

Utilización de derivados del hidrógeno como combustibles marítimos: amoniaco y metanol

1 de septiembre, 2025

EN COLABORACIÓN



El presente informe ha sido elaborado utilizando la información más precisa y accesible disponible para sus autores. No obstante, ni los autores, ni sus organizaciones o empresas, ni el Observatorio Tecnológico del Hidrógeno asumen responsabilidad alguna por la exactitud de los datos presentados, ni aceptan ninguna obligación derivada del uso que se haga de la información contenida en este documento.

AUTORÍA Y ORGANIZACIÓN

- Lorena Cuenca Fuentes, Técnico de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Enagás
- José A. Lana Calvo, Coordinador de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Enagás
- Arturo Góngora de San Francisco, Técnico de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Enagás
- Carlos Martínez Aguilera, Coordinador de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Enagás
- Enrique Saborit Rojas, Ingeniero de la Unidad de Consultoría y Formación en CNH2
- Vanesa Sendarrubias Carbonero, Ingeniera de la Unidad de Consultoría y Formación en CNH2
- José I. Domínguez Carrero, Responsable de Desarrollo de Negocio de Energía en la Fundación CIDAUT
- Raul Vallejo, Ingeniero de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Moeve
- Rafael d'Amore Domenech, Profesor Contratado Doctor en la ETSI Navales de la UPM
- Teresa J. Leo Mena, Catedrática de Universidad en la ETSI Navales de la UPM

ACRÓNIMOS

AFC	Alkaline Fuel Cell
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
BTX	Benzene, Toluene and Xylenes
CCC	Subcomité de Transporte de Cargas y Contenedores
CE	Comisión Europea
CH₃OH	Metanol
CI	Compression Ignition
CO₂	Dióxido de Carbono
CRL	Community Readiness Level
DF	Dual Fuel
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
ECA	Emission Control Areas
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EMSA	Agencia Europea de Seguridad Marítima
FC	Fuel Cell
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GT	Gross Tonnage
H₂	Hidrógeno
HFO	Heavy Fuel Oil
ICE	Internal Combustion Engine
IGC	International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk
IGF	International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels
IRL	Investment Readiness Level
ISO	Organización Internacional de Normalización
LH₂	Hidrógeno Líquido
LNH₃	Amoniaco Líquido
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MEC	Motor de Encendido por Compresión
ME-C	Mechanical Electronically controlled
MEP	Motor de Encendido Provocado
MGO	Marine Gas Oil

N₂	Nitrógeno
N₂O	Óxido Nitroso
NH₃	Amoniaco
NO_x	Óxidos de Nitrógeno
OMI	Organización Marítima Internacional
OSV	Offshore Support Vessel
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell/Polymer Electrolyte Fuel Cell
PSV	Platform Support Vessel
RORO	Roll-on/Roll-off ship
RU	Remedial Units
SCR	Selective Catalytic Reduction
SI	Spark Ignition
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SU	Surplus Units
TRL	Technology Readiness Level
TtW	Tank-to-Wake
WtT	Well-to-Tank
WtW	Well-to-Wake

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	1
1. ANTECEDENTES	4
2. AMONIACO Y METANOL COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS	7
2.1. PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES	7
2.2. SEGURIDAD Y MEDIOAMBIENTE	8
2.3. MADUREZ TECNOLÓGICA DE LAS ALTERNATIVAS	11
2.4. NORMATIVA EXISTENTE	13
2.5. TENDENCIAS A FUTURO DEL USO DE COMBUSTIBLES MARÍTIMOS	18
3. APLICACIONES	20
3.1. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA (ICE)	20
3.2. PILAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO Y DERIVADOS	26
3.3. PREVISIONES A FUTURO DE LA FLOTA DE NUEVOS BUQUES	30
4. ALMACENAMIENTO EN BUQUES Y <i>BUNKERING</i>	32
4.1. METANOL COMO DERIVADO DE HIDRÓGENO	32
4.2. AMONIACO COMO DERIVADO DE HIDRÓGENO	34
5. PROYECTOS E INICIATIVAS MÁS DESTACADAS	38
5.1. PRODUCCIÓN DE AMONIACO Y METANOL RENOVABLE	38
5.2. USOS DE AMONIACO Y METANOL EN EL SECTOR MARÍTIMO	39
CONCLUSIONES	43
REFERENCIAS	46

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Emisiones de GEI a nivel europeo en el transporte [4]	4
Figura 2. Reducción anual promedio de la intensidad de carbono en comparación con el promedio de 2020 [4]	5
Figura 3. Nivel de madurez de los distintos ámbitos del amoniaco verde y amoniaco azul [10].....	12
Figura 4. Nivel de madurez de los distintos ámbitos del bio-metanol verde y e-metanol [16].....	13
Figura 5. Consumo energético en el transporte marítimo [26]	19
Figura 6. Demanda de los combustibles alternativos en el sector marítimo [27]	19
Figura 7. Aplicaciones de los combustibles alternativos en el sector marítimo [28]	20
Figura 8. Disponibilidad de motores duales para combustibles alternativos [29]	21
Figura 9. Rutas de flujo de energía para combustibles alternativos y motores principales [41]	29
Figura 10. Empleo de combustibles alternativos en la flota mundial en número de buques (arriba) y tonelaje bruto GT, (abajo) en la actualidad [29]	30
Figura 11. Capacidad estimada de almacenamiento de metanol a nivel mundial [42]	34
Figura 12. Terminales de distribución de amoniaco y principales puertos de <i>bunkering</i> en 2020 [45]...	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de la densidad energética volumétrica [10]	7
Tabla 2. Comparación de combustibles alternativos y HFO fósil basada en criterios ambientales clave [12]	8
Tabla 3. Características técnicas de los principales tipos de pilas de combustible [36] [37, 38]	27
Tabla 4. Proyectos de buques y <i>bunkering</i> de amoníaco [48]	39
Tabla 5. Ejemplos de proyectos marítimos que utilizan pilas de combustible	41

RESUMEN EJECUTIVO

La descarbonización del transporte marítimo es una prioridad estratégica en la lucha contra el cambio climático y, a la vez, uno de sus mayores desafíos. Este sector, responsable de aproximadamente el 3% de las emisiones globales de CO₂ asociadas a la energía, consume alrededor del 5% del petróleo mundial.

El marítimo es uno de los modos de transporte más eficientes energéticamente, si bien su impacto agregado en términos absolutos es considerable. En este contexto, la necesaria búsqueda de soluciones sostenibles ha llevado a la evaluación e implementación de **combustibles alternativos, entre los que destacan los derivados del hidrógeno verde como el amoníaco (NH₃) y el metanol (CH₃OH).**

El presente informe técnico del Observatorio Tecnológico del Hidrógeno, liderado por Enagás y elaborado en colaboración con el Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2), CIDAUT, Moeve y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), tiene por objeto ofrecer un análisis del uso potencial del amoníaco y del metanol, evaluando desde sus propiedades fisicoquímicas y ambientales, hasta su grado de madurez tecnológica, el marco normativo existente, y las principales aplicaciones actuales y futuras.

Desde el punto de vista técnico, ambos derivados del hidrógeno presentan características que los hacen adecuados para su uso como combustible marítimo. El metanol posee una alta densidad energética volumétrica y puede almacenarse en estado líquido a temperatura y presión ambiente, lo que facilita su integración en los buques y en la infraestructura portuaria. El amoníaco, por su parte, y aunque con una densidad energética inferior, se beneficia de una infraestructura logística global ya existente y un potencial de emisiones netas cero si se produce a partir de fuentes renovables, el denominado amoníaco verde.

Desde una perspectiva tecnológica, el documento analiza el grado de madurez de las soluciones existentes para ambos combustibles. En el caso del metanol, ya existen motores duales en operación comercial, tanto de dos como de cuatro tiempos, así como kits de adaptación (*retrofit*) de buques existentes desarrollados por fabricantes líderes como Everllence¹, Wärtsilä o Hyundai HiMSEN. En el caso del amoníaco, los primeros desarrollos industriales de motores para este combustible ya son comerciales y se espera contar con los kits de adaptación alrededor de 2027, con proyectos en marcha por parte de

¹ Anteriormente MAN Energy Solutions

Everllence, WinGD, J-Eng y Wärtsilä. Asimismo, se exploran **aplicaciones innovadoras en pilas de combustible basadas en hidrógeno puro y sus derivados**, con especial énfasis en pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC), de óxido sólido (SOFC) o las de membrana de intercambio protónico (PEMFC) en aplicaciones para buques pequeños, ferris y transporte costero en fases tempranas donde el hidrógeno podría suministrarse de forma directa u obtenerse a partir de metanol o amoníaco tras procesos de reformado o craqueo respectivamente.

En cuanto al marco regulatorio, el documento detalla el avance normativo tanto en el ámbito de la Organización Marítima Internacional (OMI) como en las directrices de las sociedades de clasificación. El metanol cuenta ya con la guía provisional MSC.1/Circ.1621 que regula su uso seguro como combustible marino. Y el amoníaco está en proceso de inclusión en los códigos IGF (Código Internacional de Seguridad para los buques que utilicen gases u otros combustibles de bajo punto de inflamación) e IGC (Código Internacional para la Construcción y el Equipamiento de Buques que Transporten Gases Licuados a Granel), con una propuesta de regulación ya presentada por la IMO, cuya aprobación se espera a finales del 2025 y su entrada en vigor para 2027. Paralelamente, sociedades de clasificación como DNV, ABS o Bureau Veritas han publicado normas tentativas o guías de diseño específicas. La Agencia Europea de Seguridad Marítima (EMSA) y la normativa ISO también avanzan en este sentido.

Desde el punto de vista estratégico y de mercado, según las previsiones de DNV para 2050, se espera que la mitad de la flota opere con fuentes de propulsión como hidrógeno, amoníaco y metanol, y la otra mitad con combustibles convencionales, principalmente GNL, situando al amoníaco como uno de los combustibles de mayor crecimiento, con una cuota proyectada de entre el 35–44% del mix de combustibles marítimos según la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y un fabricante de motores líder como Everllence. En lo referente al metanol, se prevé que alcance entre un 3% y un 26% del total. Ambos se ven beneficiados por su posible producción a partir de fuentes renovables, especialmente el e-metanol y el amoníaco verde, clave para lograr los objetivos de neutralidad climática.

El documento también analiza la evolución de la flota mundial de buques. Actualmente, el GNL se constituye como la principal opción para disminuir a corto plazo la intensidad de emisiones asociadas al transporte marítimo, con 1.239 buques en operación. El hidrógeno, el metanol y el amoníaco están creciendo rápidamente en la cartera de pedidos de nueva construcción, con 173 buques de metanol, 25 de amoníaco, y 10 basados en tecnologías de hidrógeno. Además, se examinan los retos técnicos del almacenamiento a bordo y repostaje (*bunkering*), así como los requerimientos de diseño, seguridad, ventilación y materiales compatibles.

En conclusión, **el metanol y el amoníaco como derivados del hidrógeno constituyen dos pilares tecnológicos complementarios en el proceso de transición energética del transporte marítimo tanto en el desarrollo de motores ICE como en pilas de combustible.** Su potencial para sustituir a los combustibles fósiles, su escalabilidad y sus ventajas en términos de sostenibilidad y disponibilidad justifican su consideración prioritaria en la hoja de ruta de descarbonización del sector, aunque ambos presenten aún desafíos operativos y regulatorios.

1. ANTECEDENTES

El **transporte marítimo** es el eje clave del comercio internacional y parte integral de las cadenas de suministro a **nivel global**. Además de ser un gran consumidor de energía - aproximadamente el **5% del consumo anual mundial de petróleo**- es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), con el **3% de las emisiones globales de CO₂** relacionadas con la energía: casi **700 millones de toneladas anuales** [1] [2]. Dentro de este sector, **el transporte marítimo internacional**, que incluye graneleros, petroleros y portacontenedores, representa **más del 80% de las emisiones totales** [1].

Las empresas del sector ya han empezado a invertir significativamente en la **reducción y optimización de la eficiencia de sus trayectos** como respuesta a las condiciones regulatorias, y, también, a los elevados precios del combustible, la dinámica del mercado, los requisitos de eficiencia energética para nuevos buques y las normas internacionales que limitan el contenido de azufre de los combustibles utilizados, así como la reducción de gases de efecto invernadero [3].

Para ello, se han identificado **dos factores** determinantes para reducir emisiones, la **navegación lenta** y el **tamaño de los buques** [3]:

- **Navegación lenta:** reducir la velocidad del buque a la mitad puede disminuir el consumo de combustible hasta en ocho veces. Actualmente, la velocidad de navegación ha experimentado una reducción media del 10% comparado con valores de 2008. Desde ese año, la llamada 'navegación lenta' ha sido responsable del 67% de las mejoras de la eficiencia.
- **Tamaño de los buques:** ha experimentado un aumento del 50% de promedio. Esto da lugar a una reducción del consumo por tonelada de carga, debido a la reducción de la superficie del casco y a la disminución de la resistencia al avance por mercancía.

A **nivel europeo**, tal y como se indica en el Plan de la UE para Transición Ecológica **Fit for 55** [4], el 25% de las emisiones de GEI corresponden al sector del transporte, teniendo la **movilidad marítima un impacto del 13,5% (Figura 1)**.

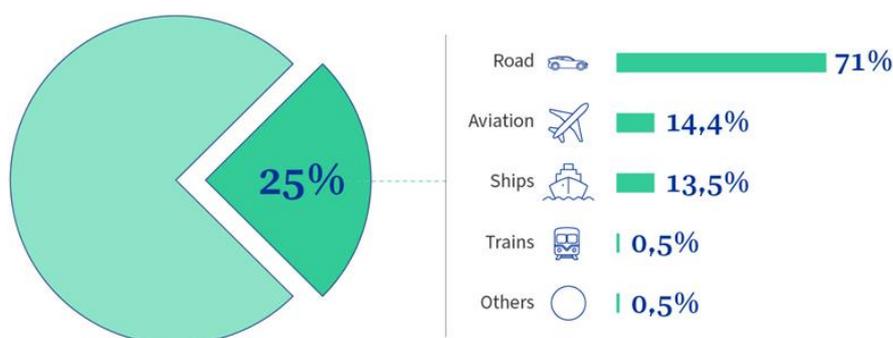


Figura 1. Emisiones de GEI a nivel europeo en el transporte [4]

La regulación europea **FuelEU Maritime**, parte del paquete de medidas *Fit for 55* en base a la cual el Consejo europeo ha adoptado un nuevo Reglamento [5] con carácter sancionador para descarbonizar el sector marítimo [4], tiene entre sus principales disposiciones:

- (i) Lograr que las **emisiones GEI** de los combustibles utilizados en este sector disminuyan gradualmente: **de un 2% en 2025 al 80% de aquí a 2050 (Figura 2)**.
- (ii) Un régimen especial de incentivos para apoyar la adopción de los combustibles renovables de origen no biológico, que poseen un gran potencial de descarbonización.
- (iii) Excluir a los combustibles fósiles del proceso de certificación del Reglamento.

