



**Universidad
de La Laguna**

Estado Actual y Avances en Sistemas de Propulsión Marina Ecoeficientes: Desde Una Perspectiva Medioambiental

Trabajo Fin de Grado
Grado en Náutica y Transporte Marítimo
Julio de 2023

Autor:
Jorge Ricardo del Villar González
78644638W

Tutor:
Prof. Dr. Javier Machado Toledo

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería
Sección Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval
Universidad de La Laguna

D/D^a. Javier Machado Toledo, Profesor perteneciente al Departamento de Ingeniería Civil Náutica y Marítima de la Universidad de La Laguna:

Expone que:

D. **Jorge Ricardo del Villar González** con **DNI 78644638W**, ha realizado bajo mi dirección el trabajo fin de grado titulado: **Estado Actual y Avances en Sistemas de Propulsión Marina Ecoeficientes: Desde Una Perspectiva Medioambiental**.

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente documento.

En Santa Cruz de Tenerife a 17 de julio de 2023.

Fdo.: Javier Machado Toledo.

Director del trabajo.

Del Villar González, J. R. (2023). *Estado Actual y Avances en Sistemas de Propulsión Marina Ecoeficientes: Desde Una Perspectiva Medioambiental*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad de La Laguna.

RESUMEN

Nuevas restricciones en el ámbito de las emisiones suponen un reto y una oportunidad para la industria marítima, ya que limitan las tecnologías tradicionales y obligan a crear soluciones creativas y a buscar nuevos métodos de propulsión alternativos. Este trabajo de fin de grado pretende mostrar una revisión del estado actual de los sistemas de propulsión marina con menor impacto ambiental. El documento comienza contextualizando el tema y describiendo sus objetivos y justificación. A continuación, se analizarán los conceptos y el estado actual de la propulsión marina y su sostenibilidad. La revisión se centra en varios tipos de sistemas de propulsión que tienen un menor impacto ambiental, tal como sistemas de propulsión eléctrica, híbridos, nucleares, de hidrógeno y de biocombustibles. El documento también ofrece un análisis comparativo de las emisiones de los distintos sistemas de propulsión. Además, se presentan estudios de casos de buques con sistemas de propulsión que tienen un menor impacto ambiental y se analizan las limitaciones de cada sistema. En conclusión, este documento ofrece una visión de la situación actual de las diferentes tecnologías de propulsión menos contaminantes.

Palabras claves: Propulsión marina, Contaminación atmosférica, Sostenibilidad, Eficiencia energética, Sistemas de propulsión.

Del Villar González, J. R. (2023). *Current Status and Advances in Eco-efficient Marine Propulsion Systems: From an Environmental Perspective*. Bachelor Thesis. Universidad de La Laguna.

ABSTRACT

New restrictions in the field of emissions are both a challenge and an opportunity for the maritime industry, as they limit traditional technologies and force the creation of creative solutions and the search for new alternative propulsion methods. This bachelor thesis aims to show a review of the current state of the art of marine propulsion systems with lower environmental impact. The paper begins by contextualizing the topic and describing its objectives and justification. Then, the concepts of marine propulsion and sustainability will be discussed, and the current status of marine propulsion systems is reviewed. The review focuses on various propulsion systems with a lower environmental impact, such as electric, hybrid, nuclear, hydrogen and biofuel propulsion systems. The paper also provides a comparative analysis of the emissions of the different propulsion systems. In addition, the paper presents case studies of ships with propulsion systems with a lower environmental impact and discusses the limitations of each system. In conclusion, this paper provides an overview of the current status of the different cleaner propulsion technologies.

Keywords: Marine propulsion, Air pollution, Sustainability, Energy efficiency, Propulsion systems.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a los trabajadores de Tenerife Shipyards por compartir su valiosa experiencia y conocimientos durante el desarrollo de mis prácticas. También quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia en especial a Marta y Carlota por su constante apoyo y motivación a lo largo de este proyecto.

Índice del TFG

1. ABREVIATURAS	- 11 -
2. INTRODUCCIÓN.....	- 13 -
3. OBJETIVOS	- 15 -
4. CONCEPTOS BÁSICOS	- 16 -
4.1. CONCEPTOS CLAVE: PROPULSIÓN MARINA Y SOSTENIBILIDAD	- 16 -
4.2. NORMATIVA SOBRE EMISIONES MARINAS	- 17 -
5. ANÁLISIS DE SISTEMAS DE PROPULSIÓN MARINA ECOEFICIENTES.....	- 19 -
5.1. SISTEMAS DE PROPULSIÓN ELÉCTRICOS.....	- 20 -
5.2. SISTEMAS DE PROPULSIÓN CON PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO.....	- 22 -
5.3. SISTEMAS DE PROPULSIÓN NUCLEARES.....	- 24 -
6. SISTEMAS DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA	- 27 -
6.1. SISTEMAS DE PROPULSIÓN DIÉSEL-ELÉCTRICO	- 28 -
6.2. SISTEMAS DE PROPULSIÓN HÍBRIDOS	- 30 -
6.3. SISTEMAS DE PROPULSIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.....	- 32 -
6.4. SISTEMA DE PROPULSIÓN DE GAS NATURAL LICUADO	- 34 -
7. CASOS DE ESTUDIO.....	- 37 -
7.1. SISTEMAS DE PROPULSIÓN ELÉCTRICOS.....	- 37 -
7.2. SISTEMAS DE PROPULSIÓN CON PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO.....	- 39 -
7.3. SISTEMAS DE PROPULSIÓN NUCLEARES.....	- 41 -
7.4. SISTEMAS DE PROPULSIÓN DIÉSEL-ELÉCTRICO	- 43 -
7.5. SISTEMAS DE PROPULSIÓN HÍBRIDOS	- 45 -
7.6. SISTEMAS DE PROPULSIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.....	- 47 -
7.7. SISTEMA DE PROPULSIÓN DE GAS NATURAL LICUADO	- 48 -
8. DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES	- 49 -
8.1. TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA LA PROPULSIÓN MARINA	- 49 -
8.1.1. <i>Amoníaco</i>	- 49 -
8.1.2. <i>Propulsión asistida por el viento</i>	- 50 -
8.2. RETOS DE CADA SISTEMA	- 51 -
8.3. EL FUTURO DE LA NORMATIVA.....	- 53 -
8.4. EMISIONES DE CO ₂ DE DIFERENTES COMBUSTIBLES.....	- 54 -
8.5. DENSIDAD ENERGÉTICA	- 55 -

8.6.	MADUREZ TECNOLÓGICA.....	- 56 -
8.1.	ESTUDIO COMPARATIVO DE DISTINTOS SISTEMAS DE PROPULSIÓN EN UN BUQUE	- 57 -
9.	CONCLUSIONES.....	- 60 -

1. Abreviaturas

ABB	Asea Brown Boveri
AIP	Approval In Principle
CI	Combustión Interna
CII	Indicador de intensidad de carbono
COGAS	COmbined Gas And Steam
COGES	COmbined Gas Electric and Steam
CONAS	COmbined Nuclear And Steam
DWI	Direct Water Injection
DWT	Deadweight Tonnage
ECA	Emission Control Area
EEDI	Índice de eficiencia energética de proyecto
EEXI	Índice de eficiencia energética aplicable a los buques existentes
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EIAPP	Certificados internacionales de prevención de la contaminación atmosférica para motores
GNL	Gas Natural Licuado
GRT	Gross Register Tonnage
GWP	Global Warming Potential
HFO	Heavy Fuel Oil
IEEC	Certificado internacional de eficiencia energética
LSFO	Low Sulphur Fuel Oil
LNG	Liquified Natural Gas
LPG	Liquified Petrol Gas
MARPOL	The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
MCR	Maximum Continuous Rating
MDO	Marine Diesel Oil
MFO	Marine Fuel Oil
MGO	Marine Gas Oil
NCR	Normal Continuous Rating
NMC	Nickel Manganese Cobalt
OMI	Organización Marítima Internacional

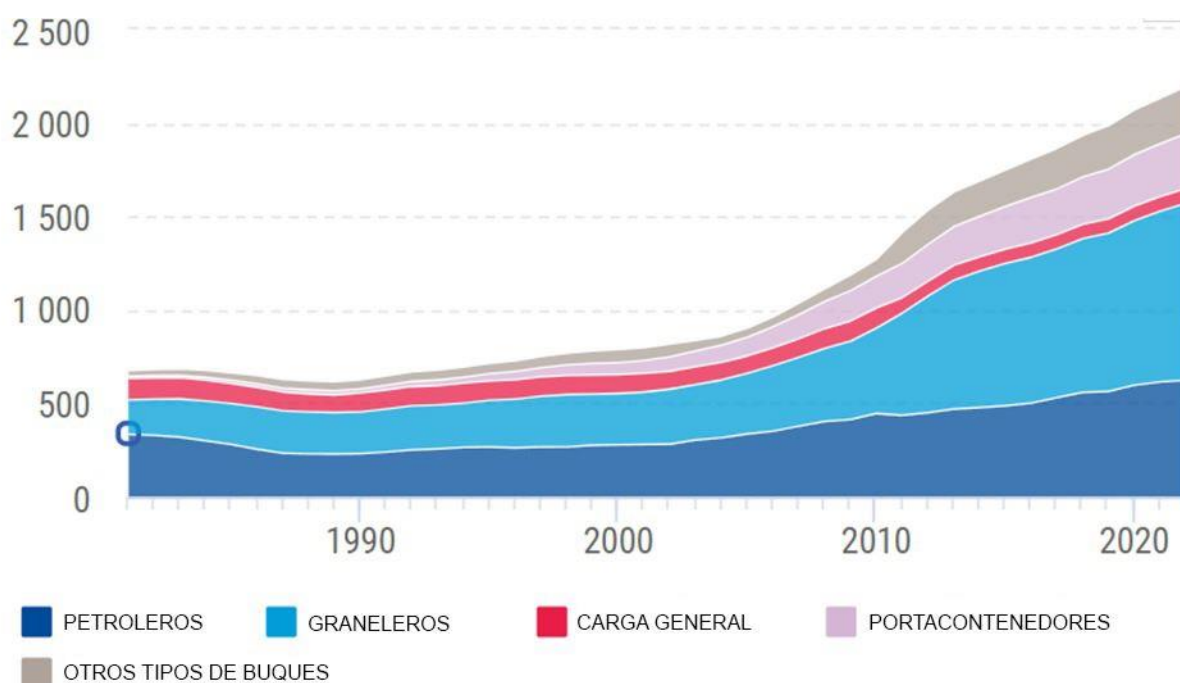
PWR	Pressure Water Reactor
SCR	Selective Catalytic Reduction
SECA	Sulphur Emission Control Areas
SEEMP	Plan de gestión de la eficiencia energética del buque
TTP	Tank To Propeller
ULSFO	Ultra-Low Sulphur Fuel Oil
WASP	Wind Assisted Ship Propulsion
WTT	Well To Tank

2. Introducción

La industria del transporte marítimo es de vital importancia en la economía global. Siendo de las industrias más antiguas ha conseguido evolucionar hasta convertirse en un pilar fundamental del comercio internacional. Hoy en día desempeña un papel clave en la globalización y en el movimiento de mercancías a gran escala en todo el mundo.

Representando más del 90% del comercio mundial [40][60], el transporte marítimo facilita el intercambio de bienes y productos en una escala sin precedentes. Solo en la Unión Europea la industria marítima transportó más de 3500 millones de toneladas de carga en el 2021 [34].

Tabla 1 – Flota mundial categorizada por tipo de buque medido en millones de DWT



Fuente: <https://hbs.unctad.org/merchant-fleet/#:~:text=Fleet%20ownership&text=Greece%20held%20a%20market%20share,America%20for%206%20per%20cent.>

Sin embargo, junto con su importancia económica y su capacidad para impulsar el comercio global, el sector marítimo también se enfrenta a desafíos críticos en términos de sostenibilidad y reducción de las emisiones atmosféricas. El crecimiento continuo de la industria ha llevado a un aumento significativo en las emisiones contaminantes, como los gases de efecto invernadero y los óxidos de azufre. Esto plantea una preocupación urgente para abordar el impacto ambiental del transporte marítimo y buscar soluciones más sostenibles.

La presión para reducir las emisiones y mejorar la sostenibilidad en el transporte marítimo ha llevado a un enfoque renovado en la industria. Se están implementando regulaciones y acuerdos internacionales para fomentar la adopción de tecnologías más limpias y eficientes, así como el uso de combustibles alternativos. Esto incluye el uso de sistemas de propulsión más eficientes, como motores de bajas emisiones, sistemas de propulsión eléctricos y el desarrollo de combustibles más sostenibles.

3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es proporcionar una descripción de los sistemas de propulsión marina con menor impacto ambiental, centrándose especialmente en aquellos que logran alcanzar cero emisiones. El propósito es examinar el estado actual de las tecnologías más avanzadas en cada campo, analizando su eficiencia, viabilidad y beneficios ambientales.

Durante el desarrollo de este trabajo se evaluarán los sistemas de propulsión marina emergentes más ecoeficientes, incluyendo tecnologías como la propulsión eléctrica, la propulsión asistida por el viento, el uso de combustibles alternativos como el Gas Natural Licuado (GNL), el hidrógeno y los biocombustibles, así como otras soluciones de propulsión más limpias y eficientes.

4. Conceptos Básicos

4.1. Conceptos clave: propulsión marina y sostenibilidad

El concepto clave en la propulsión marina es generar un empuje que permita mover el buque a través del agua. Por lo general, este empuje se logra mediante una hélice que, al girar, impulsa el agua hacia atrás, impulsando así el buque hacia adelante.

Para girar la hélice, se requiere utilizar un equipo propulsor. Los motores de combustión interna (CI) son los más utilizados en la industria naval debido a su eficacia y fiabilidad. Estos motores convierten la energía química de los combustibles fósiles en energía mecánica que impulsa la hélice. Sin embargo, a pesar de su eficiencia y fiabilidad, los motores de CI emiten gases contaminantes durante la combustión, lo que plantea problemas en términos de impacto ambiental y sostenibilidad.

Reconociendo la necesidad de reducir las emisiones contaminantes en la industria marítima, se están realizando esfuerzos para encontrar alternativas más sostenibles para el futuro. Se están investigando y desarrollando tecnologías de propulsión más limpias, como los sistemas de propulsión eléctrica, el uso de hidrógeno y los reactores nucleares, con el objetivo de minimizar o eliminar las emisiones contaminantes asociadas a los motores diésel convencionales.

En la actualidad, la industria marítima es responsable del 2,5% [24][60] de todas las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, lo que equivale a aproximadamente 940 millones de toneladas de CO₂ [24]. El desarrollo y la adopción de estas tecnologías alternativas sostenibles contribuyen a que el transporte marítimo sea más respetuoso con el medio ambiente, ayudando a mitigar el impacto negativo en la calidad del aire y los ecosistemas marinos.

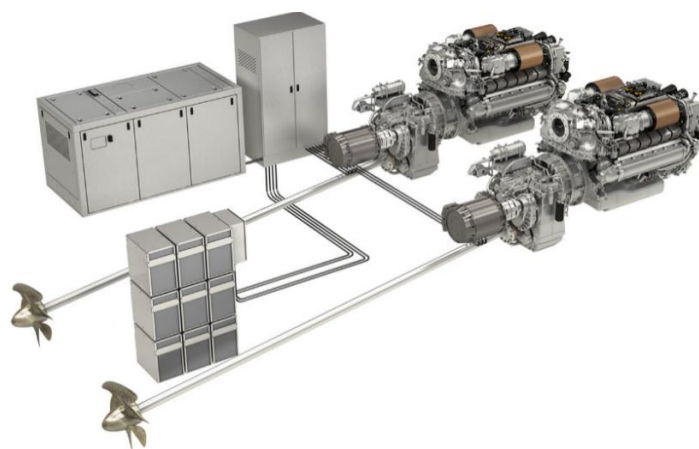


Ilustración 1 – Sistema de propulsión e-Drive de la marca Rolls-Royce - <https://www.mtu-solutions.com/au/en/applications/commercial-marine/system-solutions/propulsion-systems.html>

4.2. Normativa sobre emisiones marinas

La Organización Marítima Internacional (OMI) es la agencia reguladora encargada de las emisiones marinas. En el anexo VI del Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL), la OMI establece los límites máximos permitidos para la contaminación atmosférica.

