiertos y Mesas Redondas cortas y dinámicas.

Un fuerte apoyo institucional impulsa la colaboración público-privada en esta edición.



Networking

Concentrará en un mismo lugar y de forma distendida, a todos los agentes sectoriales asistentes al Encuentro. Incorpora islas temáticas y gastronomía local.

Patrocinadores principales:



Diputación
de Cádiz



Junta de Andalucía

Colabora:



Ayuntamiento
de Cádiz