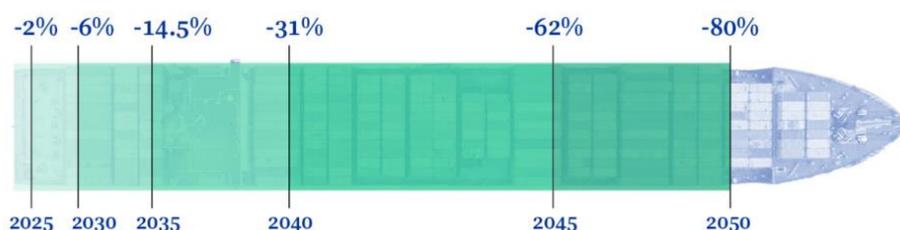


Figura 2. Reducción anual promedio de la intensidad de carbono en comparación con el promedio de 2020 [4]

Además, a partir de enero de 2024, mediante la **modificación de la Directiva 2003/87/CE**, el comercio de derechos de emisiones de la UE se extiende a las emisiones procedentes de las actividades de transporte marítimo, con independencia de la bandera de los barcos afectados [6].

Por otro lado, en julio de 2023, la **Organización Marítima Internacional (OMI)** revisó su estrategia para abordar las emisiones de GEI, marcando un nuevo rumbo hacia la descarbonización del sector. Esta nueva etapa se centra en el desarrollo y adopción de tecnologías con emisiones netas cero o casi nulas, combustibles alternativos (biocombustibles, amoniaco, metanol, hidrógeno, etc.) y fuentes de energía renovable. Para impulsar este cambio, la OMI ha implementado estrictas regulaciones sobre las emisiones de CO₂, NO_x y SO_x, así como la designación de zonas especiales o ECA (*Emission Control Areas*) [7]. A través de su nueva estrategia, se pretende conseguir una **reducción de las emisiones GEI** de al menos un 20% para 2030, en comparación con niveles de 2008, y del 100% para el 2050 [8].

En lo relativo al **desarrollo tecnológico de los combustibles marítimos alternativos**, se observan distintos niveles de madurez tecnológica. Hoy en día, biocombustibles como el biometano o el diésel renovable ya están disponibles comercialmente, sin embargo, no presentan una reducción de huella de carbono tan significativa como los combustibles alternativos emergentes, entre los que se incluyen el hidrógeno, el amoniaco y el metanol (solo con CO₂ de origen biogénico) con emisiones nulas o casi nulas de carbono [9].

La transición del sector del transporte marítimo hacia el uso de combustibles marítimos alternativos **requiere la participación de toda su cadena logística**: desde la identificación de materias primas, el desarrollo y escalado de procesos de producción, el avance en soluciones de almacenamiento, logística y abastecimiento (*bunkering*) que puedan adaptarse a estos combustibles alternativos, hasta la gestión del almacenamiento seguro y el uso de los combustibles a bordo de los buques, y el control de las emisiones de los mismos [9].

2. AMONIACO Y METANOL COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

2.1. Propiedades de los combustibles

Una mayor densidad energética volumétrica implica mayor capacidad de almacenamiento de energía en un espacio más pequeño, algo clave para el transporte y el almacenamiento de combustible.

Lloyd's Register [10] comparó la **densidad de energía volumétrica** del amoníaco, metanol, GNL, hidrógeno líquido (LH₂) e hidrógeno gas a diferentes presiones (**Tabla 1**).

Tabla 1. Comparación de la densidad energética volumétrica [10]

Propiedad	LNH ₃	Metanol	GNL	LH ₂	H ₂ (365 bar)	H ₂ (700 bar)
Densidad (kg/m ³)	696	790	450	70,8	23,35	38,25
Temperatura de almacenamiento (°C)	-33	25	-162	-253	25	25
Presión de almacenamiento (bar)	1	1	1	1	350	700
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	18,8	19,9	48	119,93	119,93	119,93
Densidad de energía volumétrica (GJ/m³)	13,1	15,7	21,6	8,49	2,8	4,59
Comparación volumétrica MGO*	2,94	2,44	1,78	4,52	13,73	8,38

Nota: Relación de energía de MGO (*Marine Gas Oil*) frente a cada combustible en volumen. Los datos de la tabla no tienen en cuenta el recipiente/almacenamiento de cada alternativa.

En esta tabla comparativa, se puede apreciar que, dentro de las **alternativas sostenibles** (metanol, amoníaco e hidrógeno), el **metanol** es la opción que **mayor densidad energética (GJ/m³) presenta frente al resto**, seguido del amoníaco, que supera las distintas opciones derivadas del hidrógeno, tanto en estado gaseoso como líquido.

Por otro lado, la comparación volumétrica MGO (*Marine Gas Oil*) compara la energía MGO frente a cada combustible alternativo en volumen. En este sentido, el hidrógeno tiene el valor mayor, ya que es la molécula con mayor energía en masa.

En lo relativo al resto de las propiedades, el **hidrógeno gaseoso** requiere compresión a altas presiones (350–700 bar) o licuefacción a temperaturas muy bajas (-253 °C) para su transporte y almacenamiento como consecuencia de su baja densidad energética volumétrica [11].

A diferencia del hidrógeno, el **amoníaco** se transporta y almacena en condiciones menos exigentes (-33°C y menor presión atmosférica), lo que origina un menor coste como combustible marítimo.

2.2. Seguridad y medioambiente

El instituto Öko [12] comparó tanto amoníaco como hidrógeno y metanol como combustibles alternativos frente a un combustible fósil típico (HFO, *Heavy Fuel Oil*) para estipular cuál era el combustible alternativo sostenible más adecuado para el transporte marítimo.

En la **Tabla 2** se compara el amoníaco con los otros tres combustibles utilizados **en un motor de combustión interna (ICE)**, teniendo en cuenta criterios ambientales, donde se califica cada uno de los criterios, siendo 1 riesgo alto o bajo rendimiento y 5 un riesgo bajo o alto rendimiento.

Tabla 2. Comparación de combustibles alternativos y HFO fósil basada en criterios ambientales clave [12]

Criterion	Ammonia	Hydrogen	Methanol	HFO
GHG reduction potential	4*	5	5**	1
Air pollutants	3	5	4	1
Aquatic ecotoxicity	2	5	5	1
Human toxicity	2	5	3	3
Flammability	2	1	2	5
Explosion risks	4	2	5	5

Nota: *incertidumbre sobre las emisiones de N₂O. ***well-to-wake* (WtW): término utilizado para evaluar el impacto ambiental de un combustible a lo largo de todo su ciclo de vida en el sector marítimo siendo *Well-to-tank* (WtT) + *Tank-to-wake* (TtW).

En lo relativo a las **emisiones GEI**, el **amoníaco** es una molécula que no emite CO₂, pero al utilizarse en motores de combustión interna (ICE), produce óxidos de nitrógeno (NO_x) en su combustión. Empleando sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR²) se pueden reducir estas emisiones, de manera similar a los nuevos buques propulsados con combustibles fósiles que cumplen con los requisitos de la Tier III en las Áreas de Control de Emisiones [12]. De hecho, los sistemas SCR requieren amoníaco o urea a bordo para funcionar, por lo que los nuevos buques que operen en estas áreas ya necesitarían sistemas y normas para el manejo y almacenamiento de amoníaco o urea [13]. El **metanol** también emite pequeñas cantidades de NO_x y el **hidrógeno verde** se espera que tenga prácticamente emisiones cero. El **HFO** es el peor clasificado por este parámetro, ya que además de NO_x, emite otros contaminantes como SO_x y partículas de carbono [12].

Se concluye que el hidrógeno y el metanol son los combustibles más adecuados en términos medioambientales, por la puntuación global de los diferentes criterios.

² La SCR se basa en una reacción química catalítica donde el NO_x se convierte en nitrógeno y agua. Para que esta reacción tenga lugar, se inyecta un agente reductor (como amoníaco o urea) en la corriente de escape. Este agente reacciona con el NO_x en presencia del catalizador, transformándolo en productos menos dañinos.

2.2.1. Aspectos de seguridad relativos al amoniaco

El amoniaco es gas en condiciones ambiente y tiene un fuerte olor que permite detectarlo a concentraciones tan bajas como 2–5 ppm. En caso de fuga desde un tanque de almacenamiento refrigerado, el amoniaco líquido se evapora y se dispersa rápidamente en fase gaseosa al ser más ligero que el aire. En cambio, si la fuga proviene de un tanque presurizado, se forma un aerosol que genera una nube densa más pesada que el aire, de mayor extensión que en el caso anterior [14].

La industria ha desarrollado normas y códigos para el manejo del amoniaco, manipulado de forma segura durante más de un siglo, con pocos incidentes reportados cuando es manejado por personal capacitado. La mayoría de los accidentes graves reportados en los medios han involucrado derivados del amoniaco, como el nitrato de amonio [14].

Los límites de exposición ocupacional al amoniaco en España son [15]:

- TLV - TWA: 20 ppm (14 mg/m³) durante 8 horas
- TLV - STEL: 50 ppm (36 mg/m³) durante 15 minutos

El amoniaco tiene una baja reactividad en comparación con otros combustibles y un intervalo de inflamabilidad estrecho (15–28 % en volumen), lo que reduce el riesgo de incendios o explosiones. Sin embargo, en caso de derrames acuáticos, puede provocar alteraciones del pH, afectando a los ecosistemas acuáticos [14].

El amoniaco es compatible con muchos materiales comunes, incluidos los aceros al carbono y los aceros inoxidables (en estado líquido y anhidro). Esto significa que se pueden utilizar la mayoría de las tuberías, accesorios y válvulas estándar con amoniaco. Sin embargo, el amoniaco corroe el cobre, el latón y las aleaciones que contienen zinc, así como el caucho natural y algunos plásticos [14].

Los riesgos del amoniaco pueden gestionarse gracias a la alta madurez de las tecnologías de almacenamiento, transporte y distribución, así como a la existencia de formación, códigos industriales, normas y regulaciones que garantizan la seguridad.

El desarrollo de regulaciones sólidas es una prioridad para armadores, operadores, desarrolladores tecnológicos, puertos y sociedades de clasificación, que están profundamente involucradas en análisis de identificación de peligros, estrategias de mitigación y tecnologías de energía limpia para asegurar que el uso del amoniaco como combustible cumpla con los estándares de seguridad existentes [14].

2.2.2. Aspectos de seguridad relativos al metanol

Los riesgos particulares del metanol que más afectan a las instalaciones dependen en gran medida de cómo se almacena y manipula. Algunas consideraciones clave al manipular metanol son:

- El metanol es un líquido inflamable, de fácil ignición. Arde con una llama no luminosa, que puede ser invisible a la luz solar intensa. Los equipos de respuesta deben contar con dispositivos infrarrojos que permitan la detección remota de calor y temperatura relativa.
- La masa molar del vapor de metanol es ligeramente mayor -más densa- que la del aire (32 kg/kmol frente a 29 kg/kmol). Como resultado, y dependiendo de las circunstancias de la fuga o derrame, el metanol líquido puede acumularse y el vapor migrar a nivel del suelo y concentrarse en espacios confinados o zonas bajas. En cualquier caso, se espera que el vapor de metanol, al tener una flotabilidad casi neutra, se disipe fácilmente en lugares ventilados.
- Debido a su toxicidad se deben tomar precauciones durante su manipulación y dispensado.
- El metanol es totalmente miscible en agua y mantiene su inflamabilidad incluso a concentraciones muy altas de agua. Una solución con 75% en volumen de agua y 25% de metanol se considera un líquido inflamable. Esto tiene implicaciones importantes para la extinción de incendios. El metanol es un disolvente químico, lo que también afecta a la selección de materiales y estrategias de extinción. Puede ser corrosivo para algunos metales como aluminio, cobre, zinc, titanio y algunas de sus aleaciones. También puede atacar ciertos plásticos, resinas y cauchos. Se deben seleccionar materiales metálicos, plásticos y elastómeros compatibles.
- El metanol es fácilmente biodegradable, por lo que su acumulación en el suelo o aguas subterráneas es poco probable.
- Finalmente, el metanol se almacena en tanques superficiales con techo flotante y tanques más pequeños con deflectores internos. Los tanques deben estar conectados a tierra para evitar riesgos por descarga electrostática. El control de ignición puede lograrse mediante inertización con nitrógeno, gas natural o mediante la designación de una zona de riesgo con control de ignición.

[11]

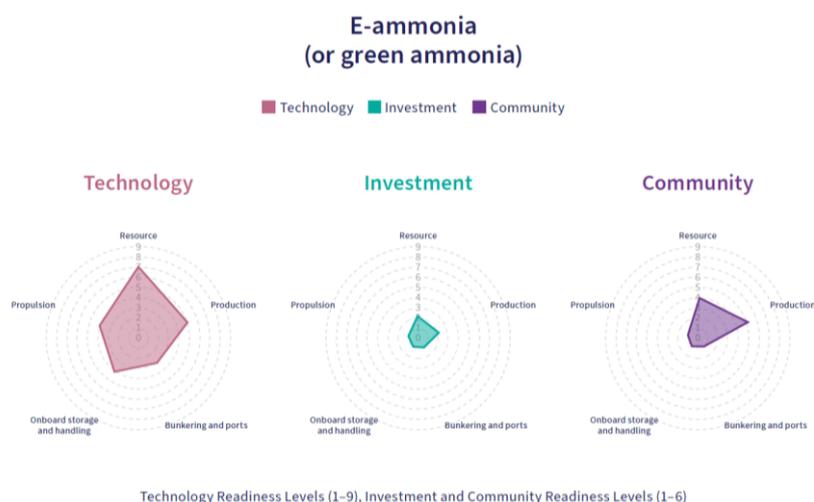
2.3. Madurez tecnológica de las alternativas

2.3.1. Madurez tecnológica del amoníaco como combustible

Lloyd's Register [10] analizó tanto para el amoníaco verde como para el azul (**Figura 3**) el nivel de madurez tecnológica (TRL); la madurez de inversión (IRL³), indicando si el caso de negocio es hipotético o factible; y la aceptación social (CRL⁴), donde se determina si existen los marcos necesarios para un uso seguro y públicamente aceptable de una tecnología y un combustible.

En lo relativo a la madurez tecnológica, la tecnología de amoníaco verde (TRL 7) está mucho más desarrollada en cuanto a recursos -validación de prototipos en entorno de uso- que la tecnología del amoníaco azul (TRL 5), siendo este el que se obtiene del reformado del metano con sistemas de captura de CO₂. En el resto de los aspectos tienen el mismo nivel de madurez.

La madurez de inversión (IRL) en ambos casos es la misma, mientras que la aceptación social (CRL) es mayor para el amoníaco verde. Se espera que la experiencia de la industria en la manipulación del amoníaco facilite su regulación [10].



³ El IRL o nivel de preparación para la inversión indica la madurez comercial de una solución marina desde la idea de negocio inicial hasta la inversión financiera fiable. Aborda todos los parámetros necesarios para el éxito comercial, basándose en los trabajos ARENA (Australian Renewable Energy Agency).

⁴ El CRL o nivel de preparación de la comunidad indica la madurez social de una solución marina en términos de aceptabilidad y adopción tanto por las personas como por las organizaciones. Se mide en el espectro que va desde el reto social hasta la adopción generalizada. El CRL se basa en el trabajo de ARENA y el Fondo de Innovación de Dinamarca, adaptado a una escala de seis niveles.