A partir del 1 de enero de 2020, entraron en vigor los nuevos límites conocidos como "IMO 2020", que reducen el contenido de azufre permitido en los combustibles del 3,50% al 0,50% [26]. Este nuevo límite representa una disminución del 77% en las emisiones totales de SO_x (óxidos de azufre) de los buques, lo que equivale a una reducción anual de aproximadamente 8,5 millones de toneladas métricas de SO_x [26]. Estos nuevos límites también contribuirán a reducir las partículas dañinas que se generan al realizar el ciclo de combustión.

El límite del 0,50% se aplica en todo el mundo, pero existen áreas designadas como "Áreas de Control de Emisiones de Azufre" (SECAs), donde el límite es aún más estricto, establecido en 0,10%. En Europa, se estima que aproximadamente 300,000 muertes prematuras ocurren anualmente debido a la contaminación atmosférica. Al incluir el Mar Mediterráneo como una zona "SECA", se espera una reducción del 80% de estas emisiones, lo que conlleva una reducción de 1000 muertes prematuras al año y una disminución de 2000 casos de asma infantil [36], está previsto que las medidas entren en vigor el 1 de mayo de 2025.

Para las emisiones de NO_x la OMI ha creado unos certificados denominados certificados internacionales de prevención de la contaminación atmosférica para motores (EIAPP). Estos controles se aplican a todos los motores diésel de más de 130 kW y se pueden diferenciar en tres niveles diferentes, Nivel I, II, III, dependiendo del año de fabricación del buque. En cada nivel se pueden diferenciar tres límites diferentes dependiendo del régimen nominal del motor (rpm).

Tabla 2 – Valores de niveles

Nivel	Año de construcción del buque	Límite total ponderado de emisiones por ciclo		
		n<130	130<n<2000	n>2000
I	01/01/2000	17,00	45*n(-0,20)	9,80
II	01/01/2011	14,40	44*n(-0,23)	7,70
III	01/01/2016	3,40	9*n(-0,20)	2,00

Fuente: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)

El nivel III se aplica solo a buques de categoría III cuando navegan por áreas de control de emisiones (ECA). Fuera de estas zonas se controlan como si fueran buques de nivel II.

Estas regulaciones y límites más estrictos son importantes para abordar los impactos negativos de la contaminación atmosférica generada por los buques. Al reducir las emisiones de azufre y las partículas dañinas, se espera mejorar la calidad del aire y proteger la salud humana, especialmente en áreas densamente pobladas y cerca de las rutas marítimas. Además, estas medidas son un paso importante hacia una navegación más sostenible y responsable desde el punto de vista ambiental.

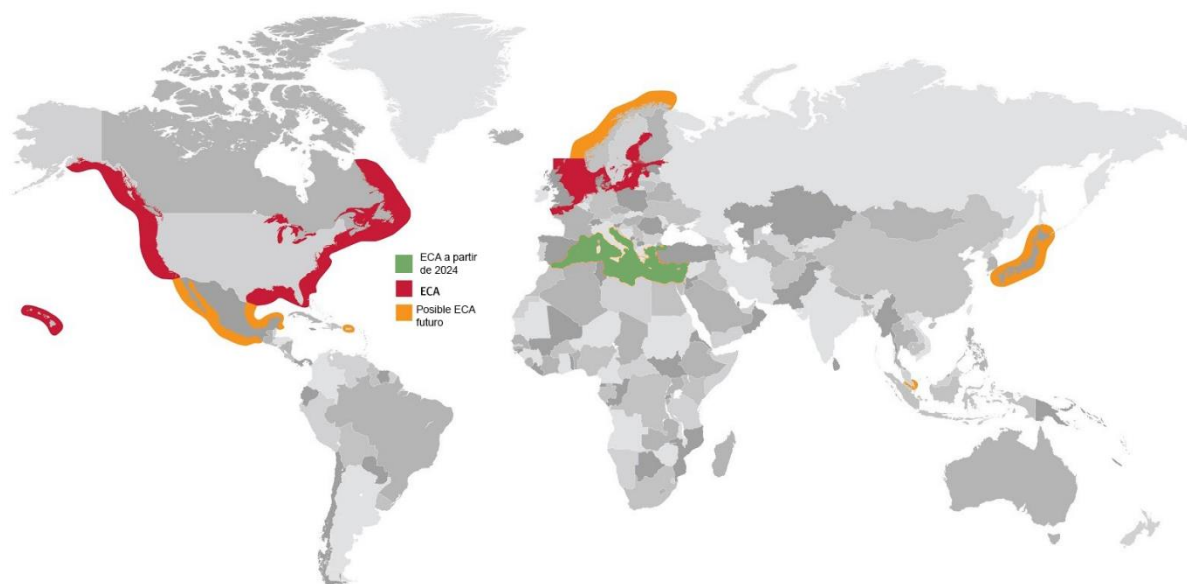


Ilustración 2 – Mapa de zonas ECA a nivel global – <http://ingmaritima.blogspot.com/2017/06/zonas-eca.html>

5. Análisis de sistemas de propulsión marina ecoeficientes

En la actualidad, se está llevando a cabo el desarrollo de diversos sistemas de propulsión que se destacan por su capacidad de operar sin emitir contaminantes atmosféricos. Estos sistemas son cada vez más necesarios debido a las nuevas regulaciones implementadas por la Organización Marítima Internacional (OMI) y los riesgos asociados con las emisiones atmosféricas para la salud humana.

Al optar por estos sistemas, la industria marítima puede cumplir con regulaciones ambientales más estrictas, mejorar la calidad del aire en puertos y áreas costeras, y contribuir a la protección de la salud pública. Además, al reducir las emisiones contaminantes, se puede mitigar el impacto del transporte marítimo en el cambio climático y promover el desarrollo sostenible del sector.

Sin embargo, estos sistemas de propulsión no están exentos de desafíos. Por lo general, su instalación conlleva costos más altos en comparación con los sistemas de propulsión tradicionales. Además, en la actualidad, la infraestructura necesaria para abastecer a los buques equipados con estas tecnologías aún no está ampliamente disponible en la mayoría de los puertos.

Es importante destacar que la relación entre costos y beneficios a largo plazo debe evaluarse cuidadosamente. Aunque los sistemas de propulsión de emisiones cero pueden requerir una inversión inicial más alta, también ofrecen beneficios a largo plazo, como menores costos de operación debido al menor consumo de combustible y posibles ahorros en el cumplimiento de regulaciones ambientales más estrictas.

5.1. Sistemas de propulsión eléctricos

Este sistema de propulsión se caracteriza por no usar ningún tipo de generador de energía. El sistema usa una serie de bancos de baterías que carga mientras está en puerto y almacena toda la energía que necesita para el viaje. Usa la energía de las baterías para alimentar motores eléctricos que están acoplados al eje de cola.

Los bancos de baterías son conjuntos de baterías normalmente de litio. Estas baterías tienen una vida útil de unos 10 años por lo que en la vida útil del buque se tendrá que cambiar. Las baterías más usadas en el ámbito marítimo dado que tienen una buena relación entre la vida útil y la densidad energética son de óxido de cobalto de manganeso y litio o Li-MNC. Las baterías al igual que en los buques híbridos pueden ser cargadas aprovechando el frenado del buque.

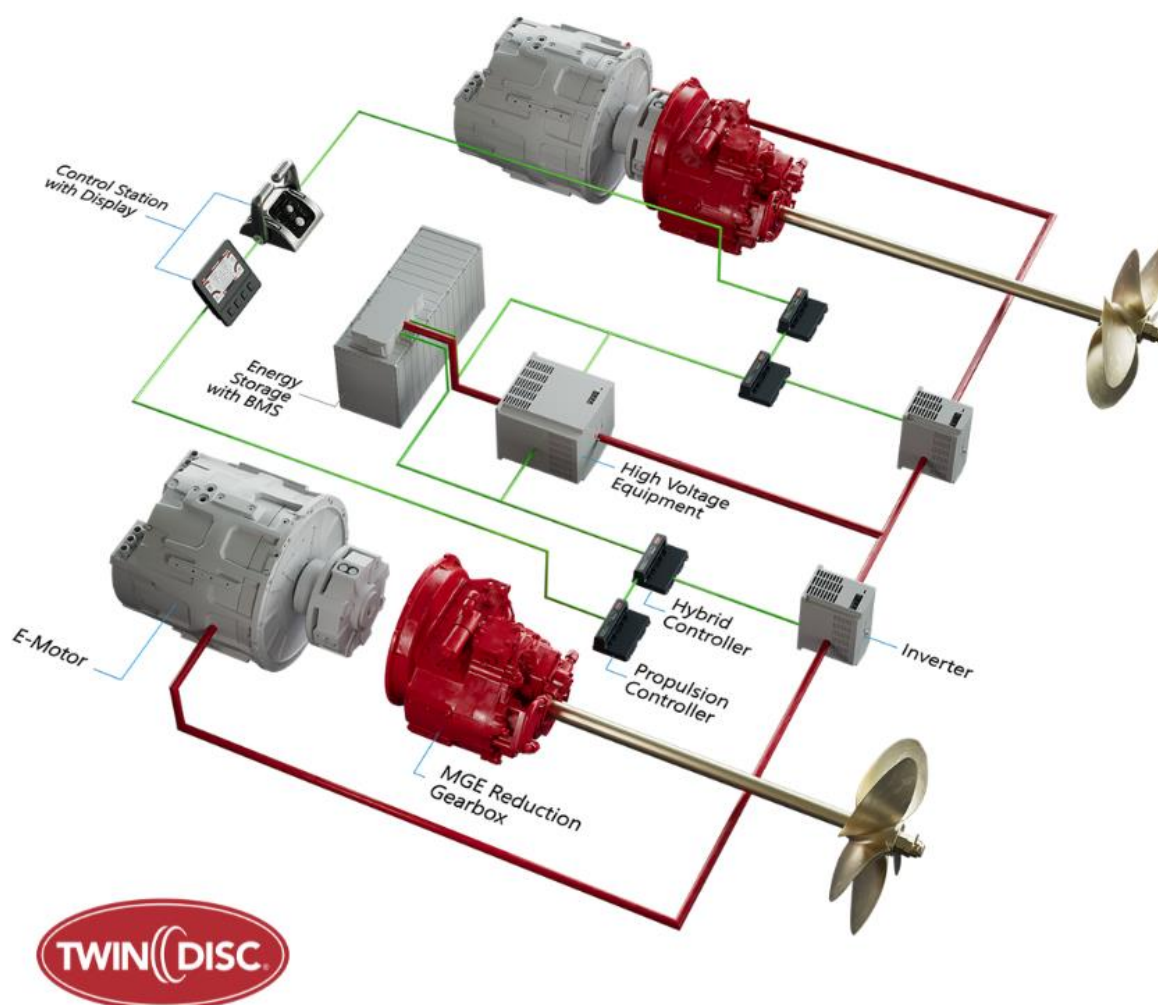


Ilustración 3 - Ejemplo de sistema de propulsión 100% eléctrico -
<https://twindisc.com/goelectric/marine/full-electric-single-electric-motor-with-energy-storage-2/>

Este sistema puede llegar a ser considerado como completamente cero emisiones si la energía que se usa para cargar las baterías viene de energías renovables. La simplicidad del sistema hace que sea extremadamente fácil de mantener y la ausencia de generadores de combustión hace que sea más fiable.

Aunque este sistema es capaz de funcionar en modo cero emisiones, sí que genera emisiones a la hora de fabricarse las baterías. La fabricación de baterías es un tema muy controvertido debido a la cantidad de emisiones que se producen durante la fabricación. En la siguiente tabla podemos ver un desglose del impacto medioambiental de los materiales usados por las baterías y su ensamblaje.

Tabla 3 - Impacto medioambiental de los materiales y el ensamblado de las baterías

Unit	Material	CO ₂ (g)	N ₂ O (g)	CH ₄ (g)	NO _x (g)	CO (g)	PM ₁₀ (g)	PM _{2.5} (g)	SO _x (g)	Water (m3)	Energy (MJ)
1 kg	NMC811	24,700	0.559	51.522	40.949	21.692	12.851	5.907	702.850	0.123	377
1 kg	NMC622	22,000	0.468	45.385	33.812	19.018	15.231	5.460	535.010	0.114	329
1 kg	NMC532	21,100	0.442	43.590	31.484	17.755	15.081	5.231	461.430	0.043	124
1 kg	LFP	8900	0.166	18.609	14.311	6.113	1.994	1.505	13.044	0.045	60
1 kg	NCA	26,100	0.590	55.217	42.748	23.866	14.833	6.122	715.970	0.131	400
1 kg	Graphite	4600	0.097	10.599	14.013	1.911	5.416	2.688	74.967	0.024	90
1 kg	DMC	1200	0.021	4.518	1.059	0.736	0.085	0.068	0.424	0.004	37
1 kg	EC	334.43	0.005	1.218	0.283	0.196	0.023	0.018	0.116	0.001	10
1 kg	LiPF ₆	9900	0.198	21.596	9.059	4.244	1.192	0.723	18.616	0.057	176
1 kg	PVDF	2000	0.052	5.354	1.909	1.198	0.199	0.134	0.950	0.006	36
1 kg	Aluminium	2600	0.060	5.944	2.398	1.425	1.457	0.748	5.653	0.059	48
1 kg	Copper	2200	0.046	5.128	2.471	2.039	0.293	0.182	140.380	0.006	36
1 kg	Steel	2000	0.013	3.544	2.094	22.219	1.507	0.712	9.264	0.001	21
1 kg	PET	2400	0.053	15.163	2.528	14.861	0.204	0.145	7.942	0.008	72
1 kg	PP	1500	0.032	21.614	1.707	7.658	0.266	0.120	22.770	0.008	76
1 kg	PE	1200	0.022	21.511	1.592	4.025	0.250	0.106	23.868	0.007	64
1 kg	BMS	22,100	0.520	55.426	18.629	11.596	2.123	1.367	11.198	0.093	394
1kWh	Assembly	26,700	0.784	80.121	26.834	18.753	1.973	1.608	8.084	0.000	475

Fuente: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920922004126?via%3Dihub>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Cero emisiones	Caro de implementar
Extremadamente silencioso	Añade mucho peso
Muchas menos vibraciones	Relativa poca autonomía
Mas fácil de operar	Emisiones de fabricación

5.2. Sistemas de propulsión con pila de combustible de hidrógeno

Estos sistemas usan motores eléctricos para la propulsión del buque, pero se caracterizan por la manera en la que se genera esa electricidad.

El funcionamiento de una pila de combustible se basa en el proceso de electrólisis inversa. Se suministra hidrógeno proveniente de los tanques de almacenamiento a la pila de combustible. Dentro de la pila el hidrógeno se combina con el oxígeno del aire produciendo electricidad a través de una reacción química. Esta electricidad es acumulada en los sistemas de baterías y después es usada por los motores eléctricos para la propulsión del buque y por los demás sistemas eléctricos a bordo. Como resultado de esta reacción química el buque emite vapor de agua a la atmósfera por lo que no contamina cuando está en funcionamiento.

Para mejorar la sostenibilidad de este sistema podemos generar el hidrógeno en tierra utilizando energías renovables. Si el hidrógeno es generado usando energías renovables se considera hidrógeno verde. Usando este tipo conseguimos eliminar todas las emisiones. Aunque el hidrógeno verde se considera la opción más sostenible, actualmente no es el tipo más comúnmente utilizado. La mayoría del hidrógeno producido a gran escala proviene del gas natural, lo que se conoce como hidrógeno gris. También es posible obtener hidrógeno a partir del carbón, conocido como hidrógeno marrón. Sin embargo, estos métodos de producción generan emisiones contaminantes.

Por otro lado, existe el hidrógeno azul, que se produce de manera similar al hidrógeno gris, pero las emisiones de gases son capturadas y almacenadas para reducir su impacto medioambiental. Esta variante ofrece una opción intermedia entre la sostenibilidad del hidrógeno verde y las emisiones del hidrógeno gris y marrón.

Además de estos métodos de producción, existen otras formas de obtener hidrógeno, como la pirólisis de combustibles fósiles, que implica descomponer los hidrocarburos en sus componentes básicos, incluido el hidrógeno. También se puede obtener hidrógeno a través de la energía nuclear, mediante procesos como la electrólisis del agua utilizando energía nuclear como fuente de electricidad.

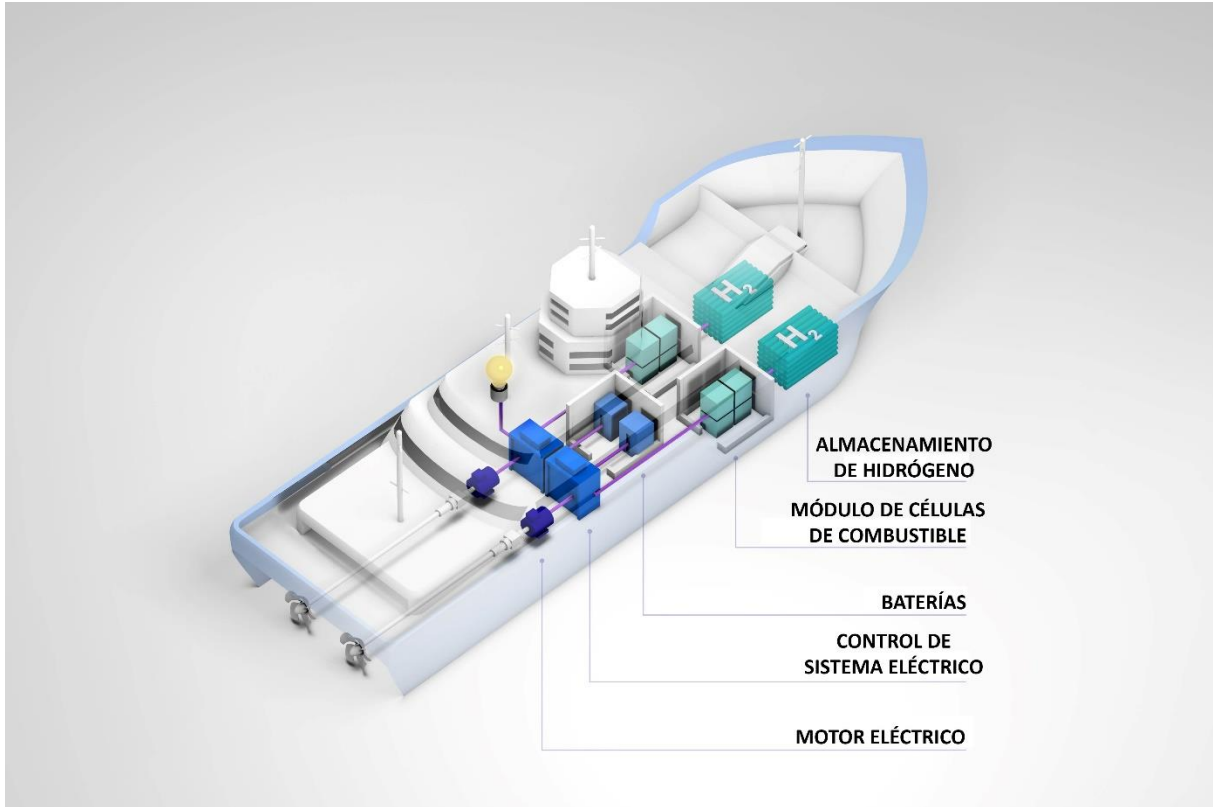


Ilustración 4 - Ejemplo de sistema de propulsión con pila de combustible - <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/about-us/innovation-and-technology/fuel-cells.html>

VENTAJAS

- Cero emisiones
- Extremadamente silencioso
- Menos vibraciones
- Muy eficiente

DESVENTAJAS

- Caro de implementar
- Combustible poco denso energéticamente
- Dificultad de almacenamiento

5.3. Sistemas de propulsión nucleares

La gran mayoría de los reactores nucleares navales son de agua a presión, (PRW). En estos reactores un circuito primario de agua transfiere el calor generado por la fisión nuclear a un generador de vapor. Esta agua se mantiene a presión para que no hierva de ahí el nombre del reactor.

Este circuito funciona a una temperatura de unos 250 a 300 °C. El agua caliente del reactor calienta otro circuito de agua en el generador de vapor. Esta separación de los circuitos de agua asegura que cualquier contaminación radiactiva queda confinada. El agua del generador de vapor se convierte en vapor y llega a una turbina de vapor la cual puede estar directamente conectada a una reductora para conectarse a la hélice del buque o puede hacer girar un generador eléctrico y después alimentar los motores eléctricos que son los que generan el empuje.

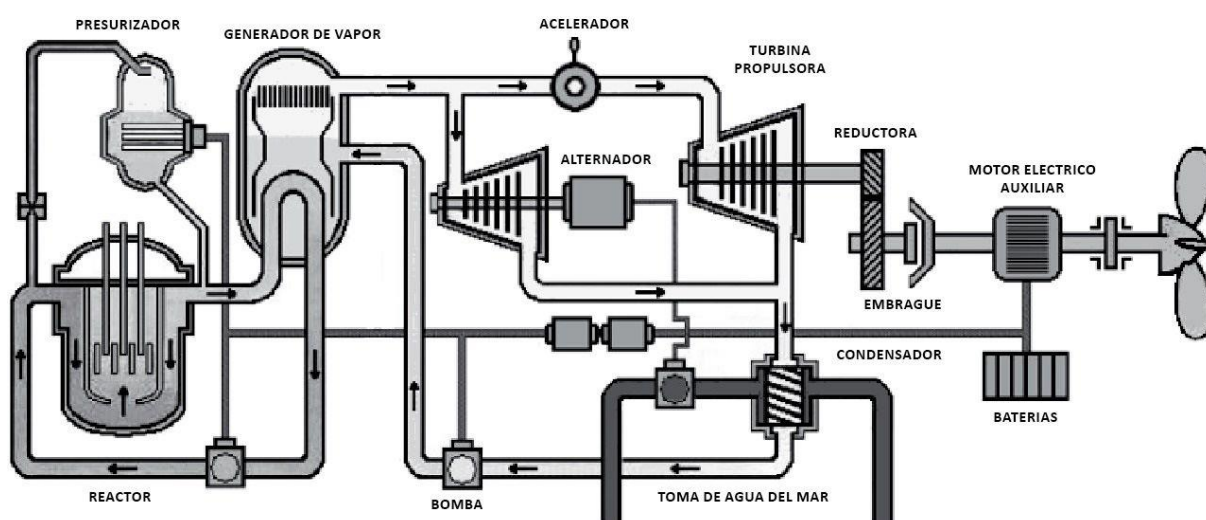


Ilustración 5 – Diagrama de sistema de propulsión nuclear -
<https://scholar.princeton.edu/sites/default/files/sp6/files/jnmm-philippe-2014.pdf>

La propulsión nuclear ha demostrado ser de vital importancia tanto técnica como económica para los rompehielos rusos cuyas condiciones operativas superan la capacidad de los rompehielos convencionales. También ha demostrado ser muy segura con más de 700 reactores usados desde los años 50, más de 14.000 años de uso combinado y solo la marina estadounidense lleva más de 240 millones de kilómetros navegados sin ningún accidente radiológico [39].

En conjunto con los reactores PRW se pueden usar calderas de vapor adicionales para producir vapor sobrecalentado. Estos sistemas denominados CONAS (Combined nuclear and steam) son usados exclusivamente por buques militares. El vapor de las calderas adicionales se puede usar para hacer funcionar turbinas de vapor para la propulsión del buque en caso de avería en el reactor principal. Esto lo hace extremadamente seguro y redundante. Los buques más conocidos por usar este sistema son los cruceros clase Kirov de la armada rusa.



Ilustración 6 – Crucero clase Kirov - <https://paperzonevn.com/kirov-class-battlecruiser-1-700.t1263/>

Combustibles como el torio han surgido como una alternativa prometedora para abordar la gestión de residuos nucleares y la disponibilidad de recursos. Se estima que las reservas de torio mundiales son aproximadamente cuatro veces mayores que las de uranio. Estas reservas aseguran un suministro a largo plazo de combustible para los reactores. El torio también contribuye a reducir la longevidad de los residuos nucleares. Los residuos generados por estos reactores tienen una vida útil de 300 años en comparación con los 10.000 del uranio [44]. La energía generada por 1 tonelada de torio es equivalente a la de 200 toneladas de uranio o 3.500.000 toneladas de carbón [46]. Otra ventaja del torio como combustible es su poco potencial para la fabricación de armas.

Tabla 4 – Reducción de emisiones atmosféricas de diferentes tecnologías

Categoría	Tecnología	Reducción de emisiones (%)			
		NOx	SOx	CO2	Partículas
Pre-combustión	EGR	35	0	0	0
	LSFO	0	80	0	20
	GNL	60	90	25	72
	Hidrógeno	20	100	100	0
Combustión	DWI	50	0	0	50
Post combustión	SCR	90	0	0	0
Nuclear	Fisión	100	100	100	100
	Fusión	No Desarrollado			

Fuente: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801813003843?via%3Dihub>

VENTAJAS

Cero emisiones atmosféricas
 Pueden llevar combustible para 20 – 30 años de funcionamiento
 Pueden lograr mucha potencia
 Pueden funcionar en los climas más extremos

DESVENTAJAS

Altos costes de implementación
 Necesita tripulación especializada
 Peligroso en caso de accidente
 Produce residuos radioactivos

6. Sistemas de transición energética

En la actualidad se están desarrollando diferentes tecnologías para ayudar a hacer la transición energética hacia sistemas de cero emisiones más fácil y menos costosa. Estos sistemas no plantean ser cero emisiones sino reducir las emisiones al máximo mientras las tecnologías cero emisiones siguen siendo desarrolladas. Algunas de estas tecnologías incluyen:

Motores de 4 tiempos - Son menos contaminantes ya que cuando combustionan no sufren la posibilidad de liberar combustible no quemado al tener 2 ciclos separados de escape y llenado de combustible. La tendencia de los nuevos buques es montar motores de 4 tiempos.

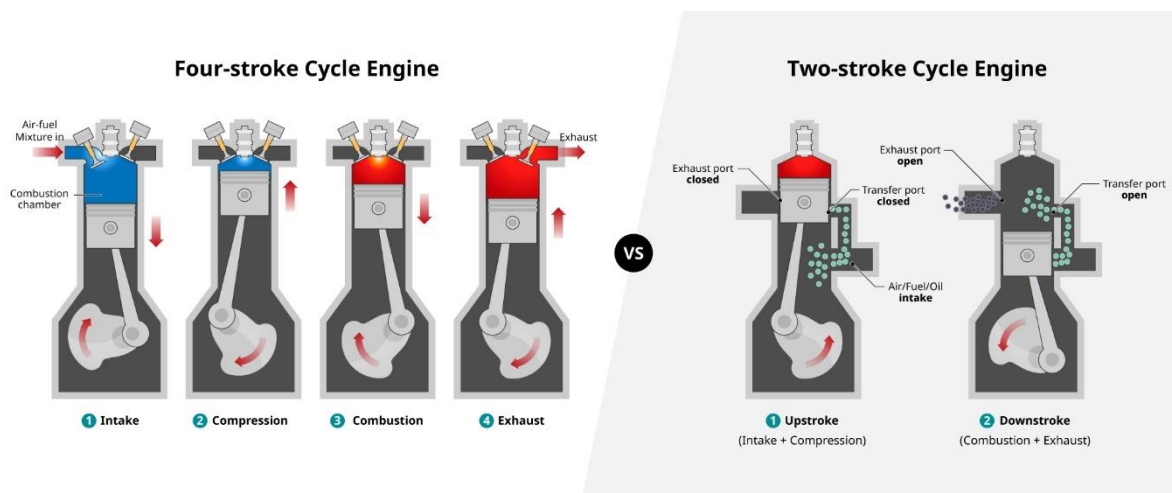


Ilustración 7 – Comparativa de funcionamiento de motores 4 tiempos y 2 tiempos - <https://news.kixxoil.com/choosing-motorcycle-engine-oil/>

Combustibles de bajo contenido en azufre – Podemos diferenciar dos tipos: Los LSFO (Low sulphur fuel oil) pueden llegar hasta el límite máximo de azufre del 0.50% y los ULSFO (Ultra-low sulphur fuel oil) pueden llegar hasta el 0,10%. Los combustibles ULSFO modernos suelen contener en el rango de 0,001% a 0,0015%. [4]

Tecnologías de reducción de óxidos de nitrógeno (NOx) – Los EGR (Exhaust gas recirculation) y SCR (Selective catalytic reduction) son tecnologías innovadoras que mejoran los motores de combustión interna, capaces de reducir las emisiones de NOx hasta en un 84,8% [31]. Otras tecnologías como la DWI (Direct water injection) son capaces de reducir las emisiones de NOx en un 55,6% con solo una pérdida de potencia del 3,2% [54].

6.1. Sistemas de propulsión diésel-eléctrico

Los sistemas de propulsión diésel-eléctrico se caracterizan por usar los motores de CI como generadores en vez de como motores de propulsión. Un sistema típico se compone de varios generadores de CI, también conocidos como grupos electrógenos los cuales generan electricidad mediante el consumo de combustibles fósiles. En este tipo de sistema la electricidad no se almacena, por lo que los generadores tienen que estar funcionando continuamente.

La propulsión del buque viene dada por motores eléctricos. Cada eje puede tener hasta dos motores eléctricos, conocido como motores en tándem. Estos motores eléctricos suministran toda la potencia al buque.