Blue ammonia



Figura 3. Nivel de madurez de los distintos ámbitos del amoníaco verde y amoníaco azul [10]

Nota: (i) Amoníaco verde/e-ammonia: se obtiene a partir de hidrógeno verde y nitrógeno del aire. (ii) Amoníaco azul: se produce a partir de reformado de metano (SMR) con captura y almacenamiento de carbono (CCS).

2.3.2. Madurez tecnológica del metanol como combustible

Lloyd's Register [16] realizó el mismo análisis en lo relativo al bio-metanol y el e-metanol (**Figura 4**), destacando que la madurez tecnológica de ambas tecnologías se encuentra mucho más desarrollada en ámbitos como el almacenamiento y manipulación a bordo (TRL 8) o los sistemas de propulsión (TRL 8) que las tecnologías de producción: bio-metanol (TRL 3), e-metanol (TRL 4), más incipientes.

La madurez de inversión (IRL) coincide en ambas y la aceptación social (CRL) en lo relativo a recursos es mayor para el e-metanol con un TRL 4 vs TRL 2 del bio-metanol [16].

Bio-methanol



E methanol

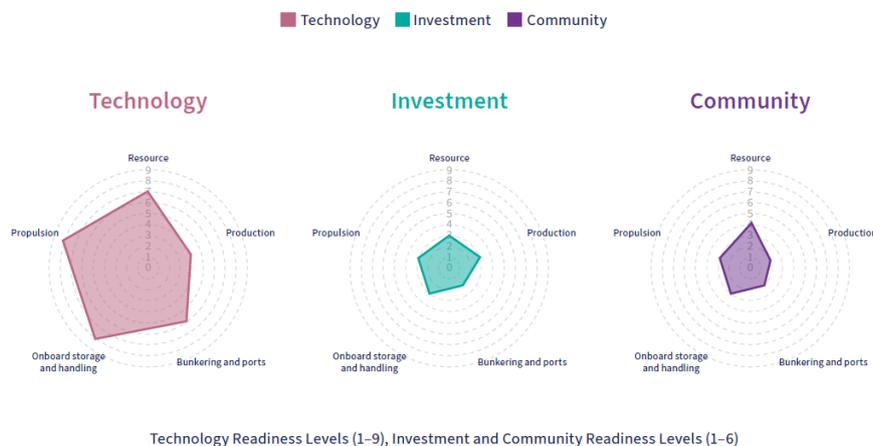


Figura 4. Nivel de madurez de los distintos ámbitos del bio-metanol verde y e-metanol [16]

Nota: (i) Bio-metanol: se obtiene a partir de la gasificación de materias primas lignocelulósicas (biomasa). (ii) E-metanol: es producido mediante electrólisis del agua usando electricidad renovable y dióxido de carbono capturado.

En definitiva, los análisis de Lloyd's Register muestran que, mientras el amoníaco verde y el azul comparten niveles similares de madurez en inversión, el amoníaco verde presenta un desarrollo tecnológico más avanzado y mayor aceptación social. En el caso del metanol, el e-metanol destaca como la opción de mayor aceptación social y ambas alternativas (tanto el biometanol como el e-metanol) cuentan con tecnologías maduras en almacenamiento y uso a bordo donde sus procesos de producción aún están en fases tempranas de desarrollo.

2.4. Normativa existente

La **Organización Marítima Internacional (OMI)**, en el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC), celebrado en abril de 2025, **estableció un marco de emisiones netas nulas**, hecho que constituye el primer marco jurídicamente vinculante a nivel mundial centrado en la reducción de emisiones en buques. Este marco integra una nueva norma sobre combustibles marinos, que establece límites obligatorios de emisiones y un mecanismo global de fijación de precios del carbono en el sector [17].

Se prevé que las normas sean **formalmente aprobadas en octubre de 2025 y entren en vigor en 2027**. Las normas serán de carácter obligatorio para grandes buques de navegación marítima que superen las 5.000 toneladas de arqueo bruto, causantes del **85% del total de las emisiones de CO₂ procedentes del transporte marítimo internacional** [17].

Con el propósito de contribuir al desarrollo del marco de emisiones nulas establecido por la OMI, es crucial considerar varios elementos fundamentales. Por un lado, el marco será incluido en el nuevo

Capítulo 5 del Anexo VI (Prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques). Además, es pertinente señalar que el Anexo VI del Convenio MARPOL, que actualmente contiene 106 partes, abarca el 97% de la flota mercante mundial por arqueo, y ya incluye prescripciones obligatorias de eficiencia energética de los buques.

Por otro lado, la **estrategia de 2023 sobre la reducción de las emisiones de GEI procedentes de los buques**, tiene como objetivo **acelerar la introducción de combustibles, tecnologías y fuentes de energía de emisiones de GEI nulas** o casi nulas [18].

El proyecto de reglas determina que los buques deberán cumplir:

- **Norma mundial sobre combustibles.** Los buques deben reducir, a lo largo del tiempo, su intensidad de los gases de efecto invernadero de los combustibles. Calculándose desde el pozo a la estela (*Well-to-Wake*).
- **Medida económica mundial.** Los buques que superen el umbral de emisiones permitido deberán adquirir "unidades de recuperación" (*Remedial Units, RU*) para equilibrarlas. Por otro lado, si los buques utilizan tecnologías nulas o casi nulas en emisiones podrán optar por recompensas económicas.

Se establecerán dos niveles de cumplimiento de los objetivos, uno de base y uno de cumplimiento directo. En el último caso, los buques podrán optar por ganar "unidades excedentarias" (*Surplus Units, SU*). Cualquier buque que emita por encima de los umbrales establecidos deberá compensar sus emisiones mediante una transferencia de unidades excedentarias entre buques, utilizando unidades excedentarias previamente acumuladas o unidades de recuperación adquiridas mediante contribuciones al Fondo *Net-Zero* de la OMI.

El **fondo Net-Zero de la OMI** se constituirá con el propósito de recaudar las contribuciones por el pago de las emisiones. Los fondos recaudados se destinarán a los siguientes fines: recompensar a los buques con emisiones bajas, apoyar la innovación, la investigación, las infraestructuras y las iniciativas de transición justa en los países en desarrollo, financiar la formación, la transferencia de tecnología y el desarrollo de capacidades para fomentar la Estrategia de 2023 de la OMI sobre los GEI, y, por último, para mitigar las repercusiones negativas sobre los Estados más vulnerables [18].

2.4.1. Normativa relacionada con el uso de amoniaco como combustible

Actualmente, el amoniaco no está aprobado como combustible por los organismos reguladores y las autoridades del sector energético. Aunque no se prevén grandes obstáculos tecnológicos, se requiere experiencia operativa con el uso del amoniaco como combustible antes de su adopción generalizada, especialmente para el desarrollo de nuevos códigos y normas.

La experiencia operativa es esencial para establecer protocolos de manejo seguro, y los estándares de producto son necesarios para definir niveles de pureza seguros en múltiples aplicaciones.

Además, se deben realizar pruebas y verificaciones de emisiones para asegurar que la combustión del amoniaco no supere los niveles aceptables de contaminantes. Estas acciones deben completarse antes lograr una aprobación regulatoria amplia del amoniaco como combustible. Mientras tanto, su uso probablemente se limitará a proyectos piloto y demostrativos [19].

Existen numerosas normas y reglamentos sobre la manipulación y el almacenamiento del amoniaco, pero la mayoría están relacionados con instalaciones fijas, plantas de proceso o aplicaciones no móviles.

El actual Código IGC de la OMI constituye la base de todas las normas de las sociedades de clasificación en lo relativo a buques transportadores de gas licuado. Este código se aplica a los buques metaneros, mientras que el Código IGF de la OMI para combustibles de bajo punto de inflamación, como los buques capaces de utilizar amoniaco como combustible, proporciona un marco normativo para garantizar la seguridad del uso de estos combustibles alternativos a bordo, tanto en lo relativo a los sistemas de almacenamiento y suministro, como a los requisitos de diseño y operación.

Estos códigos aún no incluyen el uso del amoniaco como combustible, debido a su reciente consideración a tal efecto. En concreto, la sección 16.1 del Código IGC establece que el metano (GNL) es el único cargamento cuyo *boil-off* puede ser utilizado en espacios de maquinaria de categoría A [19].

El Comité de Seguridad Marítima (MSC) aprobó las directrices provisionales para la seguridad de los buques que utilizan amoniaco como combustible en diciembre de 2024, tras su elaboración y finalización por el Subcomité de Transporte de Cargas y Contenedores (CCC) [20] en septiembre de 2024. Se espera que los nuevos códigos IGC e IGF entren en vigor en enero de 2027 [21].

Las siguientes sociedades de clasificación han elaborado normas tentativas y recomendaciones para el uso de amoniaco como combustible a bordo de buques:

- ClassNK – Guidelines for ships using alternative fuels (2021)
- Bureau Veritas – Ammonia Fuelled Ships Tentative Rules NR671 (2022)
- American Bureau of Shipping (ABS) – Guide for Ammonia Fuelled Vessels (2021)

- Det Norske Veritas (DNV) – Rules for Ammonia, Parte 6, Capítulo 2, Sección 14 (2014)
- Korean Register (KR) – Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuel (2021)

Los **principales cambios de diseño respecto a los buques que utilizan combustibles gaseosos convencionales** se identifican y resumen en las citadas directrices. Entre los aspectos más importantes se encuentran los **requisitos de ventilación y la disposición de los espacios habitables**, dado que el uso previsto del amoníaco es a bordo de una plataforma tripulada. Todas las sociedades de clasificación basan sus recomendaciones en los códigos IGC e IGF existentes, con excepciones adaptadas a las propiedades del amoníaco [19].

Un estudio realizado por la **Agencia Europea de Seguridad Marítima (EMSA)** [22], concluyó que **existen varias normas relevantes establecidas por la Organización Internacional de Normalización (ISO) en relación con la manipulación del amoníaco**. No obstante, la mayoría están orientadas al uso general en tierra, y actualmente no existe una normativa ISO específica para el uso del amoníaco como combustible en aplicaciones marítimas.

El informe de EMSA indica que la norma ISO 8217:2017, relativa a combustibles marinos, se utiliza ampliamente para la manipulación de productos derivados del petróleo en buques, y algunas de sus partes podrían ser aplicables al amoníaco.

Por su parte, la norma ISO 23306:2020, que especifica el GNL como combustible para aplicaciones marítimas, y el borrador ISO/AWI 6583, relativo a la especificación del metanol como combustible marino, son ejemplos de combustibles de bajo punto de inflamación que recientemente han recibido normas específicas, por lo que se prevé que el amoníaco siga el mismo camino.

Se espera que las futuras versiones de los códigos IGF e IGC incorporen estas normas y tengan en cuenta las consideraciones de las sociedades de clasificación, que mantienen un vínculo directo con los astilleros, y documentan los procesos de diseño para la integración del amoníaco a bordo de los buques [19].

2.4.2. Normativa relacionada con el uso de metanol como combustible

La IMO desarrolló la MSC.1/Circ.1621, guía para la seguridad de barcos utilizando metanol/etanol como combustible) [23].

En cuanto a la localización de los tanques, el metanol se puede almacenar en tanques estructurales, pero con limitaciones en la disposición en el buque y con barreras de seguridad adicionales a los tanques de fueles convencionales.

La normativa de la **localización de los tanques** de metanol se puede resumir en las siguientes normas [19]:

- No se podrán localizar contiguos a espacios de maquinaria de categoría A.
- No se podrán localizar contiguos a espacios de acomodación.
- No se podrán disponer a proa del mamparo de colisión o a popa del mamparo de popa.
- Los tanques deberán estar rodeados de *cofferdams*⁵ de 600 mm capaces de ser inspeccionados. Estos *cofferdams* se podrán suprimir si el tanque de metanol está contiguo a un tanque de otro combustible, contiguos a un doble casco o fondo vacíos por debajo del mínimo calado del buque o a espacios de combustión de este combustible que a su vez tendrán una protección adicional.

En cuanto a los **materiales** de tubos, válvulas y tanques, la normativa se centra en la prevención de la corrosión y los incendios y establece que:

- El acero inoxidable es recomendable para las tuberías y válvulas y preferiblemente de acero inoxidable 304L o 316L.
- El decapado y la limpieza de las tuberías se deberán realizar con agua potable de calidad potable.
- El acero al carbono es compatible con el metanol, pero se recomienda un revestimiento de zinc para evitar la corrosión causada por la presencia de agua.

En cuanto a la **ventilación**, los tanques requieren de válvulas de vacío abiertas al exterior redundantes, y con un espacio de seguridad de 15 m, separadas del resto de la maquinaria en cubierta. Además, se deberá disponer de un sistema de gas inerte de nitrógeno con el que purgar los tanques. Esto tiene por objeto minimizar la acumulación de gases y mezclas inflamables en los tanques de combustible [19].

Las tuberías y válvulas, fuera de los espacios especialmente preparados para la combustión y tratamiento del metanol, deberán disponer de una doble tubería ventilada o inertizada en la sección intermedia con nitrógeno. Los espacios de inertización deberán ser independientes y estar a su vez ventilados.

Los **espacios de repostaje** también deben disponer de este sistema de inertización. La protección frente al fuego requiere de protección A-60 en los tanques de metanol, en los espacios de *bunkering* y en los espacios de preparación para el combustible. Estos espacios también requerirán de sistemas de detección y extinción de incendios [19].

⁵ Espacios vacíos entre dos mamparos o cubiertas estancas dentro de un barco para garantizar que el contenido de tanques adyacentes no se filtre de uno a otro, evitando así la contaminación cruzada.

2.5. Tendencias a futuro del uso de combustibles marítimos

El consumo en el año 2022 de los buques fue de **300-320 millones de toneladas de combustible convencional al año, equivalente a 3.300-3.600 TWh/año**. En el escenario de la OMI, haría falta reemplazar antes de 2050 el 50% del combustible que consumen actualmente los buques, en equivalente de poder calorífico. En el escenario de cero emisiones netas en 2050 sería necesario sustituir todo el combustible por alternativas descarbonizadas [24].

Las previsiones que ha hecho DNV para la evolución del consumo de combustibles marinos hasta 2050 indican que, dentro del escenario previsto por la OMI, el consumo total de combustibles marinos sería alrededor de **3.300 TWh**, cantidad similar a la consumida en 2022. De esta cifra, aproximadamente el **50%** serían **combustibles fósiles**, la mayor parte (5/6) gas natural licuado (GNL) y el resto (1/6) fueloil. El otro **50%** sería a base de **fuentes de propulsión alternativas: la mayor parte (5/6) combustibles renovables** (sin emisiones netas de CO₂), y el resto sería electricidad (baterías o producción in-situ con pilas de combustible) y biocombustibles [24].

El **amoniaco verde**, como combustible renovable, se perfila como una opción prometedora para el sector marítimo debido a la existencia de una infraestructura logística global, la no necesidad de almacenamiento criogénico y su flexibilidad, que no requiere un procesamiento complejo a bordo. No obstante, todavía es necesario aumentar la producción de amoniaco verde para cubrir las demandas del sector [13] [14].

Por otro lado, el **metanol verde** también se plantea como una opción atractiva como combustible marino de bajas emisiones de carbono, ya que puede almacenarse en estado líquido a temperatura y presión ambiente. Sin embargo, este combustible solo se considera un combustible hipocarbónico cuando se produce a partir de biomasa residual (bio-metanol) o a partir de hidrógeno generado con energía renovable (e-metanol) [9]. A corto plazo, el mayor potencial para el uso de **hidrógeno verde** como combustible marino es en buques de pequeño tamaño, que pueden hacer uso de estaciones de reabastecimiento de hidrógeno (HRS) en tierra [25].

Finalmente, en lo relativo a los biocombustibles, es posible que no puedan escalar lo suficiente para satisfacer la demanda marítima, ya que solo una pequeña parte de la biomasa disponible puede procesarse de manera asequible para aplicaciones como combustible, y una capacidad adicional incrementaría sustancialmente el coste [14].

La IEA en su informe *Aviation and shipping* de 2023 [26] estima que el consumo de metanol como combustible marítimo para el 2050 será solo del **3%** frente al **44%** del amoniaco, como indica la **Figura 5**.

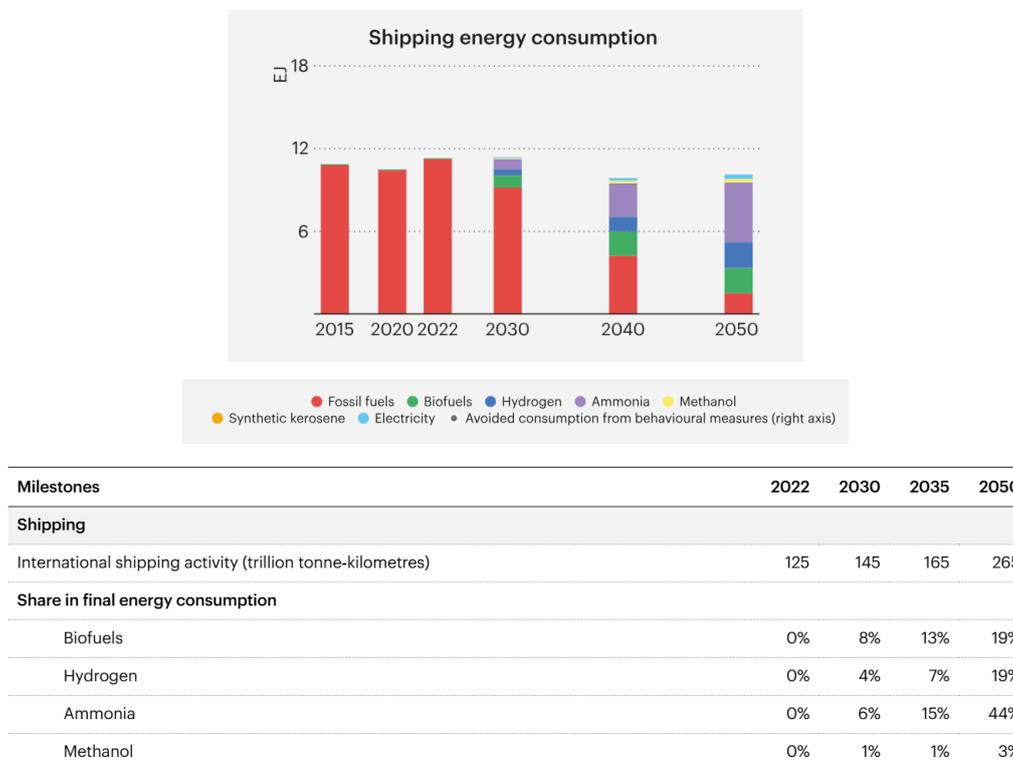


Figura 5. Consumo energético en el transporte marítimo [26]

Por otro lado, un estudio realizado por el fabricante de motores líder Everllence [27] analizó la demanda de los combustibles alternativos marítimos (**Figura 6**), donde se observa que para 2050 se prevé que el **35%** del combustible marítimo sea amoniaco y el **26%** sea metanol.

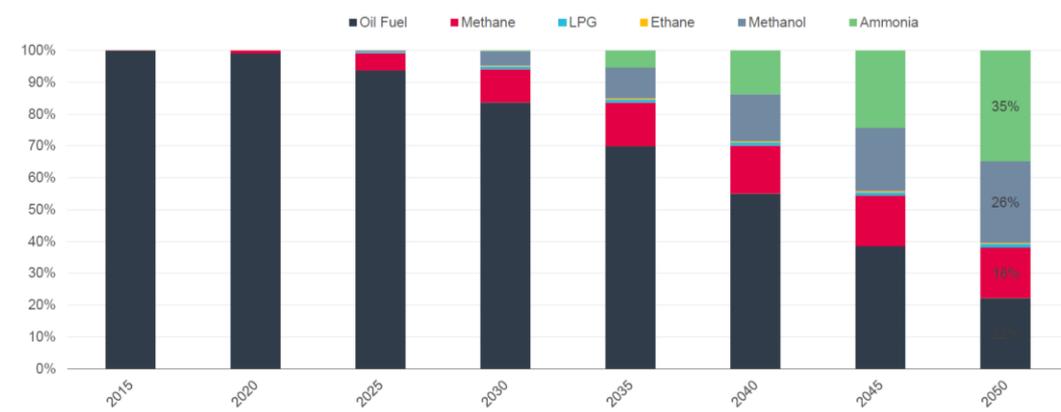


Figura 6. Demanda de los combustibles alternativos en el sector marítimo [27]

Se concluye que la IEA y Everllence coinciden en asignar al **amoniaco** un papel crucial como combustible marítimo, con un 44% y 35% de cuota de mercado para 2050 respectivamente. Para el caso del **metanol**, las opiniones de las fuentes difieren ya que Everllence (26%) le otorga mucho más peso que la IEA (3%).

3. APLICACIONES

DNV, en su informe *Maritime Forecast to 2050* [28], muestra las diferentes aplicaciones de los combustibles alternativos en el sector marítimo (motores Dual Fuel de dos y cuatro tiempos, pilas de combustibles y calderas), además de sus estimaciones del año en que la tecnología alcanzará su nivel comercial (TRL 9) y el año en el que se conseguirá la madurez regulatoria para el uso de estos combustibles a bordo (**Figura 7**).

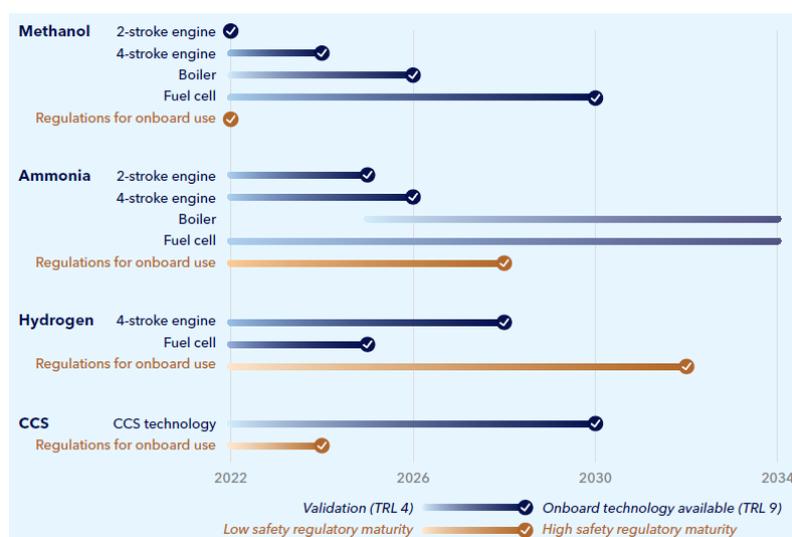


Figura 7. Aplicaciones de los combustibles alternativos en el sector marítimo [28]

3.1. Motores de Combustión Interna (ICE)

La mayor parte de los motores de combustión interna son los denominados **motores DF** (*Dual Fuel*), que pueden funcionar tanto con combustibles líquidos como gaseosos, y están disponibles tanto en motores de dos como de cuatro tiempos. Estos motores son básicamente “híbridos” y tienen muchas características en común con los motores CI (*Compression Ignition*) y SI (*Spark Ignition*) [12].

- **Motor CI o motor de encendido por compresión (MEC):** La combustión se produce por la compresión del aire, que calienta el combustible hasta el punto de ignición. Este tipo de motor es comúnmente asociado con el **ciclo Diésel** y utiliza diésel como combustible.
- **Motor SI o motor de encendido provocado (MEP):** Utiliza una bujía para encender la mezcla de aire y combustible. Este tipo de motor es comúnmente asociado con el **ciclo Otto**, usando gasolina como combustible.

Normalmente, el funcionamiento de los motores DF implica la mezcla del **combustible principal/primario** con aire en el cilindro -como en los motores SI-, con la posterior ignición por compresión de un **combustible piloto/secundario**, generalmente diésel -como en los motores CI- [12].

Los motores DF se diseñan para funcionar con un combustible convencional como HFO o MGO (combustible primario) y otro complementario a este, GNL, metanol u otros combustibles alternativos, y son aplicables a buques de todas las dimensiones [12].

Estos motores operan generalmente con uno de los dos combustibles, con la capacidad de cambiar fácilmente al otro. Normalmente, un combustible funciona como piloto para la combustión del segundo [12].

Además, los tipos de motores ICE se caracterizan típicamente por su **ciclo de combustión** (dos o cuatro tiempos) y su **velocidad de rotación** (baja, media o alta) donde [29]:

- Los motores de **dos tiempos de baja velocidad** son utilizados por barcos de carga más grandes para la propulsión mecánica directa o con engranajes.
- Los motores de **cuatro tiempos de velocidad media** se utilizan comúnmente para propulsión o generación de energía auxiliar y dominan la industria marina por el número de motores instalados.
- Y los motores de **cuatro tiempos de alta velocidad** se utilizan típicamente en embarcaciones más pequeñas.

Los combustibles alternativos pueden utilizarse en motores de combustión interna cuando los motores están diseñados o adaptados para ellos (*retrofit*). En la **Figura 8**, DNV proporciona información sobre la disponibilidad de motores DF para combustibles alternativos [29].

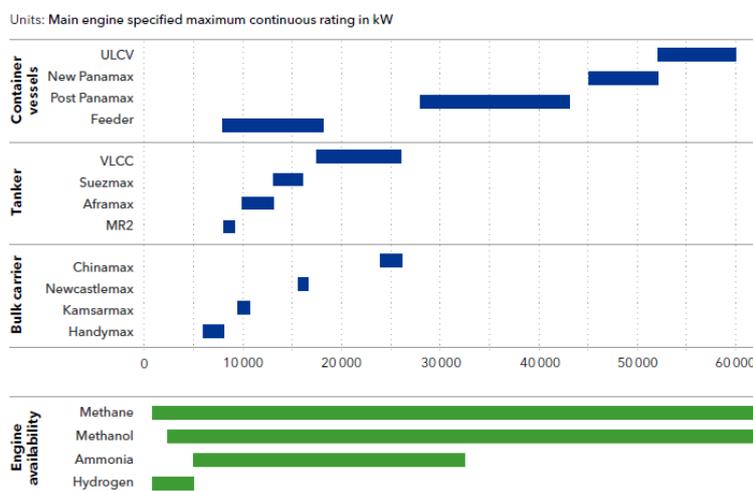


Figura 8. Disponibilidad de motores duales para combustibles alternativos [29]

La **Figura 8** muestra (en azul) la potencia máxima continua especificada del motor principal en kW para los motores habitualmente instalados según el tamaño del barco (segmentos de graneleros, petroleros y portacontenedores), comparándola con los intervalos de potencias de motores disponibles para el uso de metanol, metano, amoníaco o hidrógeno como combustible principal (en verde).

Se puede concluir que, hoy en día, el metanol y el GNL son las alternativas con mayor disponibilidad en cualquier intervalo de potencia, seguidas del amoníaco, que ya ha superado las potencias continuas máximas de 30.000 kW. El hidrógeno, tiene cabida en las potencias inferiores a 5.000 kW.

3.1.1. Fabricantes de motores

Los mayores fabricantes de motores marítimos de **dos tiempos** son **Everllence, WinGD y Japan Engine Corporation (J-Eng)**. En particular, Everllence es líder mundial en motores de dos tiempos, con una flota de 23.000 de los 33.000 motores de dos tiempos que operan a nivel global [27].

Por otro lado, los principales fabricantes de motores marinos de **cuatro tiempos** son **Wärtsilä, Everllence, Hyundai HiMSEN y WinGD**.

MOTORES DE METANOL

El metanol utilizado como combustible principal **puede reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 10%**. No obstante, tiene el potencial de convertirse en un combustible neutro en carbono si se produce de manera renovable, a partir de biomasa/biogás y/o electricidad renovable [30].

DOS TIEMPOS

Fabricante **Everllence**:

- Nuevos motores: cuenta con motores de dos tiempos de metanol operativos en 20 buques, incluidos varios *metanol carriers*, que pueden usar su carga como combustible, y una cartera de 90 pedidos adicionales (a partir de mayo de 2023) para operadores de portacontenedores como Maersk Line, Hyundai, CMA CGM y Cosco Shipping. Los buques se construyen bajo licencia de fabricantes de motores en Corea del Sur, Japón y China [16].
- Kits de adaptación: Everllence también está desarrollando un programa de *retrofit* para sus motores MAN B&W ME-C de dos tiempos. La compañía diseña sus motores ME-C con la posibilidad de conversión para metanol y para una variedad de otros combustibles alternativos [16].

Fabricante **WinGD**:

- Nuevos motores: WinGD ha anunciado algunos de sus primeros pedidos de motores duales de dos tiempos de metanol en China. En particular, un pedido de un motor de 90 cm de diámetro de pistón para un buque portacontenedor [16].
- Kits de transformación: Paralelamente, está diseñando un proceso de *retrofit* de motores, que ofrecerá al mercado, para los operadores de buques que consideren conversiones a metanol [16].

CUATRO TIEMPOS

Fabricante **Wärtsilä**:

- Nuevos motores: cuenta con un diseño de motor DF de cuatro tiempos y 32 cm de diámetro de pistón [16].
- Kits de transformación: El primer proyecto de *retrofit* de **Wärtsilä** fue el Stena Germanica de clase LR, donde los cuatro motores ZS40 del buque fueron convertidos para ser motores DF de metanol. El proyecto fue financiado por la UE y los costes de conversión ascendieron a 13 M€ con unos costes totales del proyecto de 22 M€ que incluían un tanque de almacenamiento de metanol en tierra, adaptación de una barcaza búnker y trabajo pionero en el proyecto, incluidas evaluaciones de seguridad y adaptación de reglas y regulaciones [16]. Wärtsilä estima que los costes de conversión futuros podrán ser entre un 30-40% más bajos y Stena Line ha contratado a Wärtsilä para convertir un número no revelado de sus otros ferris con motor DF de metanol (junio de 2023) [16].

Fabricante **Hyundai HiMSEN**:

- Nuevos motores: Hyundai afirma tener pedidos de 74 conjuntos de sus motores de metanol HiMSEN H32DF-LM de cuatro tiempos (32 cm de diámetro de pistón) a finales de marzo de 2023. Los primeros motores DF HiMSEN de Hyundai se instalarán en dos buques de Maersk [16].