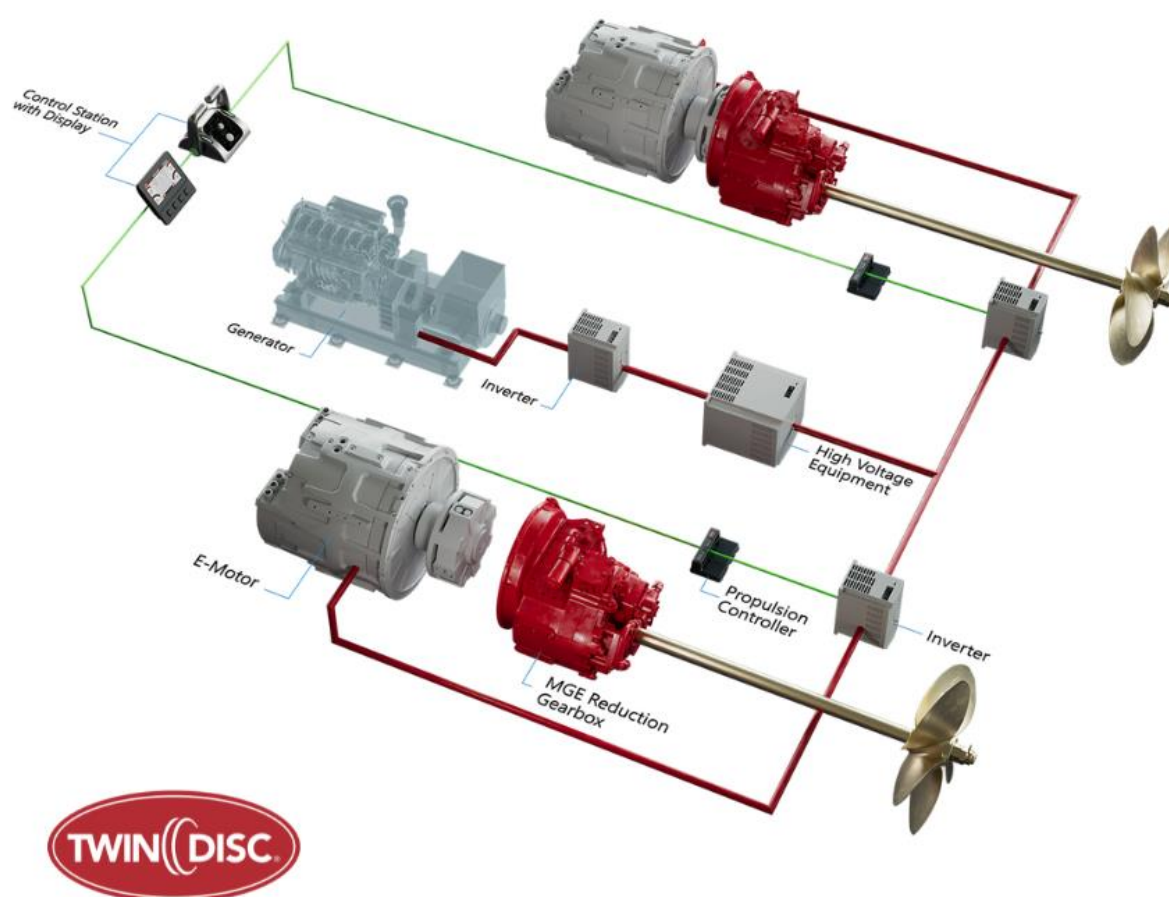


Ilustración 8 – Ejemplo de sistema de propulsión diésel-eléctrico -
<https://twindisc.com/goelectric/marine/diesel-electric/>

Otro sistema que se puede considerar diésel-eléctrico es el sistema COGES (combined gas turbine-electric and steam), una variante del sistema COGAS (Combined gas and steam) que usa motores eléctricos para su propulsión. La principal diferencia entre este sistema y un diésel-eléctrico tradicional es que los sistemas COGES utilizan una turbina de gas en lugar de un motor diésel para generar electricidad.

VENTAJAS

DESVENTAJAS

Emisiones reducidas

Mayor libertad de posicionamiento del motor

Desgaste reducido

Menor gastos en combustible

Fiable

Mayor coste de inversión

Mayor peso

Sala de máquinas mayor

6.2. Sistemas de propulsión híbridos

Los sistemas de propulsión híbridos son muy parecidos a los sistemas diésel-eléctricos con la única diferencia de que tienen un sistema de almacenamiento de energía. El sistema más común de almacenamiento de energía suelen ser baterías de litio.

Los generadores más comunes son motores diésel, pero también pueden ser utilizadas turbinas de gas para la generación de electricidad.

Al disponer de baterías, el buque puede funcionar de manera 100% eléctrica, aunque no durante mucho tiempo. La navegación eléctrica se suele usar a la entrada y salida de puerto ya que así se reduce el ruido y la contaminación cerca de la costa.

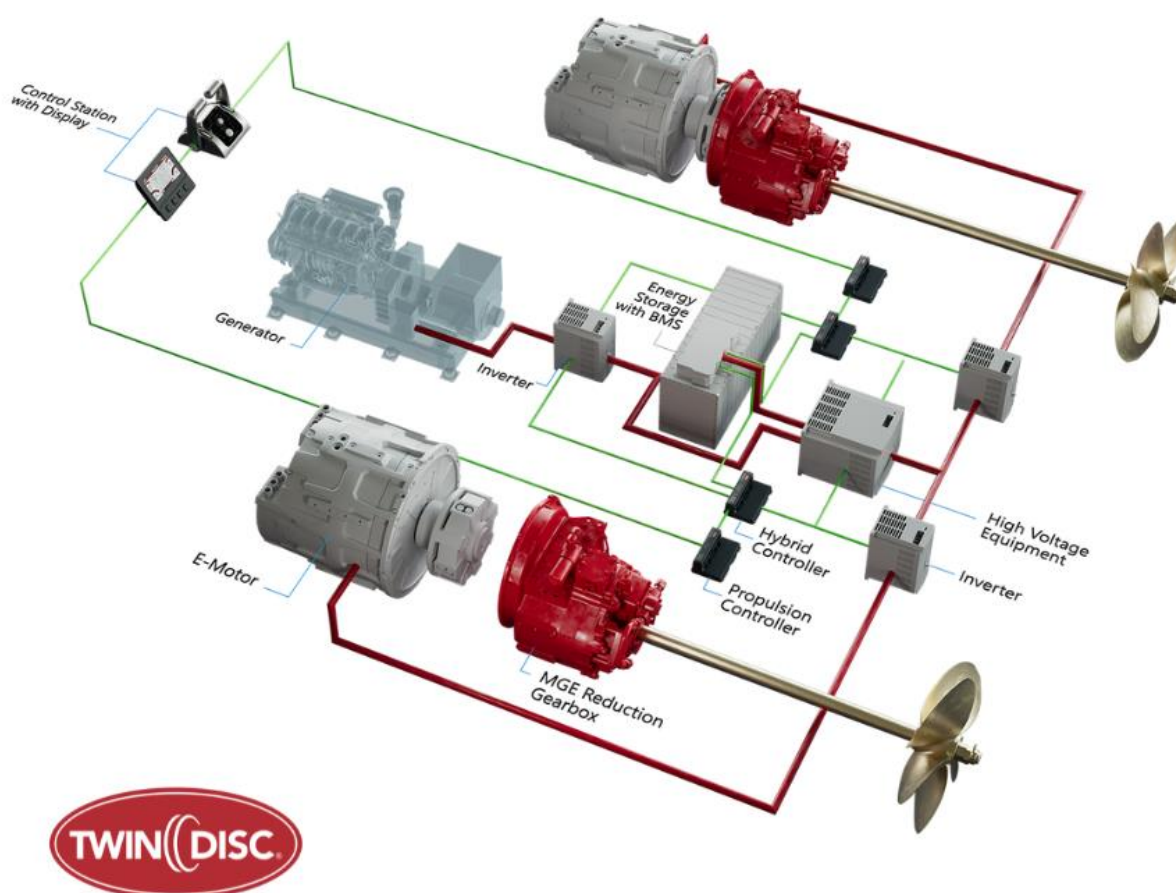
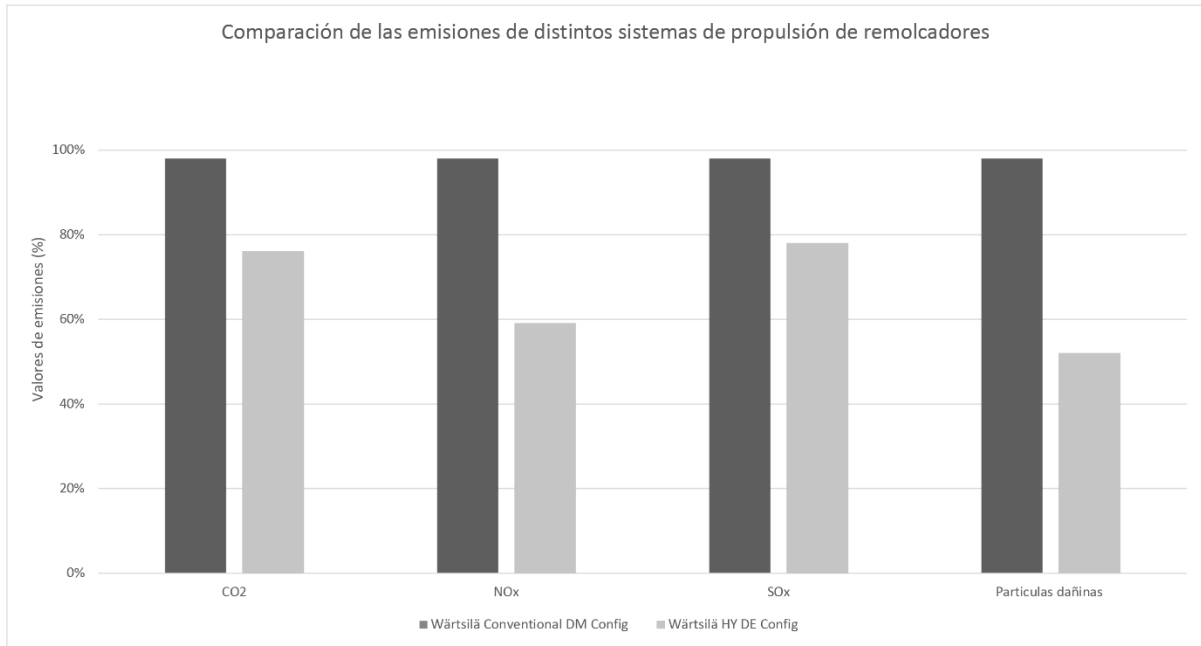


Ilustración 9 - Ejemplo de sistema de propulsión híbrido - <https://twindisc.com/goelectric/marine/serial-hybrid-single-electric-motor-with-generator-power-energy-storage/>

Este sistema también permite generar energía mediante el giro de la hélice mientras el buque frena. Esto ayuda a que el buque frene en una menor distancia y tiempo, y al mismo tiempo genera energía para las baterías.

En la tabla 1 se describe la diferencia entre las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x y partículas de los tipos de propulsión de remolcadores presentados. La propulsión híbrida reduce sustancialmente las emisiones de CO₂ en un 23%, las de NO_x en un 40%, las de SO_x en un 22% y las de partículas en un 48% [29].

Tabla 5 - Comparación de las emisiones de distintos sistemas de propulsión de remolcadores



Fuente: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1122>

VENTAJAS

- Emisiones reducidas
- Mayor libertad de posicionamiento del motor
- Desgaste reducido
- Menor gastos en combustible
- Menor ruido y vibración cuando navega solo con motores eléctricos
- Fiable

DESVENTAJAS

- Mayor coste de inversión
- Mayor peso
- Mayor sala de máquinas

6.3. Sistemas de propulsión de biocombustibles

Los biocombustibles son mezclas de sustancias orgánicas que se utilizan como combustible en los motores de combustión interna. Hay muchos tipos de combustibles que derivan de diferentes materias orgánicas pero los más prometedores para la industria marítima son el biometanol, el diésel sintético y el biometano. Las reducciones en emisiones atmosféricas al usar estos combustibles pueden llegar hasta el 85% [23].

En el caso del diésel sintético puede ser usado en motores diésel sin la necesidad de realizar ningún cambio drástico al motor. Esto hace que tengan un gran atractivo ya que no necesitan de una gran inversión inicial. La forma más común de usar el diésel sintético es mezclándolo con diésel derivado del petróleo en varias concentraciones, aunque también se puede usar solo sintético. Estas concentraciones son denominadas según su porcentaje de biodiesel, por ejemplo, una concentración del 20% de biodiesel es denominado B20. Estas mezclas se pueden calcular para hacer una buena relación entre la mejora de las emisiones manteniendo un costo de combustible relativamente bajo.

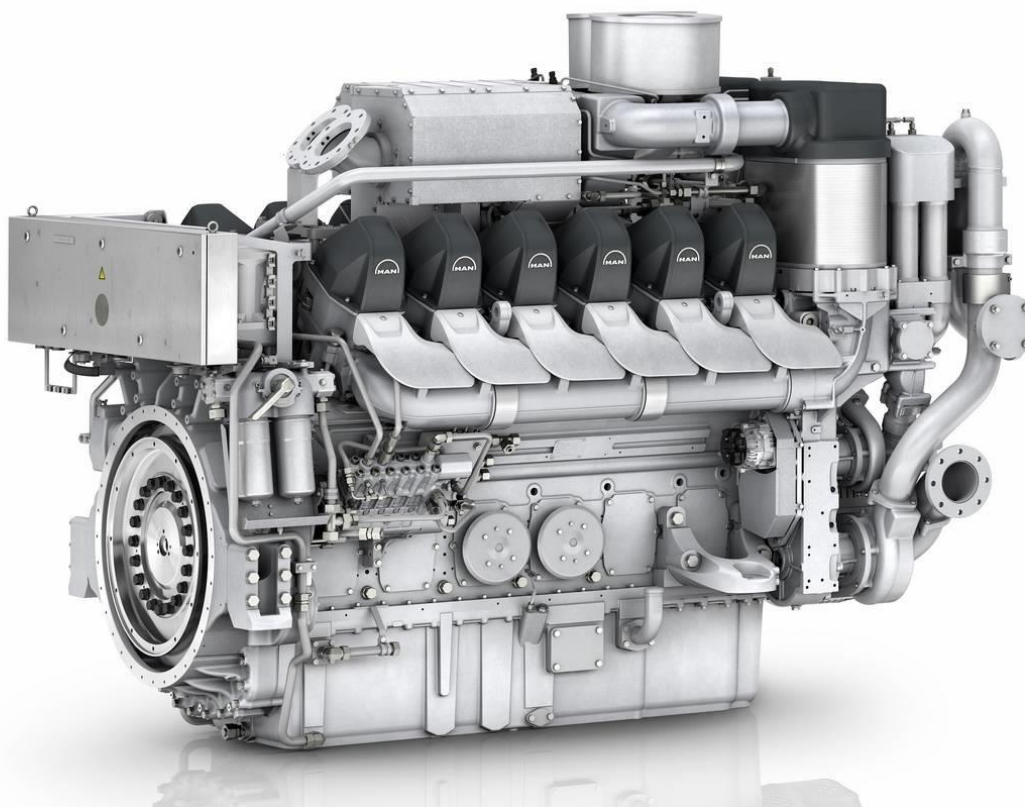


Ilustración 10 – Motor Diesel capaz de funcionar con biocombustibles, modelo 175D de la empresa MAN
- <https://www.marinelink.com/news/mans-d-highspeed-engine-biofuelready-504636>

Los biocombustibles también pueden ser usados en turbinas de gas. El mayor índice de lubricación con respecto al diésel derivado del petróleo hace que las turbinas, en especial, sufran de menos desgaste debido a que trabajan a altas temperaturas y presiones. [9]

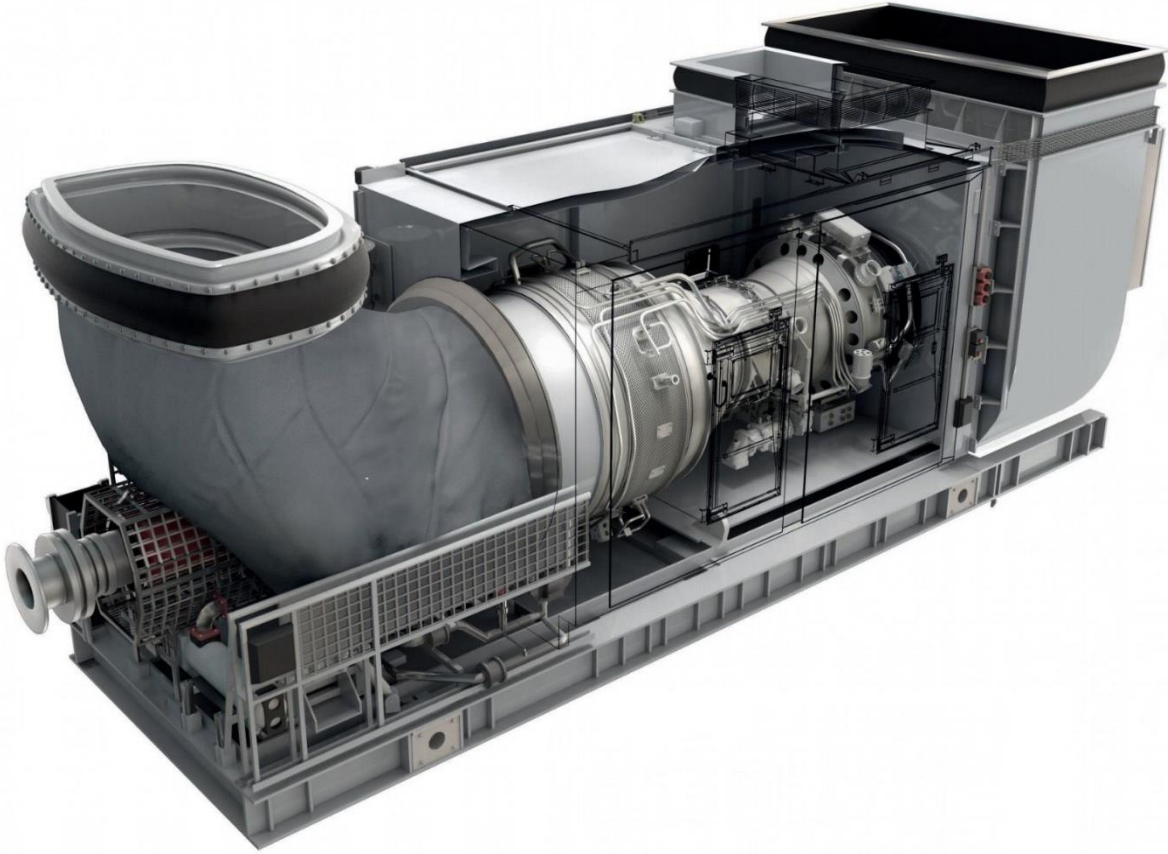


Ilustración 11 – Turbina de gas modelo MT30 - <https://www.linquip.com/device/11084/marine-gas-turbine-mt30-50-hz>

VENTAJAS

Emisiones reducidas
Facilidad de readaptar los buques
Puede aprovechar la infraestructura actual

DESVENTAJAS

Más caro que el diésel derivado del petróleo
Menor infraestructura para los no basados en el diésel
Poca experiencia de los efectos a largo plazo
Menos energéticamente denso que el diésel

6.4. Sistema de propulsión de gas natural licuado

El gas natural licuado es un combustible fósil de bajas emisiones y combustión limpia. El GNL es gas natural que se ha enfriado hasta convertirse en líquido. Con este enfriamiento se consigue reducir su volumen a una 1/600 parte aproximadamente.