Fabricante **Everlence**:

- Nuevos motores: para el mercado de cuatro tiempos, Everlence todavía está trabajando en tecnologías de inyección de metanol tanto para nuevas construcciones como para el *retrofit* de buques [16].
- Kits de transformación: Esta opción será la que primero llegará al mercado. La empresa cree que el *retrofit* de buques de cuatro tiempos será para los mercados de pasajeros y ROPAX (roll-on/roll-off para pasajeros). Sus primeras adaptaciones serán los motores en dos buques de crucero bajo un proyecto piloto en 2025 y un buque RO-RO (roll-on/roll-off) en 2026 [16].

Además de Everllence, Hyundai HiMSEN, WinGD y Wärtsilä, existen otros fabricantes de motores que están desarrollando soluciones capaces de ser alimentadas con metanol como Anglo Belgium Corporation (ABC), Caterpillar, China State Shipbuilding Corporation (con Hudong Heavy Industries), Rolls-Royce mtu Marine Solutions o ScandiNAOOS/Nordhaven Power Solutions [16].

MOTORES DE AMONIACO

Dado que la industria naviera se basa en el uso de grandes motores diésel, el uso de amoniaco verde en motores representa el punto de entrada más probable para este combustible, con desarrollos en curso para motores que funcionen con amoniaco. **Es posible operar con 100% amoniaco**, aunque a corto plazo podría requerirse un combustible adicional para apoyar la combustión (ya sea hidrógeno, diésel, gas natural licuado o gas licuado de petróleo) o plantearse **realizar un craqueado parcial del amoniaco a hidrógeno** para mejorar la combustión, **puediendo reducir las emisiones GEI en un 90% frente a los combustibles convencionales** [13] [31].

DOS TIEMPOS

Fabricante **Everllence**:

- Nuevos motores: Everllence está avanzando en el desarrollo de motores propulsados con amoniaco, con previsión de que estén listos en 2027. Para ello, han iniciado pruebas en sus instalaciones de Copenhague y están colaborando con MITSUI E&S en la construcción -iniciada en 2024- de un motor de pruebas.

En diciembre de 2024, Everllence anunció que la compañía ya ha conseguido operar su *Research motor* ME-LGIA del 25% hasta el 100% de carga en su centro de investigaciones de Copenhague [32]. El 17 de febrero de 2025, MITSUI E&S anunció el inicio de la fase de pruebas en su fábrica de Tamano (Japón) del primer motor MAN B&W 7S60ME-LGIA comercial de dos tiempos dual de amoniaco del mundo [33].

- Kits de transformación: Everllence está trabajando en soluciones de *retrofit* a amoniaco de motores duales existentes [10].

Fabricante **WinGD**:

- Nuevos motores: WinGD anunció en julio de 2023 la disponibilidad de sus motores de amoniaco de dos tiempos (Modelo X-DF-A) en 2025. Hasta la fecha, ha recibido pedidos para su uso en buques de Exmar LPG y Bocimar para 2025-2027 [10].

Fabricante **Japan Engine Corporation** (J-Eng):

- Nuevos motores: Planea completar su primer motor de amoníaco de 50 cm de diámetro de pistón en 2025 y seguir con un motor de 60 cm de diámetro a partir de 2026. Un barco de NYK utilizará un motor de amoníaco de este fabricante con fecha de entrega 2026 [29].

CUATRO TIEMPOS

Fabricante **Wärtsilä**:

- Nuevos motores: Wärtsilä es uno de los principales fabricantes que está desarrollando motores de cuatro tiempos que utilizan amoníaco como combustible. El fabricante lanzó comercialmente un motor alimentado con amoníaco como parte de su plataforma Wärtsilä 25, presentada en septiembre de 2022. Además, Viridis Bulk Carriers firmó una carta de intenciones para utilizar este motor [10].

La compañía también participa en un consorcio que ha recibido 10 M\$ en fondos de la Unión Europea para desarrollar motores de cuatro tiempos alimentados con amoníaco, y ya ha demostrado un concepto de motor funcionando con una mezcla del 70% de amoníaco. En 2020, la empresa anunció el comienzo de sus pruebas a gran escala de motores de amoníaco en Noruega gracias a una financiación de 2 M\$ del gobierno noruego [10] contando ya con un modelo comercial de motores de amoníaco en su catálogo.

Fabricante **Everllence**:

- Nuevos motores: Everllence también está trabajando en aplicaciones para motores de cuatro tiempos de amoníaco. La compañía anunció en octubre de 2024 el lanzamiento del proyecto de investigación AmmoniaMot 2, que tiene como objetivo desarrollar un motor de prueba de cuatro tiempos de velocidad media y combustible dual que funcione con amoníaco [34].

3.2. Pilas de combustible de hidrógeno y derivados

Las **pilas de combustible** (fuel cells, FC) son dispositivos que transforman de manera continua y directa la energía contenida en un combustible en energía eléctrica, mediante reacciones electroquímicas de oxidación-reducción. No se dan reacciones de combustión, por lo que el combustible no se quema. Si el combustible es hidrógeno puro, además de electricidad y energía térmica solo se obtiene agua como subproducto [35].

La unidad básica de una pila de combustible es la monocelda, que arroja un voltaje del orden de 1 voltio. Las aplicaciones industriales requieren el apilamiento de varias monoceldas, lo que da lugar al denominado *stack*. Es decir, es necesario unir monoceldas para obtener prestaciones suficientes en las aplicaciones industriales, en las que se emplean *stacks* [35].

Entre las ventajas de las pilas de combustible está el hecho de que presentan nulas o bajas emisiones, pues al no haber combustión no se producen óxidos de nitrógeno, ya que las reacciones que ocurren en su interior son de tipo redox, y el oxígeno y el nitrógeno no reaccionan entre sí [35].

Además, las pilas de combustible carecen de partes móviles, por lo que poseen bajo nivel de ruido, debido a los equipos auxiliares. En cuanto a la eficiencia, al no estar limitada por el rendimiento de Carnot, pueden alcanzarse valores más altos que en el caso de los motores térmicos [35].

Atendiendo al tipo de electrolito empleado, las pilas de combustible se clasifican en [35]:

- AFC – Alkaline Fuel Cell (Pila de combustible alcalina)
- PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Pila de combustible de membrana de intercambio protónico)
- DMFC – Direct Methanol Fuel Cell (Pila de combustible de metanol directo)
- PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell (Pila de combustible de ácido fosfórico)
- MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell (Pila de combustible de carbonatos fundidos)
- SOFC – Solid Oxide Fuel Cell (Pila de combustible de óxido sólido)

En la **Tabla 3** se resumen las **características técnicas de cada tipo de pila** de combustible. Un dato importante es la temperatura de operación de los diversos tipos de pilas de combustible, que abarca desde 65-80 °C (PEMFC, DMFC, AFC) hasta 1.000 °C (SOFC). Los tipos de pilas de combustible de mayor implantación en el ámbito marino son PEMFC (baja temperatura) y SOFC (alta temperatura).

Tabla 3. Características técnicas de los principales tipos de pilas de combustible [36] [37, 38]

Características	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Combustible	Hidrógeno	Hidrógeno	Metanol	Hidrógeno	Hidrógeno o metano	Hidrógeno o metano
Electrolito	KOH	Membrana de intercambio protónico	Membrana de intercambio protónico	H ₃ PO ₄	LiCO ₃ /K ₂ CO ₃	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃
Temperatura (°C)	<100	80	80	150-200	650	500-1.000
Conductor iónico	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ⁻²	O ⁻²
Ánodo	Ni Raney	Pt/C	Pt-Ru/C	Pt/C	NiO	Ni-ZrO ₂
Cátodo	Ag	Pt/C	Pt/Mo ₂ Ru ₅ S ₅	Pt/C	NiO	LaMnO ₃ /Sr
Matriz	Asbestos	-	-	SiC	LiAlO ₂	-
Tiempo de encendido (h)	<0,1	<0,1	<0,1	1-4	5-10	-
Densidad de potencia eléctrica (mW/cm ²)	620	420	-	250 (8 atm)	>150	120
Eficiencia (%PCS)	>50	48-50 (55% pico)	30-40	36-45	43-55	43-55
Rango de Potencia	5-150 kW	5-250 kW	5 kW	50 kW-11 MW	100 kW-2 MW	100-1.250 kW
TRL	TRL 8-9	TRL 9	TRL 6	TRL9	TRL 9	TRL 9
Aplicaciones	Transporte, vehículos especiales, aplicaciones militares, sistemas de almacenamiento de energía			Sistemas estacionarios de generación distribuida de potencia eléctrica y calor		

La **pila de combustible PEMFC** es una de las más utilizadas (**TRL 9**). Esta pila requiere hidrógeno de alta pureza por el uso de catalizadores de metales nobles, por lo que es necesario llevar a cabo una purificación previa del hidrógeno (puede verse afectada por niveles de partes por millón de CO o amoníaco) proveniente del reformado de vectores energéticos que lo contienen: como el metano, amoníaco o el metanol, entre otros [39].

A temperaturas más altas, estas pilas son más resistentes a las impurezas porque no usan metales nobles como catalizadores. En este sentido, se han desarrollado pilas PEMFC de alta temperatura, con membranas más duraderas, capaces de funcionar hasta a 140 °C [39].

Las pilas de **combustible de carbonatos fundidos (MCFC)** y de **óxido sólido (SOFC)** -ambas con **TRL 9**- operan a temperaturas tan elevadas que los hidrocarburos y el amoníaco se descomponen dentro de la pila de combustible, es decir, el reformado de los combustibles (amoníaco, metanol, etc.) ocurre en el interior de la propia pila, permitiendo el uso directo de estos compuestos en estos sistemas.

Existe también la posibilidad de emplear **pilas de combustible de metanol directo (DMFC), que oxidan directamente el metanol en el ánodo (TRL 6)**. La principal ventaja de esta tecnología es su adaptabilidad a un gran número de aplicaciones desde mW hasta kW, ya sean portátiles o estacionarias, donde la temperatura de trabajo no es un impedimento en ningún caso [40].

Aparte de su uso en buques de cortas y medias distancias, las pilas de combustible desempeñan un **papel clave en la hibridación de sistemas de propulsión en el transporte marítimo**, al integrarse con motores de combustión interna o sistemas de almacenamiento eléctrico para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes.

Esta integración permite **aprovechar las ventajas de cada tecnología: las pilas de combustible operan de forma óptima en cargas parciales y de base, mientras que los motores de combustión interna pueden cubrir picos de potencia y ofrecer flexibilidad operativa**. Gracias a esta hibridación, se reduce el consumo de combustible fósil, se minimizan las emisiones de CO₂ y contaminantes atmosféricos y se mejora la eficiencia global del sistema de propulsión, contribuyendo a los objetivos de descarbonización del sector y a la adaptación de los buques a las futuras regulaciones medioambientales. En el ámbito de la cogeneración a bordo, las pilas de combustible permiten generar simultáneamente electricidad y calor utilizable, mejorando el aprovechamiento energético en las operaciones marítimas. El calor residual producido por las pilas puede emplearse para calefacción de espacios, agua sanitaria o procesos auxiliares del buque, incrementando la eficiencia total del sistema energético a bordo. Esta capacidad de cogeneración es especialmente relevante en aplicaciones como ferris o buques de pasaje, donde las demandas térmicas son constantes y elevadas.

El uso principal de la energía a bordo de un buque es para la propulsión. Esta suele proporcionarse mediante un sistema de combustión interna basado en compresión con transmisión directa, a una escala suficiente para garantizar un margen de potencia superior al necesario para la navegación en aguas tranquilas. La selección de la potencia instalada adecuada para el motor principal es un componente clave en el proceso de diseño del buque. **Instalar un motor demasiado grande incrementa el índice de eficiencia energética del diseño del buque (EEDI)**, lo que reduce su eficacia económica general (a mayor EEDI, peor rendimiento). Por otro lado, un motor demasiado pequeño supone un riesgo para la maniobrabilidad del buque en condiciones de mar extremo [41]. **Otro requisito energético, denominado carga auxiliar, puede alcanzar niveles similares a los de la propulsión principal** en ciertas clases de buques, como los cruceros.

La **Figura 9** muestra las distintas **rutas alternativas para el flujo de energía desde el combustible hasta la propulsión del buque**. Se puede elaborar un esquema similar para la generación de energía auxiliar mediante grupos electrógenos, aunque el uso de pilas de combustible permitiría un sistema energético común comparable al ya empleado en buques diésel-eléctricos. Aunque el almacenamiento en baterías se presenta como una ruta independiente, en la práctica la mayoría de los sistemas actuales aplican soluciones híbridas para estabilizar la carga y reducir la capacidad instalada del motor de combustión interna (ICE) [41].

Almacenes de energía alternativos a corto plazo, como los supercondensadores, pueden cumplir una función similar. Un sistema de almacenamiento energético adecuado, como una batería, complementará de manera similar las limitaciones de variación de potencia máxima de las pilas de combustible. Esto mejorará aún más la eficiencia energética del sistema en su conjunto. De hecho, una ventaja percibida de varios sistemas de pilas de combustible es su capacidad para mejorar la eficiencia de conversión energética a bordo [41].

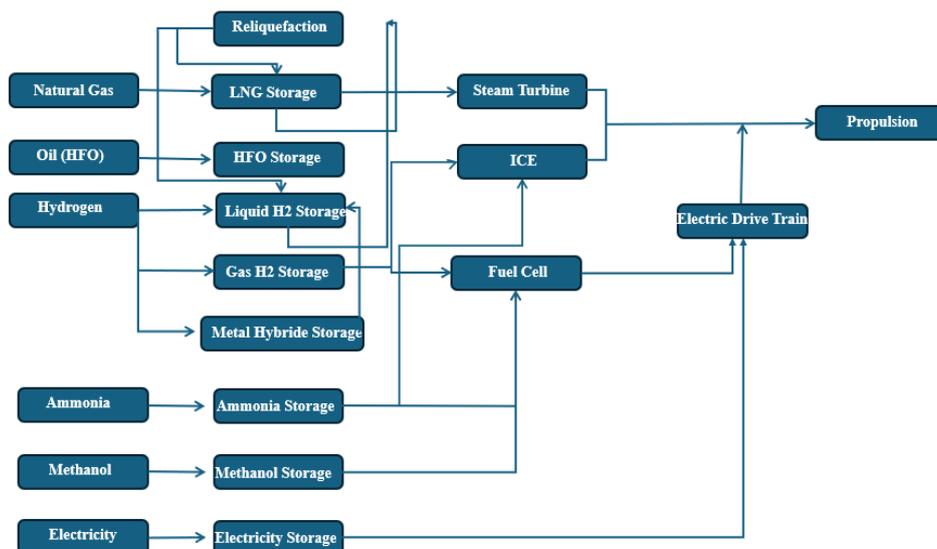


Figura 9. Rutas de flujo de energía para combustibles alternativos y motores principales [41]

El **mayor cambio futuro, si los sistemas modulares de pilas de combustible continúan reduciendo sus costes**, se producirá probablemente en la **propulsión eléctrica**. Diversas tecnologías emergentes en los sistemas eléctricos a bordo y aquellas en desarrollo mejorarán aún más el rendimiento [41].

Una ventaja de estos sistemas será la reducción significativa de la infraestructura de mantenimiento a bordo, así como la simplificación de los esquemas de distribución de energía. La posibilidad de aprovechar el calor generado por las pilas de combustible (cogeneración) para otras funciones a bordo requerirá un diseño cuidadoso, pero contribuirá a garantizar una alta eficiencia del sistema global [41].

3.3. Previsiones a futuro de la flota de nuevos buques

DNV en su publicación *Maritime Forecast to 2050* [29], expone el uso de combustibles alternativos en la flota mundial actual y futura a junio de 2024, analizando tanto el número de buques como el tonelaje bruto (GT).

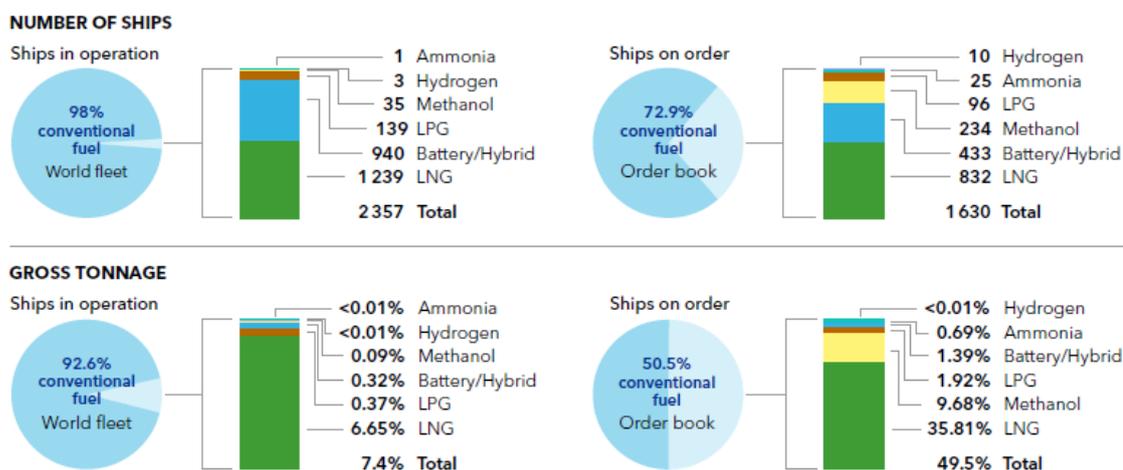


Figura 10. Empleo de combustibles alternativos en la flota mundial en número de buques (arriba) y tonelaje bruto GT, (abajo) en la actualidad [29]

Las principales conclusiones de la publicación son las siguientes:

- El **7,4%** de los buques en operación, medido en **tonelaje bruto** (GT), usan **combustibles alternativos**, y se espera que el **49,5%** lo hagan en el futuro, incluyendo los nuevos pedidos. Medido en **número de barcos**, los porcentajes son más bajos, el **2% y 27,1%** respectivamente, concluyendo que los barcos más grandes están optando por soluciones de combustibles alternativos.
- Los barcos alimentados con **GNL** representan el **6,7% del GT** en operación y se prevé que aumenten hasta el **36% en 2050**. Los pedidos a junio 2024 eran de 171 portacontenedores, 157 transportadores de automóviles, 93 petroleros, 16 graneleros y 22 cruceros. Los transportadores de GNL que usan su carga de gas natural como combustible constituyen 687 de los barcos en servicio, y 339 están en cartera de pedidos. En total **1.239** barcos capaces de usar GNL están actualmente **navegando**, mientras que **832** están **en cartera de pedidos**.
- Los barcos alimentados con **metanol** representan el **0,09% del GT** de la flota mundial en operación y aumentará al **9,68% en 2050**. En cartera de pedidos existen 173 portacontenedores, 24 graneleros y 20 transportadores de automóviles.
- En lo relativo al **amoniaco**, hay 1 barco en operación y 25 en cartera de pedidos (**0,69% del GT**). Entre ellos, CMB ha encargado una serie de ocho graneleros con motores principales capaces de

usar amoníaco como combustible, Exmar LPG BV dos transportadores de gas de tamaño medio capaces de utilizar amoníaco como combustible, y NYK otro más.

- Hoy en día, hay **940 barcos en operación** que usan **baterías** o sistemas híbridos como propulsión y **433 en pedido**. Los sistemas de propulsión totalmente eléctricos solo se usan en embarcaciones pequeñas con un alcance limitado.

Además, según la base de datos de Corredores de Transporte Verde de DNV (a partir de junio de 2024), actualmente **hay 60 corredores de transporte verde** anunciados con varios grados de madurez. En los países bálticos, ya se han realizado pruebas para operar un día a la semana [29].

Finalmente, en lo relativo a la conversión de barcos existentes para que funcionen con nuevos combustibles (*retrofit*), el número de candidatos a conversión estará limitado por factores como el valor del activo, la vida útil restante, las implicaciones de diseño y la disponibilidad de kits de conversión de combustible para el motor principal [29].

El análisis tecno-económico de una modernización debe considerar factores como: la duración de la conversión y coste de inactividad, la vida útil restante, los precios del combustible y el coste de las emisiones, así como el coste real de la conversión del motor y del barco [29].

4. ALMACENAMIENTO EN BUQUES Y BUNKERING

Los principios generales de seguridad de los **Códigos IGC⁶ e IGF⁷ proporcionan el marco para el uso de combustibles marinos de bajo punto de inflamación** [30].

Los principios de seguridad comunes, como la ubicación protegida de los tanques de combustible, las barreras dobles en las líneas de suministro de combustible, la ventilación y detección de gases, la clasificación de áreas peligrosas, la mitigación de explosiones, entre otros, son aplicables a todos los combustibles de bajo punto de inflamación. Sin embargo, las características específicas de cada uno de ellos pueden requerir medidas de seguridad particulares [30].

4.1. Metanol como derivado de hidrógeno

Las directrices provisionales de la OMI sobre la seguridad de los buques que utilizan alcohol metílico/etílico como combustible abordan aspectos relacionados con el diseño y disposición del buque, el sistema de contención del combustible, los materiales, el diseño de tuberías, el abastecimiento de combustible, la generación de energía, la seguridad contra incendios, la prevención de explosiones, la clasificación de áreas peligrosas, la ventilación, las instalaciones eléctricas, los sistemas de control, la capacitación de la tripulación y las operaciones [30].

Los combustibles líquidos como el metanol son más sencillos de manejar y se asemejan más a los buques convencionales de abastecimiento de combustible. Además de su comercialización y transporte en buques químicos durante años, existe **experiencia en el manejo de metanol** en flotas de Buques de Apoyo *Offshore* (*Offshore Support Vessel, OSV*) y Buques de Suministro a Plataformas (*Platform Support Vessel, PSV*) para la industria *offshore*, lo que puede servir como **referencia para una adopción más amplia del metanol como combustible de abastecimiento** [30].

En comparación con otros combustibles alternativos, el metanol es relativamente **eficiente en términos de almacenamiento de energía por volumen considerando el espacio físico del tanque**, aunque uno de sus desafíos es su bajo contenido energético y, por tanto, la menor cantidad de energía que puede almacenarse en los tanques de un buque [30].

Dicho lo anterior, la **adopción del metanol en buques de gran tamaño es más desafiante** ya que requeriría un rediseño significativo, especialmente porque los tanques de combustible tendrían que ampliarse para almacenar suficiente energía para viajes de larga distancia en aguas profundas. No

⁶ IGC: Código Internacional para la Construcción y el Equipamiento de Buques que Transporten Gases Licuados a Granel

⁷ IGF: Código Internacional de Seguridad para los buques que utilicen gases u otros combustibles de bajo punto de inflamación

obstante, tanto el entorno comercial como regulatorio de los buques de corta distancia, que requiere de un abastecimiento más frecuente, convierten al metanol en un candidato ideal para la adopción temprana como combustible [30].

4.1.1. Bunkering de metanol

El suministro de combustible, la infraestructura y el abastecimiento de metanol presentan algunos desafíos para su adopción a gran escala. Sin embargo, **las lecciones obtenidas del uso del GNL como combustible marino pueden ser aplicadas al desarrollo de la infraestructura de abastecimiento de metanol** [30].

Dado que el metanol es un combustible líquido en condiciones ambiente, los equipos y procedimientos de abastecimiento son similares a los utilizados con los combustibles convencionales [30]. La experiencia histórica y las mejores prácticas han sido desarrolladas en el sector de los buques tanque químicos y en embarcaciones sujetas al Código IBC, así como en el sector *offshore*, donde se ha adquirido experiencia en el manejo de metanol para operaciones de perforación [30].

Por ejemplo, la OMI ha sustituido la resolución A.673(16)⁸ por la A.1122(30)⁹, que introduce el Código para el Transporte y Manejo de Sustancias Líquidas Peligrosas y Nocivas a Granel en Buques de Apoyo *Offshore* (OSV Chemical Code) para estos buques [30].

4.1.2. Almacenamiento de metanol

El metanol es adecuado para su almacenamiento en tanques de combustible convencionales, lo que **facilita su integración en el diseño de los buques** en comparación con otros combustibles de bajo punto de inflamación. Sin embargo, según la MSC.1/Circ.1621, apartado 5.2.1, puede estar limitado por el revestimiento del casco del buque cuando se ubica por debajo de la línea de flotación [30].

El metanol suele proponerse en esta ubicación porque permite la conversión de varios tanques de lastre en posibles tanques de combustible. En este caso, los tanques requieren recubrimientos especiales (como zinc, entre otros) y, debido a su bajo punto de inflamación, pueden necesitar una atmósfera inerte de nitrógeno en el espacio de vapor del tanque [30].

⁸ A.673(16): Directrices para el transporte y manipulación en buques de apoyo mar adentro de cantidades limitadas de sustancias líquidas a granel potencialmente peligrosas o nocivas

⁹ A.1122(30): Código para el transporte y la manipulación de sustancias líquidas nocivas y potencialmente peligrosas a granel en buques de apoyo mar adentro (código químico para los OSV)

Independientemente del combustible o tecnología seleccionada, el proceso de decisión es altamente específico para cada embarcación. Además, se requieren espacios de seguridad adicionales, como *cofferdams* o compartimentos de aislamiento [30].

Finalmente, **la infraestructura de distribución de metanol se ha desarrollado durante décadas para su uso en la industria química**, lo que asegura su disponibilidad. Si bien, se proyecta que se necesitarán varias terminales adicionales si el metanol se adopta como combustible marino [30].

La **Figura 11** muestra la capacidad estimada de almacenamiento de metanol a nivel mundial, lo que respalda su viabilidad logística como combustible marino a medio plazo [42].



Figura 11. Capacidad estimada de almacenamiento de metanol a nivel mundial [42]

4.2. Amoníaco como derivado de hidrógeno

Mientras los **requisitos específicos para el abastecimiento o bunkering de amoníaco aún están en discusión** entre los actores de la industria marítima, los requerimientos/las **condiciones para su transporte como carga, incluyendo las operaciones de carga y descarga, ya han sido establecidos en la industria y están regulados por el Código Internacional de la OMI** para la Construcción y Equipamiento de Buques que Transportan Gases Licuados a Granel (*IGC Code*).

Estos requisitos también han sido incorporados en las Reglas ABS para la Construcción y Clasificación de Buques Marinos, Parte 5C, Capítulo 8: "*Buques Destinados al Transporte de Gases Licuados a Granel*" [43].

4.2.1. Bunkering de amoniaco

Es lógico asumir que los puertos que actualmente cuentan con terminales de amoniaco y manejan su comercio podrían convertirse en la base de una red de distribución de amoniaco como combustible para buques en el futuro [44].

En 2020 existían aproximadamente **170 terminales de amoniaco en todo el mundo**, cuya distribución geográfica se presenta en la **Figura 12**.



Figura 12. Terminales de distribución de amoniaco y principales puertos de *bunkering* en 2020 [45]

El almacenamiento de amoniaco en las terminales suele consistir en tanques isotérmicos especiales -con capacidad de hasta 30.000 toneladas- y depósitos esféricos a presión -con capacidades entre 1.000 y 2.000 toneladas- [44]. Para la carga y descarga de amoniaco líquido desde los buques se emplean sistemas específicos de tuberías y válvulas en brazos de transferencia [45].

Mientras que los combustibles tradicionales presentan una amplia y compleja variedad de propiedades, **el amoniaco es un combustible limpio compuesto por una única sustancia**, lo que elimina las variaciones entre tipos y calidades, **simplificando significativamente los procesos de abastecimiento, certificación y análisis del combustible** [45].

Actualmente, existen diversas discusiones y proyectos en la industria marítima que buscan desarrollar procedimientos y establecer directrices para implementar el abastecimiento de amoniaco (*bunkering*).

4.2.2. Transporte y almacenamiento de amoniaco

Para el amoniaco, el **tipo de tanque de combustible se seleccionará en función de cuál permita maximizar el volumen potencial de almacenamiento** dentro de un espacio restringido, teniendo en cuenta las normativas de seguridad y sin comprometer las especificaciones de diseño del buque. También debe prestarse especial atención a aspectos como la estabilidad del buque, el comportamiento en la mar o los sistemas de seguridad.

Para el transporte marítimo de amoniaco, es común utilizar buques gaseros diseñados para el transporte de GLP. Existen cuatro tipos de tanques independientes en estos buques:

- Tanques **Tipo A** con almacenamiento completamente refrigerado.
- Tanques **Tipo B** con almacenamiento parcialmente refrigerado.
- Tanques **Tipo C** con almacenamiento presurizado o semipresurizado.
- Tanque de **membrana** con almacenamiento completamente refrigerado.

El **tipo de tanque elegido determinará las medidas de seguridad requeridas**. Por ejemplo, los tanques de almacenamiento Tipo A, Tipo B y de membrana requerirán sistemas de barrera de gas inerte, que ocupan más espacio, mientras que los tanques Tipo C no lo requieren.

Los sistemas refrigerados también necesitan espacio adicional para la compresión en dos etapas, mientras que los tanques completamente presurizados no lo requieren. Asimismo, los tanques refrigerados requieren material aislante, a diferencia de los tanques Tipo C, que operan a temperatura ambiente.

Una ventaja de los tanques Tipo A y de membrana es que, generalmente, ofrecen una mayor eficiencia volumétrica dentro de un espacio prismático determinado. Estas variaciones en el tipo de tanque de combustible son de gran relevancia.

Dependiendo de las condiciones de temperatura y presión del amoniaco, se deben considerar diversas configuraciones de transferencia entre el proveedor y el buque receptor [43]:

- **Transferencia entre condiciones de almacenamiento similares:** La transferencia de amoniaco entre condiciones de temperatura y presión similares es altamente viable. Aunque los principios operativos para las transferencias completamente refrigeradas y semirrefrigeradas son los mismos, el amoniaco no refrigerado (o presurizado) requiere un tanque de almacenamiento y un sistema de transferencia diseñados para soportar presiones más altas. El amoniaco no refrigerado se almacena a temperatura ambiente, lo que elimina las operaciones a baja temperatura, pero aumenta el riesgo de fugas debido a la alta presión.