La infraestructura para su carga y transporte ya está relativamente globalizada por lo que no es un impedimento. Otra ventaja clave del GNL es su abundancia y disponibilidad.

Es una tecnología que ya ha demostrado ser segura y más eficiente que los motores diésel tradicionales. Ofrece una reducción potencial en la fase de combustión del 85% de NOx y un 95% de SOx con respecto a los combustibles tradicionales [37].

Tabla 6 – Emisiones atmosféricas de varios combustibles en fase TTP (g/MJ)

	HFO	VLSFO	MGO	LNG
CH ₄	7,5x10 ⁻⁴	7,4x10 ⁻⁴	7,5x10 ⁻⁴	1,8x10 ⁻³
N ₂ O	3,9x10 ⁻³	3,8x10 ⁻³	3,9x10 ⁻³	1,6x10 ⁻³
CO ₂	80,1	75,6	73,6	56,5
CO ₂ e(20-year)	81,2	76,7	74,7	58,4

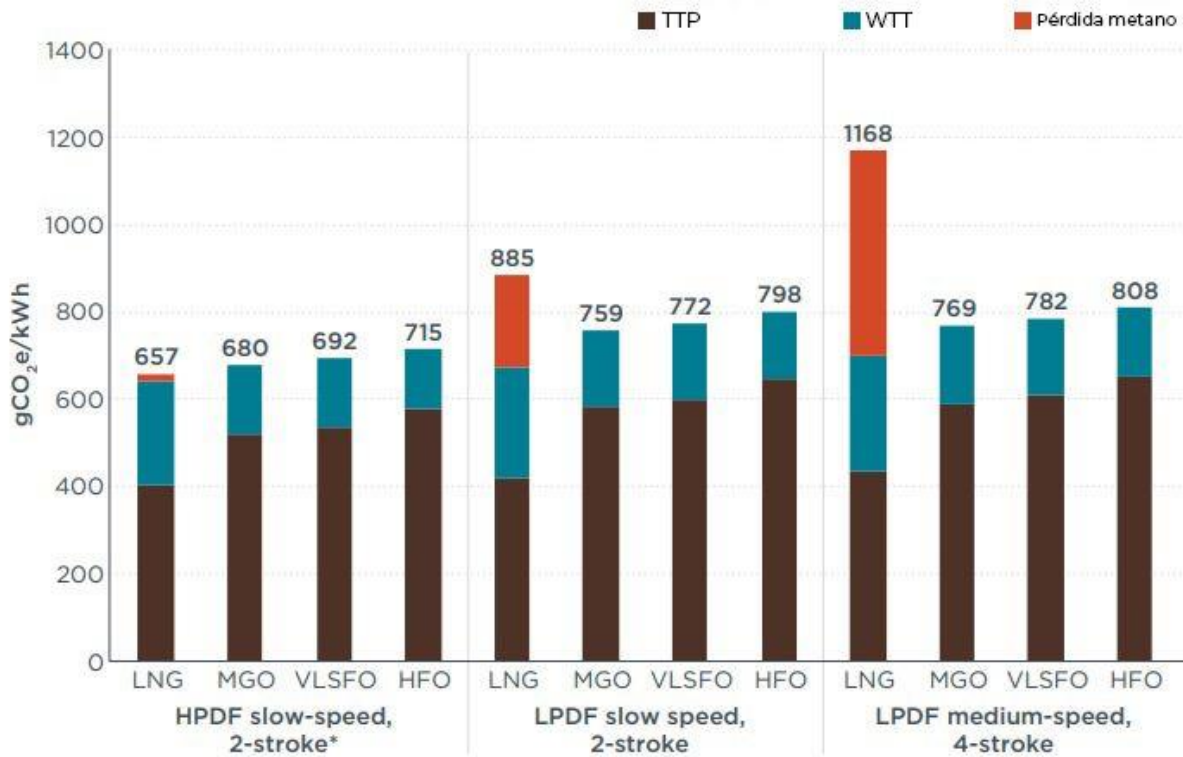
Fuente:

https://theicct.org/sites/default/files/publications/LNG%20as%20marine%20fuel.%20working%20paper-02_FINAL_20200416.pdf

Aunque el GNL en la fase de combustión es menos contaminante que los combustibles marinos habituales como el HFO o MDO, tiene una gran desventaja que es la pérdida de metano. Los dos factores principales de la pérdida de metano son la combustión incompleta y el volumen muerto entre los componentes del motor. Usar motores High-pressure dual -fuel (HPDF) evita en gran parte la pérdida de metano por combustión incompleta, aunque siguen emitiendo un 4% más de emisiones de efecto invernadero que el MGO [57].

El sistema más popular es Low-pressure dual-fuel (LPDF) el cual se usa en más de 300 buques, en especial los cruceros. Este sistema emite un 70% más de gases de efecto invernadero que el MGO [57].

Tabla 7 – Emisiones de CO₂ de diferentes combustibles y motores



Fuente:

https://theicct.org/sites/default/files/publications/LNG%20as%20marine%20fuel,%20working%20paper-02_FINAL_20200416.pdf

Teniendo en cuenta estos datos queda claro que el sistema de GNL no es un candidato para el futuro del transporte marítimo. Los resultados muestran que no cumple con los estándares de la OMI para gases de efecto invernadero y que su uso puede empeorar las emisiones de la industria marítima. Con mejoras en los controles de fugas de metano podrían permitir su implementación como combustible de transición, surge la cuestión sobre si resulta rentable invertir y desarrollar este sistema.

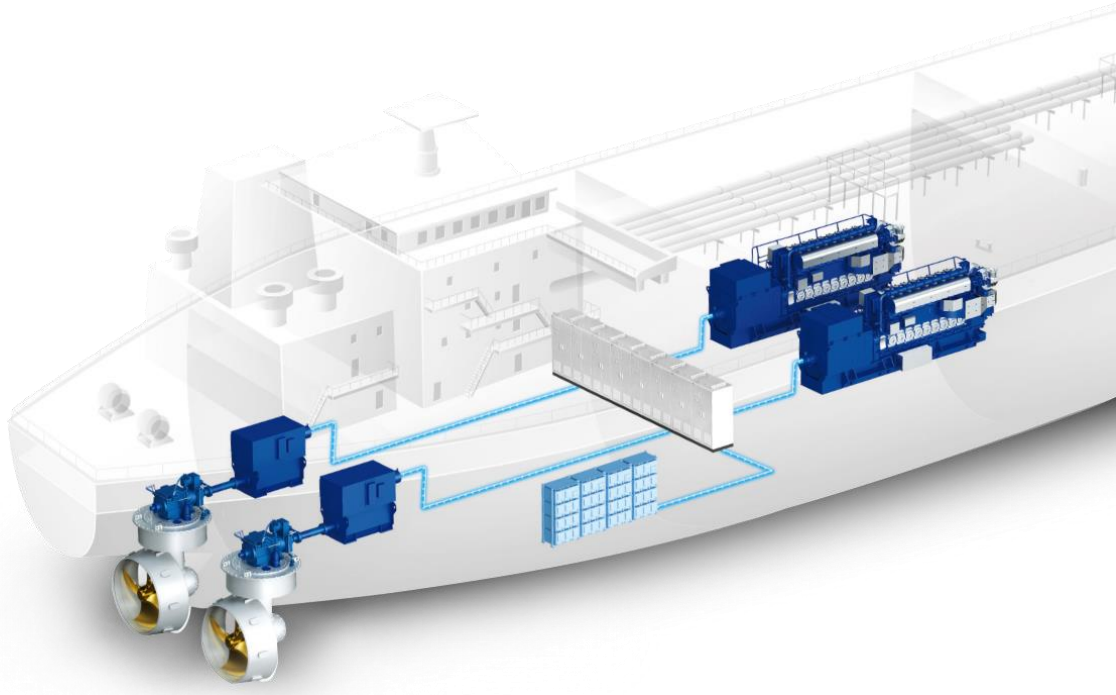


Ilustración 12 – Sistema de propulsión con generadores de GNL y propulsores eléctricos - <https://www.hyundai-engine.com/en/aboutus/Himsen>

VENTAJAS

Emisiones reducidas
Motores eficientes
Más económico que el diésel a largo plazo
Menor gastos en combustible
Más energéticamente denso que otros gases como el hidrógeno y el metanol
Fiable

DESVENTAJAS

Mayor coste de inversión
Menor infraestructura para repostar
Peligrosidad por ser un gas inflamable

7. Casos de estudio

7.1. Sistemas de propulsión eléctricos

Yangtze River Three Gorges 1

El Yangtze River Three Gorges 1 es un buque de 100 m de eslora y 16,3 m de manga. Tiene una capacidad para 1300 pasajeros y tuvo un coste de fabricación de 21M de euros 0.

El buque es considerado como un pionero mundial ya que ha conseguido eliminar por completo las emisiones, ya que su energía proviene de la presa de las Tres Gargantas situada en el río Yangtsé en China, la cual es la mayor planta hidroeléctrica del mundo tanto en extensión como en capacidad instalada.

Este buque cuenta con un sistema de 15 baterías que suman un total de 7,5 MWh, las cuales le dan una autonomía de 55 mn [14]. Se estima que una sola carga de la batería equivale a 530 toneladas métricas de combustible y esto supondrá una reducción de 1660 toneladas de emisiones anuales. Se ha conseguido reducir la tasa de averías incorporando un sistema de control automático y un sistema inteligente de control de la energía [14].



Ilustración 13 – Buque Yangtze River Three Gorges 1 - <https://www.travelmole.com/news/worlds-largest-electric-cruise-ship-sets-sail/>

Aurora

El Aurora es un ferry completamente eléctrico. Tiene una eslora de 238m y un arqueado bruto de 11.046 GRT. Realiza una ruta de 2,15 mn entre Helsingborg (Suecia) y Helsingør (Dinamarca).

Tiene un sistema de propulsión completamente eléctrico y usa un sistema de 640 baterías con una capacidad combinada de 4,16 MWh [55]. Estas baterías están colocadas en cuatro contenedores entre las chimeneas de la cubierta superior.

El buque se carga cuando esta atracado en puerto. Solo necesita de 6 minutos cuando está en Dinamarca y 9 minutos cuando está en Suecia. Utiliza unos brazos robóticos que automáticamente se acoplan al buque una vez esté atracado [55].



Ilustración 14 – Buque Aurora -
https://www.soefart.dk/article/view/648248/forsea_vil_kobe_nye_oresundsfaerger

7.2. Sistemas de propulsión con pila de combustible de hidrógeno

Three Gorges Hydrogen Boat 1

El buque Three Gorges Hydrogen Boat 1 es un pequeño buque de 49.9 m de eslora y capacidad para 100 pasajeros. Es el primer buque propulsado por hidrógeno en China y cuenta con una pila de combustible de 500 kW y un sistema de baterías de 1,8 MWh que le brindan una autonomía de 105 mn aproximadamente [8].

La sociedad de Clasificación China espera que las pruebas realizadas en este buque sirvan para seguir desarrollando las tecnologías de pila de combustible y se espera que en los próximos años el mercado de pilas de combustible en China llegue a los 1450 millones de dólares.



Ilustración 15 – Buque Three Gorges Hydrogen Boat 1 -
<https://www.globaltimes.cn/page/202303/1287659.shtml>

MF Hydra

El MF Hydra es el primer ferry en ser propulsado por hidrógeno. Tiene una eslora de 82.4m y una capacidad para 300 pasajeros y 80 vehículos.

Su planta propulsora consta de dos pilas de combustible de 200kW, dos generadores de 440kW y dos propulsores azimutales. Con este sistema tiene una autonomía de 50 mn y una velocidad máxima de 9 nudos [21][57].

Al estar en funcionamiento el buque no produce CO₂, NO_x, SO_x, lo único que produce es vapor de agua en pequeñas cantidades.



Ilustración 16 – Buque MF Hydra - <https://www.uib.no/en/energy/151373/mf-hydra-%E2%80%93-world%E2%80%99s-first-lh2-driven-ship-and-challenges-ahead-towards-zero-emission>

7.3. Sistemas de propulsión nucleares

N.S. Ural

El buque N.S. Ural es un rompehielos ruso de clase Proyecto 22220 también conocido como LK-60Ya. Estos rompehielos son los sucesores a los buques nucleares clase Arktika. El N.S. Ural tiene una eslora de 173,3m y una manga de 34m [65].

El sistema de propulsión cuenta con dos reactores nucleares PRW modelo RITM-200 los cuales producen un total de 350 MW [45] y dos turbogeneradores de 36 MW cada uno [28]. Utiliza tres motores eléctricos con una potencia total de 81000 CV [66]. Puede estar operativo 7 años sin la necesidad de repostar [65].



Ilustración 17 – Buque N.S. Ural - <https://www.cruisemapper.com/ships/NS-Ural-icebreaker-1768>

N.S. Savannah

El buque N.S. Savannah fue el primer buque mercante con propulsión nuclear del mundo. Construido a finales de los años 50 contaba con un reactor PRW que generaba 74 MW de potencia. El reactor se diseñó conforme a los estándares civiles, usando uranio poco enriquecido y con especial énfasis en la seguridad y fiabilidad, al contrario que los reactores militares comparables que se decantaban por la resistencia a los impactos y la compactibilidad del diseño.

El buque fue financiado por el gobierno de Estados Unidos como un proyecto para demostrar los usos de la energía nuclear de manera pacífica. Estuvo en servicio entre 1962 y 1972 como uno de los cuatros únicos cargueros nucleares jamás construidos. Durante esos años fue visitado por más de 1.4 millones de personas como parte del programa Atoms for Peace, viajó más de 450.000 mn y visitó 77 puertos.

En 1972 un buque con las mismas características de potencia que el N.S. Savannah consumía unas 120 toneladas de combustible diario, con un coste de 2400\$ [1] aproximadamente. A principios de 1974, tras el embargo de petróleo árabe, el mismo buque costaría unos 9000\$ [1] diarios de mantener. El precio del combustible nuclear no cambió a consecuencia de este embargo. Si asumimos que el buque de CI operara 330 días al año, el aumento de su gasto anual en combustible habría eliminado con creces la diferencia en los costes de explotación del Savannah, incluso con todas sus desventajas inherentes [1].



Ilustración 18 – Buque N.S. Savannah - <https://newyorkship.org/history/into-the-nuclear-age/>

7.4. Sistemas de propulsión diésel-eléctrico

Wonder of the Seas

El buque Wonder of the Seas es actualmente el mayor crucero del mundo con una eslora de 362m y una manga de 65m. Tiene una capacidad de 6988 huéspedes y 2300 tripulantes con un arqueo bruto de 236.857 toneladas [64][33]. Tiene una planta propulsora que consta de dos generadores Wärtsilä de 16 cilindros y cuatro generadores Wärtsilä de 12 cilindros. Para la propulsión usa tres propulsores azimutales modelo Azipod de la empresa ABB, que generan un empuje total de 81000 CV [64]. También dispone de cuatro hélices de proa cada una con una potencia de 7380 CV.



Ilustración 19 – Buque Wonder of the Seas - <https://www.royalcaribbeanblog.com/wonder-of-the-seas>

Celebrity Millennium

Este crucero utiliza un sistema de propulsión COGES. El sistema utiliza dos turbinas de gas LM2500+ que generan una potencia aproximada de 68000 CV y una turbina de vapor. En total genera 59 MW de energía eléctrica de los cuales 39 MW son usados para la propulsión, el resto se usa para satisfacer el resto del buque. Es propulsado por dos propulsores azimutales modelo Mermaid.[10]

Al utilizar el sistema COGES en lugar de un sistema tradicional diésel el Celebrity Millennium produce un 20% menos de emisiones de CO₂, 80% menos de NO_x y hasta un 98% menos de SO_x [10]. Además de las reducciones en emisiones atmosféricas este sistema incrementó el espacio útil del buque aumentando su capacidad en 40 camarotes adicionales para pasajeros y 20 para la tripulación. La reducción de ruido de este sistema también permitió construir 26 camarotes con terrazas a popa. [10]



Ilustración 20 – Buque Celebrity Millennium - <https://www.thecelebritycommitment.com/ships/celebrity-millennium/>

7.5. Sistemas de propulsión híbridos

MS Color Hybrid

Este buque híbrido tiene un sistema de propulsión que consta de 4 motores diésel y 5 MWh de baterías. Fue el mayor buque híbrido enchufable cuando se inauguró 2019. Con esta cantidad de baterías es capaz de navegar en modo 100% eléctrico durante una hora [42][50]. Esto hace que pueda realizar las operaciones de entrada y salida del puerto de manera silenciosa y sin emisiones atmosféricas.

Su sistema de baterías está refrigerado por agua y tiene una vida útil de 10 años. Gracias a este sistema híbrido el buque cumple con el nivel III del control de emisiones de NOx de la OMI.



Ilustración 21 – Buque MS Color Hybrid - <https://www.caranddriver.com/es/estilo-de-vida/a28619974/el-barco-hibrido-ya-esta-aqui-y-sus-baterias-equivalen-a-las-de-50-tesla/>

Saint-Malo

Este buque tendrá la mayor batería instalada en un buque híbrido, con una capacidad de 11,5 MWh [7] es aproximadamente el doble que los buques híbridos convencionales.

"El gran tamaño de las baterías permitirá a los buques operar a plena potencia, utilizando ambas hélices y todos los propulsores para maniobrar sin emisiones dentro y fuera de los puertos, incluso con mal tiempo. La solución de conexión a tierra incorporada cargará las baterías mientras estén atracados". explicó Hakan Agnevall, presidente y consejero delegado de Wärtsilä, en un comunicado. [7]



Ilustración 22 – Impresión artística del buque Saint-Malo en alta mar -
<https://brittanyferriesnewsroom.com/brittany-ferries-saint-malo-will-be-the-largest-hybrid-vessel-ever-built/>

7.6. Sistemas de propulsión de biocombustibles

MAERSK KALMAR

Este buque portacontenedores de 300 m de eslora no fue construido para funcionar con biocombustibles, pero en 2011 se decidió probar la eficacia de estas nuevas tecnologías.

Realizó un viaje desde Bremerhaven, Alemania hasta Pipavav, India. En este viaje de 6500 mn se fueron probando varias mezclas de biocombustible con diésel, desde una concentración del 7% hasta el 100% [53][63].



Ilustración 23 – Buque MAERSK KALMAR - <https://www.shipspotting.com/photos/2015662>

7.7. Sistema de propulsión de gas natural licuado

AIDAnova

Este crucero es el primer crucero del mundo propulsado por GNL. Con una eslora de 337 m y una manga de 42 m puede llevar hasta 5,200 huéspedes y 1,500 tripulantes [50].

Tiene un sistema de propulsión que consta de 4 motores Caterpillar de doble combustible por lo que puede usar GNL para ser más respetuoso con el medio ambiente.



Ilustración 24 – Buque AIDAnova - <https://reisetopia.de/kreuzfahrten/aida-cruises/aida-nova/>

8. Desafíos y oportunidades

8.1. Tecnologías emergentes para la propulsión marina

8.1.1. Amoníaco

El amoníaco es un combustible que cuando se obtiene de fuentes renovables es completamente libre de emisiones de CO₂ [3] y se clasifica como amoníaco verde. La forma más prometedora de generarlo consiste en producir hidrógeno verde y luego combinarlo con nitrógeno para obtenerlo.

Dado que ya existe la infraestructura para transportar y almacenar amoníaco y que a temperatura ambiente es un líquido no inflamable, hace que sea más fácil de adoptar como combustible a gran escala. Es uno de los químicos más usados en todo el mundo, aunque para su uso como combustible marítimo haría falta una mejora en la infraestructura de los puertos para que sea viable.

El uso más prometedor del amoníaco es como combustible para motores de dos tiempos. Se espera que estos motores estén comercialmente disponibles en 2024. También se puede usar el amoníaco en combinación con hidrógeno para motores de CI. Esta mezcla es bastante prometedora ya que no necesita de un motor especial por lo que se puede aplicar a buques ya existentes sin la necesidad de realizar muchos cambios en el motor.

También se puede usar amoníaco como generador de hidrógeno para pilas de combustible, pero este sistema es menos conocido.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Cero emisiones	Gas tóxico e inflamable
Amoníaco es muy común	Requiere una gran inversión
Relativamente fácil de transportar y almacenar	

8.1.2. Propulsión asistida por el viento

La propulsión asistida por el viento también conocida como WASP (Wind assisted ship propulsión) es una tecnología que no busca ser el único método de propulsión del buque, sino que ayuda a reducir la carga en los motores principales y con ello una reducción en el consumo de combustible y de emisiones.

Podemos diferenciar tres tecnologías principales:

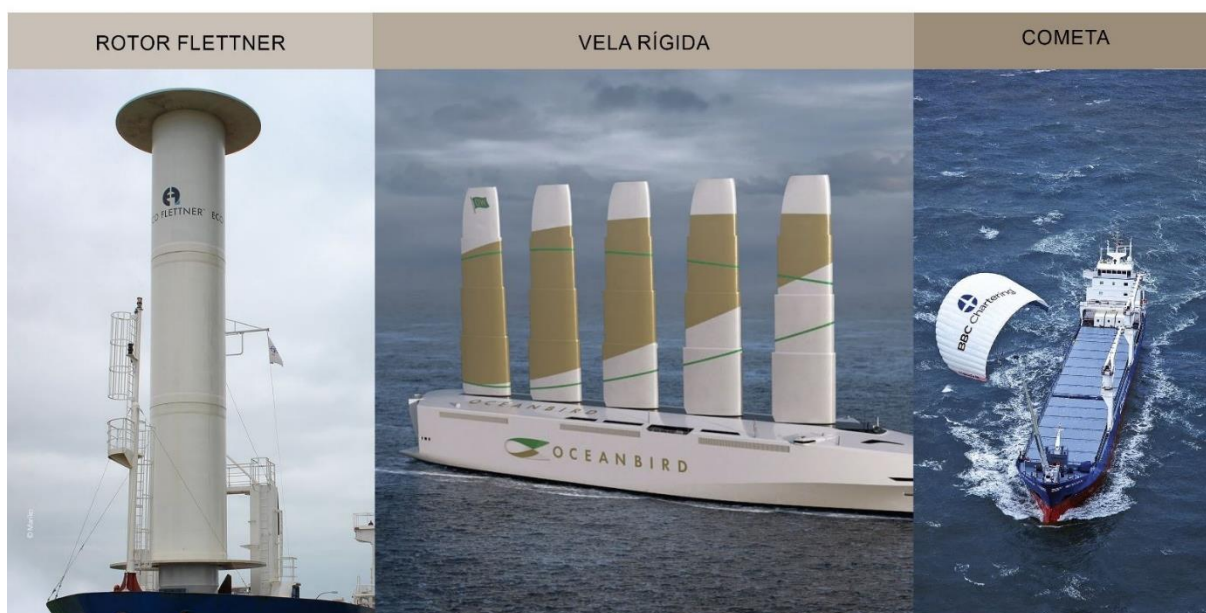


Ilustración 25 – Métodos de propulsión asistida por viento más prometedoros –
<https://www.usni.org/magazines/proceedings/2019/november/under-way-wind-power-sail-assisted-ships> -
<https://www.dezeen.com/2020/10/22/wallenius-marin-oceanbird-ship-wind-design/> - <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/ECO-FLETTNER-rotor-sail-stands-the-test.html>

El rotor flettner se posiciona como la tecnología más prometedora debido a su relativa facilidad de instalación comparada con los otros sistemas. Su uso no entorpece en gran medida las operaciones del buque y no necesita de más tripulación para utilizarlo. Con este sistema se han conseguido reducciones en el consumo de hasta el 89,6% [62].

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Emisiones reducidas</p> <p>Menor gastos en combustible</p>	<p>Mayor coste de inversión</p> <p>Disponibilidad del viento</p> <p>Dificultad de diseño para no entorpecer las operaciones habituales del buque</p>

8.2. Retos de cada sistema

Los sistemas analizados anteriormente prometen una reducción importante en las emisiones atmosféricas, incluso llegando a no emitir ningún tipo de contaminante. Sin embargo, no todos son aspectos positivos. Para poder llegar a implementar estos sistemas a gran escala primero hay que solventar estos desafíos:

Amoniac: Aunque es un sistema muy prometedor para conseguir una navegación cero emisiones su toxicidad hace que sea difícil de implementar. Mejoras en los sistemas de control y prevención de fugas son necesarios para evitar accidentes a bordo.

Nuclear: Sus altos costes de inversión y mantenimiento limitan su viabilidad solo a los mayores buques de carga. El miedo de la población hacia estos sistemas hace que sea más difícil de implementar en buques con pasajeros. Se necesitan de normativas especiales para que estos buques puedan funcionar con relativa normalidad con respecto a las entradas a puertos y pasos por canales. También surge el problema de los residuos, especialmente con combustibles más tradicionales.

LNG: Este combustible ofrece promesas para la transición energética, pero presenta un gran problema si no se controla adecuadamente. Las fugas de metano pueden llegar a hacer de este sistema un sistema más contaminante que los combustibles tradicionales. Es necesario desarrollar e implementar nuevas tecnologías para prevenir estas fugas.

Hidrógeno: Es de los combustibles alternativos menos energéticamente denso esto unido con su dificultad a la hora de almacenar debido a las altas presiones y bajas temperaturas hace que sea un combustible poco apto para uso general.

Biocombustibles: El coste en comparación con combustibles tradicionales dificulta la elección de esta opción. Al no ser un combustible común puede ser difícil de obtener y si no está basado en el diésel requiere de una infraestructura nueva para el suministro.

Combustión interna: El uso de EGR y SCR reducen drásticamente las emisiones atmosféricas de estos sistemas y en combinación con combustibles bajos en azufre pueden llegar a ser una buena alternativa hasta que los sistemas cero emisiones estén más desarrollados. Sin embargo, nuevas normativas pueden suponer un reto para estos sistemas. Normativas sobre emisiones en puertos o en zonas costeras puede hacer que estos sistemas no sean viables para una gran parte de buques. Llegando incluso a prohibir la entrada a puertos.

Asistido por el viento: Aunque en casos excepcionales puede reducir drásticamente el uso de combustible en la realidad su efectividad es mucho menor. Con una reducción media de tan solo un 6% para una instalación con 2 rotores flettner hace que sea difícil de ser viable una inversión en este sistema [62].

8.3. El futuro de la normativa

A partir del 1 de enero del 2023 todos los buques con pabellón de países que han ratificado el convenio MARPOL deberán pasar un examen de emisiones en cada inspección anual. El examen dará un resultado llamado el índice de eficiencia energética aplicable a los buques existentes (EEXI) y será obligatorio para todos los buques de más de 400 GRT. Este examen es parecido al ya usado índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI) el cual es usado desde 2013 para buques de nueva construcción.

La OMI espera lograr una reducción del 40% de emisiones de carbono en 2030 con respecto a los niveles de 2008 [15]. Además del EEXI los buques deberán calcular su indicador de intensidad de carbono (CII). En función de los resultados del indicador de intensidad de carbono se calificará la intensidad de carbono del buque como A, B, C, D o E siendo A la mejor. La calificación indica un nivel de rendimiento muy superior, superior, moderado, inferior o muy inferior. El grado de rendimiento se registrará en una "declaración de cumplimiento" que se detallará en el Plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP). Si un buque es calificado con una E durante un año o una D durante tres deberá presentar un plan de medidas correctivas con el cual alcance una C o superior.

Es posible que los puertos comiencen a requerir el certificado internacional de eficiencia energética (IEEC) a todos los buques que deseen atracar en él. Para conseguir este certificado los buques tienen que conseguir un SEEMP de más de C o presentar un plan de medidas correctivas aprobado previamente por las autoridades competentes. Además, la no obtención de un certificado IEEC puede dejar al buque completamente inoperativo al poder considerarse como un incumplimiento del convenio MARPOL.

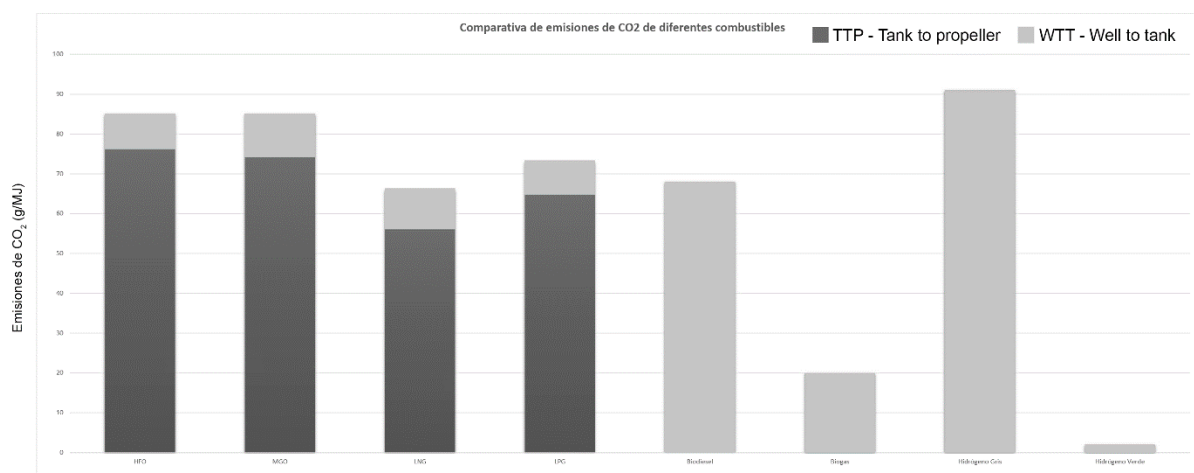
Estas nuevas normativas también pueden afectar a los seguros de los buques ya que la no obtención de los certificados determina que el buque no está en condiciones de navegar.