- **Transferencias de almacenamiento más frío a más cálido:** La transferencia de amoníaco desde almacenamiento completamente refrigerado a semirrefrigerado es económicamente viable, siempre que las bombas del primer sistema tengan la presión de descarga suficiente para alcanzar las condiciones de almacenamiento semirrefrigeradas. La transferencia de amoníaco desde sistemas de almacenamiento completamente refrigerados o semirrefrigerados a sistemas no refrigerados requerirá bombas de refuerzo con una presión de descarga mucho mayor para cumplir con los requisitos de presión. Aunque esto es técnicamente factible, la transferencia de amoníaco de condiciones más frías a más cálidas puede generar problemas técnicos y operativos.
- **Transferencias de almacenamiento más cálido a más frío:** La transferencia de amoníaco desde condiciones de almacenamiento más cálidas a más frías no es comercialmente viable debido a los requisitos de mecanismos de enfriamiento adicionales para cumplir con las condiciones del tanque receptor. Por lo tanto, las transferencias desde almacenamiento no refrigerado a completamente refrigerado o semirrefrigerado se consideran económicamente inviables.

5. PROYECTOS E INICIATIVAS MÁS DESTACADAS

5.1. Producción de amoniaco y metanol renovable

5.1.1. Proyectos de producción de amoniaco

El amoniaco es uno de los siete productos químicos básicos, junto con el etileno, propileno, metanol y los aromáticos BTX, que se utilizan para la producción de todos los demás productos químicos. Es el segundo más producido en términos de masa [14].

La demanda global de amoniaco es de aproximadamente 183 millones de toneladas en mientras que **la capacidad de producción mundial se situó en torno a los 243 millones de toneladas por año** [14].

Desde el año 2000 se han construido en todo el mundo más de 130 plantas de amoniaco convencional, de capacidad de producción mayor o igual a 1000 toneladas métricas por día, basadas en la tecnología de los cuatro principales licenciantes del mundo, y que suman en total una capacidad adicional de producción de amoniaco diaria de más de 230.000 toneladas.

Actualmente, no existen plantas de amoniaco verde a escala industrial en operación en ninguna parte del mundo. Aunque **la mayoría de los proyectos de amoniaco verde con capacidades superiores a 1.000 toneladas métricas por día** aún se encuentran en fase previa a la Decisión Final de Inversión (pre-FID), su creciente número refleja un fuerte interés del sector y una clara apuesta por el desarrollo de soluciones a gran escala para la descarbonización.

5.1.2. Proyectos de producción de metanol

El metanol es otro de los siete productos químicos básicos que se utiliza para la producción de todos los demás productos químicos. Se producen aproximadamente 110 millones de toneladas (Mt) al año, con una **capacidad de producción mundial de aproximadamente 170 millones de toneladas por año** [46].

En los últimos 15 años, se han construido en todo el mundo más de 76 plantas de metanol convencional, basadas en la tecnología de los principales licenciantes mundiales, y con una capacidad adicional de producción total de metanol diaria de casi 23.000 toneladas.

Considerando a los principales licenciantes de tecnologías de metanol verde a nivel mundial, sólo **tres plantas de producción de metanol**, dos en China y una en Dinamarca [47], **pueden considerarse plantas a escala industrial**. También se cuenta con otras seis plantas operando a nivel demostradores y una planta piloto. Además, hay otros dos proyectos que se van a poner en marcha este año, uno a

escala industrial y un demostrador; y un tercer proyecto a escala industrial en las primeras fases de construcción. Aparte, existen otros 16 proyectos a escala industrial en desarrollo en fase pre-FID.

5.2. Usos de amoniaco y metanol en el sector marítimo

5.2.1. Proyectos de buques de amoniaco

Desde 2019, la **mayoría de los proyectos relacionados con el amoniaco** en el ámbito marítimo se han centrado en el **diseño de buques propulsados con este combustible**. Estos proyectos abarcan los principales tipos de embarcaciones, incluyendo petroleros, buques gaseros, graneleros, portacontenedores, cruceros tipo *RORO* y remolcadores [45]

Se ha identificado a **los buques transportadores de amoniaco como el primer tipo de embarcación en adoptar este combustible como fuente de energía para abastecimiento**. El segmento de buques transportadores de amoniaco y gas licuado de petróleo (LPG) de la flota mundial representa aproximadamente el 2% del consumo de combustible marítimo y será necesario llevar a cabo estas transformaciones durante esta década, ya que los barcos suelen tener una vida útil de 20 a 25 años [14].

En cuanto al diseño y construcción de estos buques, la mayoría de los proyectos (**Tabla 4**) se desarrollan en Asia y Europa, en países como China, Corea del Sur, Japón, Noruega, Finlandia y Dinamarca [48].

Tabla 4. Proyectos de buques y *bunkering* de amoniaco [48]

Category	Location	Main Partners	Project Description
Ammonia Bunkering	Singapore	Nanyang Technological University, American Bureau of Shipping, Ammonia Safety and Training Institute, ExxonMobil, EPS, Everllence, Jurong Port, PSA International, Hoegh LNG	Ammonia as the marine fuel in Singapore – supply chain, bunker safety and potential issues
	Singapore	Itochu group, Itochu Enex, Itochu Corporation, Vopak terminal	Memorandum of Understanding to study ammonia marine fuel supply chain in Singapore
	Singapore	A. P. Moller - Maersk A/S, Fleet Management Limited, Keppel Offshore & Marine, Maersk Mc-Kinney Moller Center for Zero Carbon Shipping, Sumitomo Corporation, Yara	Ammonia as marine fuel in Singapore
	Singapore	Global Centre for Maritime Decarbonisation	Ammonia bunkering study
Bunker Tanker / Gas Carrier	South Korea	MISC Berhad, Samsung Heavy Industries, Lloyd's Register, Everllence, Yara, and Port Authority of Singapore	The Castor Initiative: design an ammonia-fuelled tanker, establish the design, concepts and identify the regulatory requirements
	Finland	Wärtsilä, Aker Solutions, DFDS, Equinor, Grieg Star	Zeeds (Zero Emission Energy Distribution at Sea initiative): Onshore and offshore green NH3 production and distribution
	Japan	NYK Line, Japan Marine United Corporation, Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK)	Ammonia fuelled ammonia gas carrier and ammonia floating storage and regasification barge
	Norway	Grieg Edge, Wärtsilä	120 m long ammonia fuelled tanker with a cargo capacity of 7,500 m3 of ammonia
	South Korea	Hyundai Mipo Dockyard, Lloyd's Register, Everllence	50,000 DWT MR tanker design
	China/Greece	Avin International, China's New Times Shipbuilding	Suezmax series tanker
	South Korea	Lloyd's Register, Samsung Heavy Industries, MISC Berhad	Ammonia fuelled very large crude carriers (VLCCs)

Bulk Carrier	China	Shanghai Merchant Ship Design & Research Institute (SDARI), Lloyd's Register	180,000 tons bulk carrier design
	Japan	Japan Shipping Zero Emission Project by industry consortium	80,000 DWT bulk carrier concept design
	China	Shanghai Merchant Ship Design & Research Institute, China State Shipbuilding Corporation	Ammonia fuelled 7,000-unit capacity car carrier
Container Ship	China	Dalian Shipbuilding Industry Co., Lloyd's Register, Everllence	23,000 TEU ultra-large container ship concept design
	China	American Bureau of Shipping, Everllence Shanghai Merchant Ship Design & Research Institute	2,700 TEU container ship design (Chittagongmax Container)
	South Korea	Lloyd's Register, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, Everllence	23,000 TEU ultra-large container ship design
Other Types of Vessels	Norway	Colour Fantasy	The world's largest RORO cruise liner
	Japan	NYK Line, IHI Power Systems Co., Ltd., Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK)	Tugboat design
	Denmark	Global Maritime Forum, Lauritzen-Kosan, Yara, Ørsted, Wärtsilä Everllence, DNV, Danish Ship Finance, DNB, Fürstenberg Maritime Advisory	The construction of the world's first ammonia-powered deep-sea vessel
	Norway	Ship FC Consortium, Equinor, Eidesvik Offshore, Wärtsilä, Prototech, Yara, FraunhoferIMM, SME Persee, The University of Strathclyde, National Centre for Scientific Research, Demokritis, North Sea Shipping, CapitalExecutive Ship Management, Star Bulk Ship Management, Sustaina	Offshore vessel Viking Energy: 2 MW ammonia fuel cell to be retrofitted

5.2.2. Proyectos de pila de combustible (FC) de hidrógeno y derivados

La **tecnología de hidrógeno y pilas de combustible ya se ha aplicado en submarinos, pequeños buques de aguas interiores o costeras, y como fuente de energía auxiliar**, demostrando su viabilidad a pequeña escala. Además, existen en ejecución varios proyectos de demostración en ferris y transportadores de pequeño tamaño. Recientemente se han financiado algunos proyectos de buques de carga más grandes, pero los buques a escala comercial generalmente se encuentran en la etapa de estudio de diseño y actualmente se están probando una variedad de combustibles y tipos de pilas de combustible.

Los motores de combustión multi-combustible -que son capaces de funcionar con una variedad de combustibles gaseosos y líquidos- ya están en el mercado. **La cadena europea de suministro de hidrógeno y pilas de combustible está aumentando su interés en el transporte marítimo y fluvial**, con cooperaciones formales y empresas conjuntas entre fabricantes de FC y algunos proveedores de motores o sistemas de propulsión marítimos e integradores de sistemas.

Según un estudio de la Universidad de La Coruña [36], las pilas de combustible tienen un gran potencial para su uso a bordo de buques, especialmente en la generación de energía eléctrica auxiliar en aguas y

puertos con regulaciones medioambientales estrictas. Además, otro análisis de la Universitat Politècnica de Catalunya [49] destaca la creciente implementación de pilas de combustible en el transporte marítimo como medida para reducir emisiones.

Por otro lado, **la pila de combustible de metanol directo (DMFC) ha sido identificada como una tecnología prometedora debido a su eficiencia y simplicidad**, lo que la hace adecuada para aplicaciones estacionarias y portátiles [40].

Estos estudios respaldan la idea de que la tecnología de pilas de combustible está en desarrollo en España, aunque su uso actual en buques se limita principalmente a sistemas auxiliares y con metanol como combustible [36] [40].

Para ciertos tipos de uso (aguas interiores y buques pequeños que naveguen y se mantengan cerca de la costa) y posiblemente **para cruceros, se considera que las pilas de combustible de hidrógeno son una opción prometedora de cero emisiones**. En Europa ya se han puesto en marcha varios proyectos recogidos en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Ejemplos de proyectos marítimos que utilizan pilas de combustible

Proyecto / Empresa	Tipo de pila	Combustible	Escala	Descripción	Fuente
Hydra / NORLED	PEMFC (Ballard FCwave™)	Hidrógeno	Ferry RoPax, 82 m, 295 pax, 80 vehículos,	Utiliza hidrógeno líquido como combustible cero emisiones para la propulsión del ferry. Está equipado con un tanque de 80 metros cúbicos de capacidad para almacenamiento de hidrógeno. Reduce las emisiones anuales de carbono hasta en un 95%	[50]
HySeas III (H2020)	PEMFC	Hidrógeno	Ferry de 40 m, 120 pax + 16 coches (o 2 camiones)	El proyecto demostró con éxito la integración de las pilas de combustible en un sistema de propulsión eléctrica híbrido marino de probada eficacia	[51]
HySHIP (FCH JU)	PEMFC (~3 MW)	Hidrógeno	Buque de aprovisionamiento de hidrógeno	El buque funciona con hidrógeno verde líquido, además de distribuir LH2 a los centros de hidrógeno a lo largo de la costa noruega	[52]
Flagships (FCH JU)	PEMFC (~1.6 MW)	Hidrógeno	Armadores NORLED y CFT	Ambos buques funcionan con hidrógeno líquido producido in situ con electrolizadores alimentados por electricidad renovable	[53]
eSHyIPS (FCH JU)	N/A	Hidrógeno	N/A	Definir las nuevas directrices para una introducción efectiva del hidrógeno en el sector del transporte marítimo de pasajeros e impulsar su adopción dentro de la estrategia global y de la UE para un medio ambiente limpio y sostenible, hacia la consecución de un escenario de navegación de cero emisiones.	[54]
HIDRAM	PEM / SOFC	Amoniaco	Pequeña	Desarrollar un demostrador pionero en Europa de almacenamiento de hidrógeno en forma de amoniaco verde, incluyendo la síntesis de amoniaco a partir del hidrogeno verde y dos tecnologías para su conversión en electricidad (pilas PEM y SOFC) aplicándolo en el sector naval como combustible multipropósito	[55]
ShipFC (FCH JU)	SOFC (~2 MW)	Amoniaco	Viking Energy" (PSV reconvertido), ≈95 m	El buque utiliza una gran pila de combustible de amoniaco, lo que le permite navegar únicamente con el combustible limpio hasta 3.000 horas al año. También se estudia su eficiencia operativa en otros tres tipos de buques para ilustrar la capacidad de transferir la tecnología a otros segmentos de la industria del transporte marítimo	[56]

HyMethShip	SOFC	Metanol	Comercial media	Combina un reactor de membrana, un sistema de captura de CO ₂ , un sistema de almacenamiento de CO ₂ y metanol, así como un motor de combustión alimentado por hidrógeno en un solo sistema	[57]
GreenPilot (Suecia)	PEMFC	Metanol	Pequeña	El proyecto incluyó la conversión y prueba de tres motores diferentes para que funcionaran con metanol, dos de los cuales se instalaron y operaron en el barco piloto convertido	[58]
E1 Marine	PEMFC	Metanol	Remolcadores	El sistema convierte el metanol en hidrógeno a bordo del remolcador, que luego se utiliza en una celda de combustible para generar energía de manera limpia y eficiente	[59]
Fraunhofer IMM	PEMFC	Metanol	Pequeña/Media	Han desarrollado un reformador altamente compacto con varias ventajas sobre la tecnología convencional, como la robustez del catalizador, mayor actividad (reduciendo la demanda de catalizador) y la integración óptima del calor	[60]
SerEnergy	PEMFC	Metanol	Auxiliar	Estas pilas de combustible pueden suministrar energía sin pérdida de energía de convertidores adicionales, proporcionando un suministro de energía altamente eficiente	[61]

Hasta la fecha, la escala de las demostraciones sigue siendo significativamente inferior a lo que se requiere para que una pila de combustible se convierta en la principal fuente de energía dentro de un barco intercontinental o crucero. No obstante, se están llevando a cabo varios proyectos de diseño para probar la aplicabilidad de la integración de FC dentro de este tipo de embarcaciones.

A día de hoy no se ha alcanzado un consenso sobre la estrategia óptima para la tecnología de combustible y propulsión debido a la diversidad del transporte marítimo, como la magnitud del almacenamiento de energía y la potencia requerida para diversos casos (teniendo en cuenta factores como tipo y tamaño del buque, máxima carga a transportar, distancias a cubrir o tipos de ruta, etc.), así como las implicaciones para el diseño, la integración, el almacenamiento de combustible y la regulación de los buques.

CONCLUSIONES

La necesidad de descarbonizar el transporte marítimo sitúa a **derivados del hidrógeno, como el amoníaco y el metanol, como pilares tecnológicos en la transición energética** del sector dadas sus propiedades, niveles de madurez tecnológica, aplicaciones y perspectivas de mercado.

- **Propiedades de los combustibles alternativos**

El metanol, es el derivado del hidrógeno con mayor densidad energética volumétrica y puede almacenarse en estado líquido a temperatura y presión ambiente, facilitando su integración en buques e infraestructura portuaria. Su menor poder calorífico respecto a los combustibles tradicionales implicará requerimientos de espacio mayores para mantener la autonomía en rutas de larga distancia. La utilización de metanol como combustible principal puede reducir las emisiones de GEI en aproximadamente un 10%. Su potencial como combustible neutro en carbono dependerá de la disponibilidad de electricidad renovable y CO₂ biogénico.

Por su parte, el amoníaco, si bien posee una densidad energética menor a la del metanol, se beneficia de una infraestructura logística global ya existente para su transporte, almacenamiento y manipulación, y presenta costes de almacenamiento inferiores al hidrógeno, aunque requerirá de adaptaciones en diseño de buques para producirlo de forma segura y eficiente. El amoníaco verde es capaz de reducir las emisiones GEI en un 90% frente a los combustibles convencionales utilizados hasta la fecha.

Tanto el amoníaco como el metanol implicarán limitaciones de espacio a bordo que deben considerarse en el diseño y reconversión de buques.

- **Seguridad y gestión de riesgos**

El metanol requiere sistemas de inertización, ventilación, protección contra incendios y materiales anticorrosivos; mientras que el amoníaco, menos inflamable, se gestiona con estándares de seguridad industrial consolidados.

La experiencia de la industria en el manejo de amoníaco contribuye al desarrollo de protocolos de seguridad para su uso como combustible, mientras que el metanol es compatible con sistemas y materiales existentes en los buques, lo cual reduce las barreras de su implementación.

- **Normativa internacional y europea**

El marco normativo actual establece objetivos para la reducción de emisiones en el transporte marítimo, incluyendo la Estrategia de la OMI que plantea una reducción del 20% en 2030 y neutralidad en 2050, así como la regulación *FuelEU Maritime* que fija reducciones progresivas de emisiones de GEI y mecanismos de certificación. Se espera que ambas regulaciones converjan para evitar la pérdida de competitividad en Europa.

En materia de combustibles, la normativa para el uso de metanol como combustible ya está desarrollada (MSC.1/Circ.1621) y en aplicación. En relación con el uso del amoníaco, se están desarrollando enmiendas a los Códigos IGF e IGC, con la previsión de que entren en vigor en 2027. Se espera que su aprobación formal tenga lugar en octubre de 2025, lo que consolidará un marco normativo para garantizar su uso seguro a bordo.

- **Disponibilidad de motores y tecnologías de propulsión**

Tanto el metanol como el amoníaco ya tienen desarrollos industriales en motores Dual Fuel (DF) de dos y cuatro tiempos (TRL 9), así como kits de adaptación (*retrofit*) para buques existentes. Fabricantes como Everllence, Wärtsilä, WinGD y Hyundai HiMSEN lideran este sector. El metanol ya se usa comercialmente en 35 buques en operación y cuenta con kits de adaptación desarrollados. En cuanto al amoníaco, existe un barco en operación hasta la fecha, además de 25 nuevos pedidos, y se espera que los kits de adaptación de los buques estén desarrollados en 2027.

En lo relativo a las pilas de combustible, se observa un creciente interés en el uso de las tecnologías MCFC y SOFC (TRL 9), capaces de utilizar amoníaco y metanol como vectores de hidrógeno, para aplicaciones de generación de energía auxiliar y en sistemas híbridos a bordo. Por otra parte, las PEMFC integradas con sistemas de reformado de metanol se proyectan para buques de pequeño porte y transporte costero, donde se simplifica el reabastecimiento y se maximizan las ventajas operativas de estas tecnologías.

- **Perspectivas de mercado y demanda futura**

Los análisis de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y Everllence prevén que el amoníaco se convertirá en uno de los principales combustibles alternativos para 2050, alcanzando una cuota del 35-44% del mix marítimo, mientras que el metanol se proyecta como un combustible de transición a corto y medio plazo con cuotas entre el 3% y el 26% según escenarios.

El metanol se consolida como opción cortoplacista, determinada por la disponibilidad de CO₂ biogénico, en rutas de corta y media distancia por su facilidad de integración. Mientras que el amoniaco se perfila como solución a largo plazo, especialmente para rutas transoceánicas, siendo clave el desarrollo de cadenas de valor de amoniaco verde para garantizar emisiones netas cero.

El hidrógeno, principalmente en pilas de combustible, se vislumbra en aplicaciones para buques pequeños, ferris y transporte costero en fases tempranas. Este hidrógeno podría obtenerse a bordo a partir de metanol o amoniaco a partir de procesos de reformado o craqueo respectivamente.

- **Logística y *bunkering***

El amoniaco como combustible aprovechará la infraestructura portuaria existente, con más de 170 terminales operativas en todo el mundo, sirviendo como nodos logísticos futuros. En cuanto al metanol, su infraestructura de *bunkering* y almacenamiento ya está disponible gracias a su uso en la industria química y operaciones *offshore*, facilitando su expansión.

Los buques que ya transportan amoniaco o metanol son los primeros candidatos para convertirse en buques propulsados por estos combustibles, utilizando su experiencia operativa y reduciendo barreras logísticas.

- **Conclusión estratégica**

Los derivados del hidrógeno, tanto el metanol como el amoniaco, ofrecen soluciones viables y complementarias en la hoja de ruta de la descarbonización del transporte marítimo, con escalabilidad, madurez tecnológica y capacidad de integración en sistemas existentes. Para maximizar su potencial será necesario:

- Avanzar en el desarrollo de normativa específica, en especial para amoniaco.
- Impulsar la producción renovable de ambos combustibles para garantizar su sostenibilidad climática real.
- Adecuar la infraestructura portuaria y de *bunkering* para facilitar su suministro seguro y competitivo.
- Potenciar la inversión en tecnologías de propulsión y sistemas de almacenamiento y manejo seguros a bordo.

De esta forma, el amoniaco y el metanol podrán desempeñar un papel fundamental en la transición del sector marítimo hacia emisiones netas cero, garantizando al mismo tiempo la competitividad y sostenibilidad de las cadenas logísticas globales.

REFERENCIAS

- [1] IEA, «The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector,» 2022.
- [2] UC3M, La descarbonización del transporte marítimo y la problemática relativa a la prueba de las emisiones de efecto invernadero en la UE, 2025.
- [3] IEA, How the shipping sector could save on energy costs, 2025.
- [4] Consejo Europeo, «Plan Europeo para la Transición Ecológica,» 2023.
- [5] EC, Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC, 2023.
- [6] CE, «DIRECTIVA 2003/87/CE».
- [7] ABS, «Beyond the Horizon: Carbon Neutral Fuel Pathways and Transformation Technologies,» 2024.
- [8] OMI, Cutting GHG emissions. International Maritime Organization, 2025.
- [9] Momentum, Decarbonizing the maritime shipping industry, 2023.
- [10] Lloyd's Register, «Fuel for thought Ammonia,» 2024.
- [11] IRENA AND METHANOL INSTITUTE, Innovation Outlook: Renewable Methanol. International Renewable Energy Agency, 2021.
- [12] Oeko-Institut, «Ammonia as a marine fuel,» 2021.
- [13] Ash, N. and Scarbrough, T., Sailing on solar: Could green ammonia decarbonise international shipping?, 2019.
- [14] IRENA AND AEA, Innovation Outlook: Renewable Ammonia, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, 2022.
- [15] INSST (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo), Límites de exposición profesional - Amoniaco, 2025.
- [16] Lloyd's Register, Fuel for thought Methanol, 2023.
- [17] IMO, «IMO approves net zero regulations,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/pages/IMO-approves-netzero-regulations.aspx>.
- [18] IMO, «Comité de Protección del Medio marino (MEPC),» 2025. [En línea]. Available: <https://www.imo.org/es/MediaCentre/MeetingSummaries/Paginas/MEPC-83rd-session.aspx>.
- [19] D. R. O'Connor, Liquid ammonia fuel storage alternatives and minimizing integration impact on ship design (Master's thesis), 2023.
- [20] IMO, Subcomité de transporte de cargas y contenedores, 7ª sesión (CC 7), 2021.

- [21] OMI, Interim guidelines for the safety of ships using ammonia as fuel (MSC.1/Circ.1687). Ammonia Energy Association, 2025.
- [22] EMSA, Safety of Ammonia for Use in Ships, 2024.
- [23] IMO, Directrices para la seguridad de los buques que utilizan etanol/metanol como combustible, 2020.
- [24] ANAVE, Nuevos combustibles ecológicos para buques, 2022.
- [25] Clean Hydrogen Partnership, Clean Hydrogen JU SRIA, 2022.
- [26] IEA, Aviation and shipping, 2023.
- [27] Everllence (MAN Energy solutions), «A new chapter - Ammonia two-stroke engines (powering the maritime energy transition),» 2024.
- [28] DNV, «Maritime Forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2022».
- [29] DNV, «Energy Transition Outlook 2024: Maritime forecast to 2050,» 2024.
- [30] ABS, Sustainability whitepaper - Methanol as a marine fuel, 2021.
- [31] Y. W. X. L. J. & L. H. Zhang, Descarbonización del transporte marítimo a través de soluciones de almacenamiento de hidrógeno mediante la generación de amoníaco verde como combustible multipropósito, 2024.
- [32] Everllence (MAN Energy solutions), «Research motor Centro de Investigación de Copenhague,» 2024.
- [33] Everllence (MAN Energy solutions), MITSUI E&S Commences Full-Scale Ammonia Testing, 2025.
- [34] Everllence (MAN Energy solutions), Ammonia-Powered Engine to be Developed for Medium-Speed Marine Applications, 2024.
- [35] EOI, Pilas de combustible. Parte I: Conceptos y estado tecnológico, 2014.
- [36] Universidad de La Coruña, Análisis de las posibilidades de uso de las células de combustible en buques, 2012.
- [37] IEA, ETP Clean Energy Technology Guide, 2025.
- [38] Clean Energy Technology Observatory, Fuel Cell Technology in the European Union - 2024 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, 2024.
- [39] RSC, Challenges in the use of hydrogen for maritime applications Energy & Environmental Science 2021, 2021.
- [40] TECPA, La pila de combustible de metanol directo: qué es y cómo funciona, 2024.
- [41] IEA, IEA's Hydrogen TCP Task 39: Hydrogen in the Maritime, 2021.
- [42] ABS, Setting the course to Low Carbon Shipping: Pathways to Sustainable Shipping, 2020.
- [43] ABS, Ammonia Bunkering: Technical and Operational advisory, 2024.

- [44] Hafnia, Ammonfuel - An Industrial View of Ammonia as a marine fuel, 2020.
- [45] Nanyang Technological University, Ammonia as a marine fuel Maritime Energy & Sustainable Development (MESD), 2022.
- [46] Methanol Institute, The Methanol Industry, 2025.
- [47] European Energy, Inaugurada oficialmente la planta de e-metanol de Kassø, 2025.
- [48] Maritime Energy & Sustainable Development (MESD) Centre of Excellence, Nanyang Technological University , Ammonia as a marine fuel. Nanyang Technological University, 2022.
- [49] UPC, Estudio y análisis de la tecnología de las pilas de combustible y su aplicación a los buques mercantes, 2022.
- [50] Puente de Mando, «El Ferry "Hydra" de Norled, primero que consume hidrógeno,» 2023.
- [51] Sector marítimo, «Proyecto Hyseas III: El primer ferry de Europa propulsado por hidrógeno,» 2021.
- [52] Maritime Cleantech, «HyShip-Buque de carga de hidrógeno,» 2021.
- [53] Proyecto FLAGSHIPS, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, 2019.
- [54] e SHyIPS, Ecosystemic knowledge in Standards for Hydrogen Implementation on Passenger Ship. Clean Hydrogen Partnership (EU Horizon2020, Grant Agreement No 101007226)., (2021–2024).
- [55] HIDRAM, Descarbonización del transporte marítimo a través de soluciones de almacenamiento de hidrógeno mediante la generación de amoníaco verde como combustible multipropósito, 2025.
- [56] ShipFC., Piloting MultiMW Ammonia Ship Fuel Cells. Clean Hydrogen Partnership (EU Horizon2020, Grant Agreement No 875156)., (2020–2025)..
- [57] HyMethShip, Hydrogen-Methanol Ship propulsion system using on-board pre-combustion carbon capture, 2018.
- [58] GreenPilot, Pilot Boat with Minimal Environmental Impact, 2018.
- [59] E1 Marine, Generating high purity, on-demand hydrogen for the maritime industry, 2025.
- [60] Fraunhofer IMM, IMM Compact Methanol Reformer - Hydrogen Supply for Mobility, 2022.
- [61] SerEnergy, Methanol Fuel Cell Module, 2020.
- [62] Energies, «Review on the Safe Use of Ammonia Fuel Cells in the Maritime Industry,» 2021.
- [63] Gasnam, «Estadísticas España y Portugal 2024,» 2025.
- [64] IMO, IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, 2023.

- [65] Nicole Wermuth, Stephan Jandl, Marcel Lackner, Michael Lang, Andreas Wimmer, Modelling, Analysis and Implementation of the HyMethShip concept for sustainable ship propulsion, 2023.
- [66] Clean Hydrogen Partnership, Clean Hydrogen Joint Undertaking. Strategic Research and Innovation Agenda 2021-2027, 2022.
- [67] Green Voyage 2050, Alternative marine fuels: Regulatory mapping, 2025.
- [68] País Minero, El gigantesco proyecto de hidrógeno de Arabia Saudí alcanza el 80% de finalización, 2025.
- [69] B. Tamim, "MF Hydra": World's first liquid hydrogen-powered ferry gets operational. Interesting Engineering., (2023, April 2)..
- [70] HySeas III. , HySeas III: Hydrogen fuel cell powered maritime vessels. Project funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. Grant Agreement nº 769417., (2018–2022)..
- [71] HySeas III: Hydrogen fuel cell powered maritime vessels. Clean Hydrogen Partnership (EU Horizon 2020, Grant Agreement No. 769417).., (2018–2022)..
- [72] HySHIP: Demonstrating liquid hydrogen as a fuel for the maritime sector. Clean Hydrogen Partnership (EU Horizon 2020, Grant Agreement No. 101007205).., (2021–2025)..
- [73] HySHIP: Demonstrating liquid hydrogen as a fuel for the maritime sector. Clean Hydrogen Partnership (EU Horizon 2020, Grant Agreement No. 101007205), (2021–2025).
- [74] FLAGSHIPS., Deploying commercially operated hydrogen fuel cell vessels on inland/coastal routes. Clean Hydrogen Partnership (EU Horizon 2020, Grant Agreement No. 826215).., (2019–2025)..
- [75] ShipFC, «El proyecto ShipFC demostrará que es posible realizar viajes de largo alcance y cero emisiones con alta potencia en buques más grandes,» 2020.
- [76] Clean Hydrogen Partnership, «Transporte acuático limpio en Europa,» 2019.
- [77] E-Ships, «Resumen del proyecto,» 2021.
- [78] EPA, Investigación en línea sobre salud y medio ambiente (HERO), 1993.
- [79] Methanol Reformer, On-board and on-site solutions for H₂ and/or electric generation.