8.4. Emisiones de CO₂ de diferentes combustibles

Las emisiones de CO₂ son un problema grave para el transporte marítimo. Con las nuevas normativas sobre emisiones hay que encontrar soluciones para poder lidiar con las altas tasas de emisiones que emiten los buques. Solamente con cambiar el tipo de combustible usado es posible reducir de manera considerable las emisiones de CO₂.

En la siguiente tabla se muestra una comparativa de diferentes combustibles con sus emisiones y con respecto a la energía que brindan. Podemos diferenciar dos situaciones diferentes donde se producen emisiones. TTP o Tank to propeller se refiere a las emisiones que produce el propio buque cuando usa el combustible para navegar. WTT o Well to tank es la cantidad de emisiones que se producen cuando se fabrica o extrae el combustible. Por ejemplo, el hidrógeno extraído del Gas natural que contiene metano (CH₄) es cero emisiones a la hora de propulsar el buque, pero si lo comparamos con el gasoil (MGO) en términos de emisiones globales es prácticamente igual de dañino para el medio ambiente en emisiones de CO₂.

Tabla 8 – Comparativa de emisiones de CO₂ de diferentes combustibles



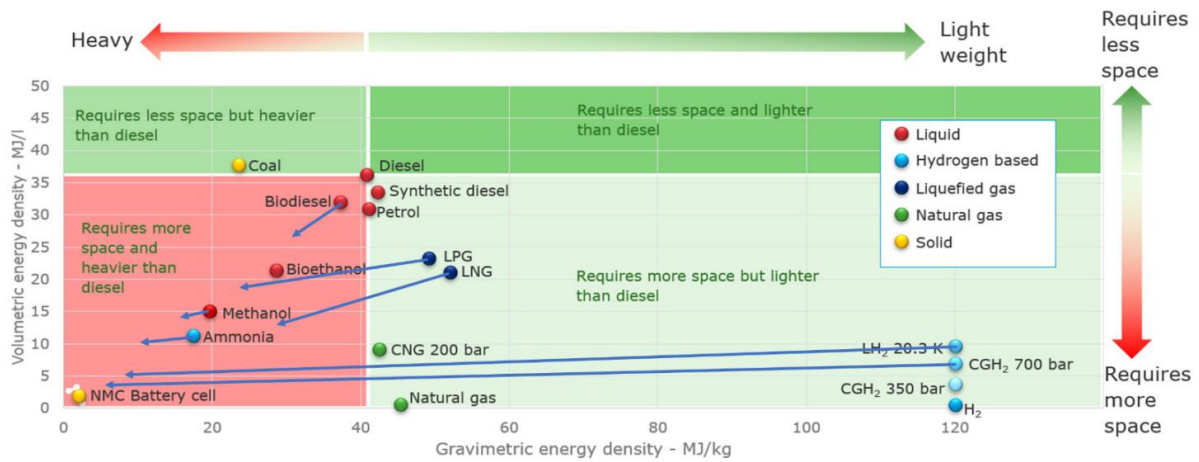
Fuente: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/alternative-fuels.html>

8.5. Densidad Energética

La densidad energética de un combustible se puede clasificar de dos formas diferentes; la densidad energética volumétrica (contenido de energía por unidad de volumen) y la densidad energética gravimétrica (contenido de energía por unidad de masa). El mejor combustible posible tiene valores altos de los dos tipos de densidades, con lo cual ocupa poco espacio a la hora de almacenarlo y tiene un peso reducido. La densidad del combustible puede determinar si un tipo de combustible es idóneo para ciertos tipos de buques u operaciones marinas.

La siguiente tabla muestra las densidades energéticas tanto volumétricas como gravimétricas de diferentes combustibles estudiados anteriormente. Las flechas representan el impacto que tiene el tamaño de los sistemas de almacenamiento de cada combustible. Los combustibles más a la derecha son más pesados y hacia la izquierda más ligeros. Los combustibles situados más arriba son más densos por lo que requieren menos espacio de almacenamiento y los situados más abajo requieren de más espacio al ser menos densos.

Tabla 9 – Densidades energéticas de diferentes combustibles



Fuente: <https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2020/04/Alternative-Marine-Fuels-Study-final-report-25.09.19.pdf>

8.6. Madurez Tecnológica

Con madurez tecnológica nos referimos a la madurez de una tecnología de propulsión. Se asignamos un nivel de madurez a cada tecnología, siendo un nivel de madurez 1 una tecnología muy madura, con muchos años de experiencia y que ya está comercialmente disponible. Un nivel 4 indica un sistema poco maduro, en el cual los sistemas de propulsión no están ni siquiera en fase de pruebas.

Tabla 10 – Nivel de madurez de diferentes sistemas

Combustible	Tipo de funcionamiento	Nivel de madurez
LNG	Combustión Interna 4 tiempos	1
	Combustión Interna 2 tiempos	1
Hidrógeno	Pila de Combustible	3
	Combustión interna	4
Amoniaco	Pila de Combustible	4
	Combustión interna	4
Biocombustibles	Combustión Interna 4 tiempos	2
	Combustión Interna 2 tiempos	2
Eléctricos	Baterías	2
Nucleares	Reactor PRW	1
	Reactor de torio	4

Fuente: <https://sea-Ing.org/wp-content/uploads/2020/04/Alternative-Marine-Fuels-Study-final-report-25.09.19.pdf>

8.1. Estudio comparativo de distintos sistemas de propulsión en un buque

En el siguiente caso estudio se analizan los datos de un buque conceptual propulsado por un sistema de pila de combustible de hidrógeno. El buque es un ferry diseñado para navegar por las costas de Corea del Sur. El buque debía cumplir una serie de requerimientos para poder ser factible. Los requerimientos iniciales fueron: Una eslora superior a los 30 m para poder acomodar el sistema de almacenamiento de hidrógeno, capacidad para más de 130 pasajeros, velocidad de crucero de 15 kn, arqueado bruto de más de 100 toneladas y una autonomía de 100 mn con 2 viajes diarios de ida y vuelta.

Las dimensiones finales del ferry son las siguientes: 33 m de eslora, capacidad para 135 pasajeros y un arqueado bruto de 170 toneladas. Se calculó una potencia de pila de combustible de 1200 kW para conseguir alcanzar los 15 nudos requeridos. El almacenamiento de hidrógeno consta de 25 tanques con una capacidad total de 525 kg [18].

Tabla 11 - Dimensiones del ferry costero conceptual

	Dimensiones
L(LOA) x B x D	33,0m x 7,0m x 3,3m
Tonelaje bruto	170 GT
Pasajeros	135
Pila de combustible	1200 kW (PEMFC)
Motores	MCR: 1080 kW (540 kW x2)
	NCR: 900 kW (450 kW x2)
Velocidad	Máxima: 16.0 kn en MCR
	Crucero: 15.0 kn en NCR
Autonomía	100 mn a 15 kn
Tanque Combustible	525 kg
Convertidor	DC-DC, DC-AC, 380 V
Batería	120 kWh

Fuente: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/6/755>

En la siguiente tabla se hace un desglose de los cálculos de consumo energético que estiman un total de $1,6 \times 10^8$ MJ durante 20 años de funcionamiento.

Tabla 12 - Escenario del viaje del ferry costero

Trip Hour for One-Way Trip (min)	Energy Consumption for Each Round Trip (MJ)	Round Trip Frequency per Day	Lifetime (Years)	Total Energy Consumption (MJ)
120	1.098×10^4	2	20	1.603×10^8

Fuente: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/6/755>

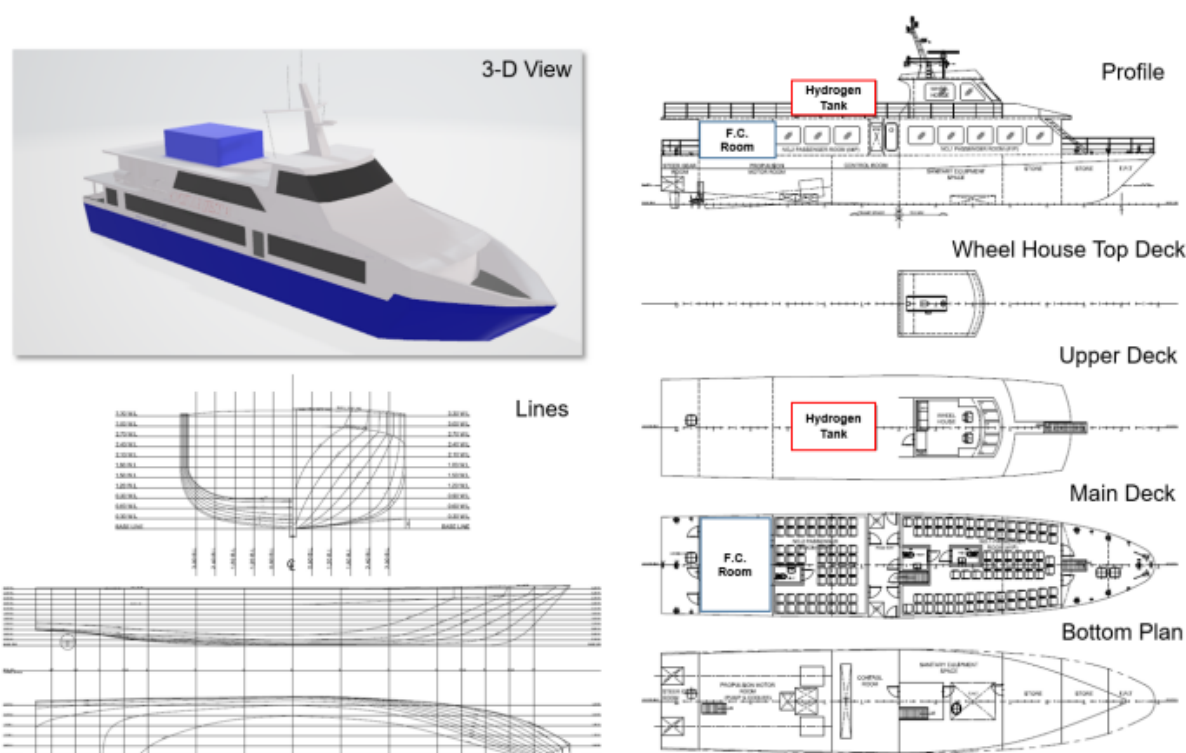


Ilustración 26 - La vista 3D, las líneas y la disposición general del ferry - <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/6/755>

En este estudio también se consideró reemplazar el sistema de pila de combustible por dos tipos de motores de CI diferentes, uno utilizando MGO y otro LNG. Los dos sistemas de CI se calcularon con la misma potencia que la pila de combustible, es decir, 1200 kW. Se considero también la posibilidad de incluir un SCR para reducir las emisiones del MGO.

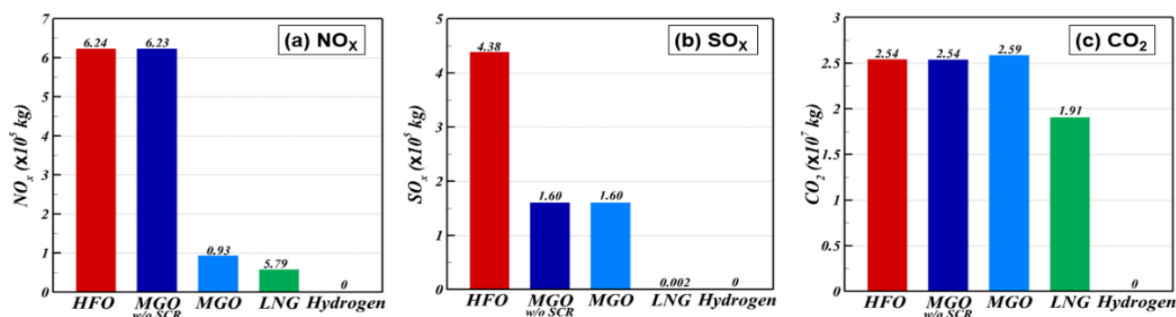
Tabla 13 - Especificación del generador y la pila de combustible en la fase TTP

Type of Fuel	MGO	LNG	Hydrogen
Capacity (kW)		1200	
Type of generator	MS diesel generator (with SCR)	4-stroke Otto-cycle X-DF (with a methane slip of 5.5 g CH ₄ /kWh)	Fuel cell with electric motor
Efficiency (%)	46	47	53
Lower heating value (MJ/kg)	42.7	49.2	120
Fuel consumption for 1 round trip (g/kWh)	184.7	155.8	56.6
Total fuel consumption (tons)	8.15 × 10 ⁶	6.97 × 10 ⁶	2.52 × 10 ⁶

Fuente: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/6/755>

La tabla 5 compara la cantidad de emisiones de cada sistema en la fase TTP. En el caso de las emisiones de NO_x se observa que el uso del SCR en los motores de MGO reduce drásticamente la cantidad de emisiones casi igualando al LNG. El hidrógeno supera a todos los demás combustibles ya que no emite ningún contaminante atmosférico en esta fase.

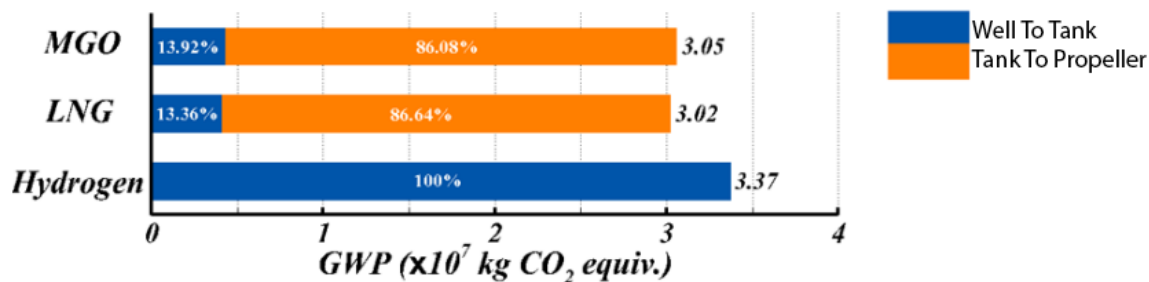
Tabla 14 – Comparativa de emisiones de NO_x, SO_x, y CO₂ en la fase de TTP



Fuente: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/6/755>

En este estudio se asumió que la fabricación del hidrógeno provenía del GNL, conocido como hidrógeno gris. Al tener en cuenta la fabricación del hidrógeno podemos observar que las emisiones conjuntas de WTT y TTP superan a las de MGO y LNG. Estos resultados recalcan la importancia de la procedencia de los combustibles cero emisiones.

Tabla 15 – Emisiones GWP de los 3 sistemas combinando emisiones WTT y TTP



Fuente: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/6/755>

9. Conclusiones

Para que un sistema de propulsión pueda ser considerado como viable hay que realizar un estudio exhaustivo de las labores que va a realizar el buque. Dependiendo de factores como la autonomía necesaria, las condiciones climatológicas y el coste entre otros un sistema va a prevalecer sobre los demás.

En la siguiente tabla se hace una comparativa de los diferentes sistemas de propulsión teniendo en cuenta varios aspectos. Los aspectos señalados en rojo todavía no son viables para su implementación con carácter general, aunque puedan servir para casos específicos. Los indicados en verde ya cumplen con todos los requisitos de los buques por lo que son totalmente viables para su implementación, aunque con distintos grados de eficiencia.

Tabla 16 – Comparativa entre diferentes combustibles

Energy source	Fossil (without CCS)						Bio	Renewable ⁽³⁾		
	Fuel	HFO + scrubber	Low sulphur fuels	LNG	Methanol	LPG	HVO (Advanced biodiesel)	Ammonia	Hydrogen	Fully-electric
High priority parameters										
• Energy density		●	●	●	●	●	●	●	●	●
• Technological maturity		●	●	●	●	●	●	●	●	●
• Local emissions		●	●	●	●	●	●	●	●	●
• GHG emissions		●	●	● ⁽²⁾	●	●	●	●	●	●
• Energy cost		●	●	●	●	●	●	●	●	● ⁽⁴⁾
• Capital cost	Converter	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Storage	●	●	●	●	●	●	●	●	●
• Bunkering availability		●	●	●	●	●	●	●	●	●
Commercial readiness ⁽¹⁾		●	●	●	●	●	●	●	●	● ⁽⁵⁾
Other key parameters										
• Flammability		●	●	●	●	●	●	●	●	●
• Toxicity		●	●	●	●	●	●	●	●	●
• Regulations and guidelines		●	●	●	●	●	●	●	●	●
• Global production capacity and locations		●	●	●	●	●	●	●	●	●

⁽¹⁾ Taking into account maturity and availability of technology and fuel.

⁽²⁾ GHG benefits for LNG, methanol and LPG will increase proportionally with the fraction of corresponding bio- or synthetic energy carrier used as a drop-in fuel.

⁽³⁾ Results for ammonia, hydrogen and fully-electric shown only from renewable energy sources since this represents long term solutions with potential for decarbonizing shipping. Production from fossil energy sources without CCS (mainly the case today) will have a significant adverse effect on the results.

⁽⁴⁾ Large regional variations.

⁽⁵⁾ Needs to be evaluated case-by-case. Not applicable for deep-sea shipping.

Fuente: <https://sea-Ing.org/wp-content/uploads/2020/04/Alternative-Marine-Fuels-Study-final-report-25.09.19.pdf>

Se puede concluir de este trabajo de fin de grado sobre los sistemas de propulsión marina menos contaminantes que se han realizado avances significativos en la búsqueda de soluciones más sostenibles para el transporte marítimo. La necesidad de reducir las emisiones y cumplir con los nuevos objetivos impuestos por la OMI han impulsado la investigación y el desarrollo de tecnologías de propulsión innovadoras.

Realizando un análisis comparativo de los distintos sistemas de propulsión podemos identificar una serie de opciones prometedoras como los sistemas de propulsión eléctricos, híbridos, de hidrógeno y otros combustibles alternativos. Estos sistemas ofrecen importantes ventajas, como una mayor eficiencia energética, la reducción de las emisiones y la posibilidad de utilizar fuentes de energía renovables.

Sin embargo, a pesar de los progresos realizados, siguen existiendo importantes retos como los costes asociados al despliegue y mantenimiento de la infraestructura necesaria para apoyar los sistemas de combustibles más limpios.

A pesar de estos retos, es esencial seguir apoyando la investigación y el desarrollo en este ámbito y fomentar la colaboración entre la industria marítima, los investigadores y los responsables políticos. El despliegue de sistemas de propulsión marina más limpios no solo es esencial para cumplir la normativa medioambiental, sino que también contribuye a la protección del medio marino y a la mitigación del cambio climático.

Bibliográficas

- [1] Adams, R. (2022, 18 agosto). Why Did The NS Savannah Fail? Can She Really be Called a Failure? - Atomic Insights. *Atomic Insights*. Recuperado 3 de julio de 2023, de <https://atomicinsights.com/cover-story-why-did-savannah-fail/>
- [2] *Alternative Fuels: The Options* - DNV. (s. f.). DNV GL. <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/alternative-fuels.html>
- [3] *Ammonia as a shipping fuel*. (s. f.). Recuperado 12 de junio de 2023, de <https://www.globalmaritimeforum.org/news/ammonia-as-a-shipping-fuel>
- [4] Anish. (2021). A Guide To Marine Gas Oil and LSFO Used On Ships. *Marine Insight*. <https://www.marineinsight.com/guidelines/a-guide-to-marine-gas-oil-and-lsfo-used-on-ships/>
- [5] Batteries on board ocean-going vessels. (2019). *MAN Energy Solutions*. <https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf>
- [6] *Benefits and challenges of new wind-assisted propulsion systems* - DNV. (s. f.). DNV GL. Recuperado 3 de julio de 2023, de <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Benefits-and-challenges-of-new-wind-assisted-propulsion-systems.html>
- [7] *Brittany Ferries' Saint-Malo will be the largest hybrid-vessel ever built* – Brittany Ferries. (s. f.). Recuperado 2 de julio de 2023, de <https://brittanyferriesnewsroom.com/brittany-ferries-saint-malo-will-be-the-largest-hybrid-vessel-ever-built/>
- [8] China launches its first hydrogen fuel cell powered vessel. (2023, 31 marzo). The Maritime Executive. <https://maritime-executive.com/article/china-launches-its-first-hydrogen-fuel-cell-powered-vessel>
- [9] Ciolkosz, D., PE. (s. f.). *What's So Different about Biodiesel Fuel?* Recuperado 9 de julio de 2023, de [https://extension.psu.edu/whats-so-different-about-biodiesel-fuel#:~:text=Biodiesel%20has%20higher%20lubricity%20\(it,Biodiesel%20contains%20practically%20no%20sulfur.](https://extension.psu.edu/whats-so-different-about-biodiesel-fuel#:~:text=Biodiesel%20has%20higher%20lubricity%20(it,Biodiesel%20contains%20practically%20no%20sulfur.)
- [10] *COGES propulsion system of the MILLENNIUM cruise liner*. (s. f.). Wartsila.com. Recuperado 28 de junio de 2023, de <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/coges-propulsion-system-of-the-millennium-cruise-liner>

- [11] Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion. (2014). *Ocean Engineering*, Volume 79, Pages 101-130.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.10.015>
- [12] DIESEL-ELECTRIC PROPULSION. (2019). *DST, Fact Sheet N°2*;
https://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved_project_public/0001/29/915654de0400ca6d1a605b5c18abf6bd186ef916.pdf
- [13] Diesel-Electric Propulsion Systems. (2016). *Wärtsilä*.
https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/electric-propulsion-and-drives/brochure-o-ea-diesel-electric-propulsion-systems.pdf?sfvrsn=15f6ae45_6
- [14] Doll, S. (2022). Worlds largest electric cruise ship; makes maiden voyage in China with a whopping 7,500 kWh in battery power. *Electrek*.
<https://electrek.co/2022/03/31/worlds-largest-electric-cruise-ship-makes-maiden-voyage-in-china-with-a-whopping-7500-kwh-in-battery-power/>
- [15] EEXI y CII: Medidas de intensidad de carbono de los buques y el sistema de clasificación. (s. f.). IMO. Recuperado 8 de julio de 2023, de <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/EEXI-CII-FAQ.aspx>
- [16] *Electric marine propulsion systems* - Wärtsilä. (s. f.). Wartsila.com. Recuperado 4 de julio de 2023, de <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/electric-propulsion-systems>
- [17] *Electric shipping and hybrid ships* - Wärtsilä. (s. f.). China. Recuperado 26 de junio de 2023, de <https://www.wartsila.cn/en/marine/products/ship-electrification-solutions>
- [18] Environmental Life-Cycle Assessment of Eco-Friendly Alternative Ship Fuels (MGO, LNG, and Hydrogen) for 170 GT Nearshore Ferry. (2022). *Journal of Marine Science and Engineering*, Volume 10, Issue 6.
<https://doi.org/10.3390/jmse10060755>
- [19] *Fuel Cells*. (2021, 8 noviembre). Recuperado 29 de junio de 2023, de <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/about-us/innovation-and-technology/fuel-cells.html>
- [20] Ghosh, S. (2022). What Are Hybrid Ships? *Marine Insight*.
<https://www.marineinsight.com/types-of-ships/what-are-hybrid-ships/>

- [21] Guven, D., & Ozgur Kayalica, M. (2023). Life-cycle assessment and life-cycle cost assessment of lithium-ion batteries for passenger ferry. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 115*.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103586>
- [22] Habibic, A., & Habibic, A. (2023, 31 marzo). WATCH: MF Hydra starts worlds first voyage on emission-free liquid hydrogen. *Offshore Energy*. Recuperado 4 de julio de 2023, de <https://www.offshore-energy.biz/watch-mf-hydra-starts-worlds-first-voyage-on-emission-free-liquid-hydrogen/>
- [23] Höglund, B. A. (s. f.). *Sustainable Transformation in Ocean Shipping | GEODIS Spain*. GEODIS Spain. Recuperado 29 de junio de 2023, de <https://geodis.com/es/en/blog/sustainability/sustainable-transformation-ocean-shipping>
- [24] *How can shipping be more environmentally friendly?* (s. f.). Recuperado 2 de julio de 2023, de <https://www.rmg.co.uk/stories/topics/how-can-shipping-be-more-environmentally-friendly>
- [25] Iberdrola. (2021). HIDRÓGENO VERDE. *Iberdrola*.
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>
- [26] *IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions*. (2019). IMO. Recuperado 4 de junio de 2023, de <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- [27] *Kawasaki Develops EGR System for Marine Diesel Engine —NOx Tier III Regulations Cleared— | Kawasaki Heavy Industries, Ltd.* (s. f.). Recuperado 9 de julio de 2023, de https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/20120517_2e.html
- [28] *Kirovsky Zavod Will Manufacture a Steam-Turbine Plant for the World's Largest Nuclear-Powered Ice-Breaker*. (s. f.).
https://web.archive.org/web/20201027033844/https://kzgroup.ru/eng/m/110/kirovsky_zavod_will_manufacture_a_steam-turbine_plant_for_the_worlds_largest_nuclear-powered_ice-br.html
- [29] Kolodziejcki, M., & Michalska-Pozoga, I. (2023). Battery Energy Storage Systems in Ships' Hybrid/Electric Propulsion Systems. *Energies, Volume 16, Issue 3*.
<https://doi.org/10.3390/en16031122>
- [30] Krmek, I., Mrzljak, V., & Poljak, I. (2022). Analysis and Comparison of Ship Propulsion Systems. *Journal of Maritime & Transportation Science, 62(1)*, 75-95.
<https://doi.org/10.18048/2022.62.05>

- [31] Marine Insight. (2022). Worlds Largest Electric Cruise Ship Embarks On Maiden Voyage. *Marine Insight*.
<https://www.marineinsight.com/shipping-news/worlds-largest-electric-cruise-ship-embarks-on-maiden-voyage/>
- [32] *Marine SCR System for Compliance with IMO NOx Tier 3 Regulations / YANMAR Technical Review / Technology / About YANMAR / YANMAR*. (s. f.). YANMAR. Recuperado 9 de julio de 2023, de https://www.yanmar.com/global/about/technology/technical_review/2018/0413_2.html
- [33] Maritime, B. (2022, 13 mayo). *VESSEL REVIEW | Wonder of the Seas – Royal Caribbean’s largest ship boasts 6,800-guest capacity - Baird Maritime*. Baird Maritime. Recuperado 26 de junio de 2023, de <https://www.bairdmaritime.com/work-boat-world/passenger-vessel-world/cruise/vessel-review-wonder-of-the-seas-royal-caribbeans-largest-ship-boasts-6800-guest-capacity/>
- [34] *Maritime freight and vessels statistics*. (2022, octubre). EuroStat. Recuperado 11 de julio de 2023, de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Maritime_freight_and_vessels_statistics
- [35] Naval Supply Systems Command. (s. f.). *Naval Nuclear Propulsion Overview*. Recuperado 23 de junio de 2023, de <https://www.navsup.navy.mil/Viper-Home/NNPO/>
- [36] *New shipping fuel standards to reduce sulphur oxides in the Mediterranean by 80%*. (2022, 16 diciembre). Mobility and Transport. Recuperado 2 de julio de 2023, de https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/new-shipping-fuel-standards-reduce-sulphur-oxides-mediterranean-80-2022-12-16_en#:~:text=The%20designation%20of%20the%20Mediterranean,of%200.5%25%20to%200.1%25.
- [37] Ni, P., Wang, X., & Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel*, 279, 118477. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118477>
- [38] Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13. (s. f.). IMO. Recuperado 9 de julio de 2023, de [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)
- [39] *Nuclear-Powered Ships | Nuclear Submarines - World Nuclear Association*. (s. f.). Recuperado 12 de junio de 2023, de <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>
-

- [40] *Ocean shipping and shipbuilding*. (s. f.). Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org/ocean/topics/ocean-shipping/>
- [41] Orbea, J. (2020). Vehículos eléctricos de hidrógeno, ¿cómo funcionan? *MOVE*. <https://movelatam.org/vehiculos-electricos-de-hidrogeno-funcionamiento-y-tendencias/#:~:text=Dentro%20de%20la%20celda%20o,electrones%20convertidos%20en%20corriente%20el%C3%A9ctrica.>
- [42] *Plug-in hybrid ship - the largest in the world!* | *Color Line*. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2023, de <https://www.colorline.com/about-us/worlds-largest-plug-in-hybrid-ship>
- [43] *Powering marine decarbonization with wind-assisted propulsion*. (s. f.). Marine & Offshore. Recuperado 4 de julio de 2023, de <https://marine-offshore.bureauveritas.com/powering-marine-decarbonization-wind-assisted-propulsion>
- [44] Prevljak, N. H., & Prevljak, N. H. (2022, 30 agosto). C-Job: Large ocean-going ships are the perfect fit for nuclear propulsion. *Offshore Energy*. Recuperado 9 de julio de 2023, de <https://www.offshore-energy.biz/c-job-large-ocean-going-ships-are-the-perfect-fit-for-nuclear-propulsion/>
- [45] *ROSATOM has started manufacturing equipment for a RITM-200 reactor plant for the fourth serial Universal Nuclear Icebreaker – Chukotka – which is to be put in operation in*. (s. f.). <https://rosatom-europe.com/press-centre/news/okbm-afrikantov-jsc-part-of-rosatom-mechanical-engineering-division-atomenergomash-has-started-manuf/>
- [46] Revol, J., Bourquin, M., Kadi, Y., Lillestol, E., De Mestral, J., & Samec, K. (2016). Thorium energy for the world. En *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26542-1>
- [47] *Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force*. (2022, 1 noviembre). IMO. Recuperado 27 de mayo de 2023, de <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/CII-and-EEXI-entry-into-force.aspx>
- [48] Ryste, J. (2019). Comparison of Alternative Marine Fuels. *DNV*, 11C8I1KZ-1. https://sea-Ing.org/wp-content/uploads/2020/04/Alternative-Marine-Fuels-Study_final_report_25.09.19.pdf
- [49] Ship Technology. (2001, 8 febrero). *Celebrity Millennium - Ship Technology*. Recuperado 28 de junio de 2023, de <https://www.ship-technology.com/projects/millennium/#:~:text=Millennium%20is%20equipped%20with%20a,engines%20on%20a%20cruise%20ship>

- [50] Ship Technology. (2021, 1 abril). *Color Hybrid Plug-In Hybrid Passenger and Car Ferry, Norway*. Recuperado 3 de julio de 2023, de <https://www.ship-technology.com/projects/color-hybrid-ferry/>
- [51] Ship Technology. (2022, 17 octubre). *AIDAnova LNG-Powered Cruise Ship - Ship Technology*. Recuperado 9 de julio de 2023, de <https://www.ship-technology.com/projects/aidanova-lng-powered-cruise-ship/>
- [52] Sun, X., Ning, J., Liang, X., Jing, G., Chen, Y., & Chen, G. (2022). Effect of direct water injection on combustion and emissions characteristics of marine diesel engines. *Fuel*, 309, 122213. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122213>
- [53] Staff, F. (2019, 2 marzo). Maersk, Navy cooperate on biofuels. *FreightWaves*. Recuperado 9 de julio de 2023, de <https://www.freightwaves.com/news/maersk-navy-cooperate-on-biofuels>
- [54] Sun, X., Ning, J., Liang, X., Jing, G., Chen, Y., & Chen, G. (2022). Effect of direct water injection on combustion and emissions characteristics of marine diesel engines. *Fuel*, 309, 122213. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122213>
- [55] *Sustainability*. (s. f.). ForSea Ferries. Recuperado 29 de mayo de 2023, de <https://www.forseafferries.com/about-forsea/sustainability/>
- [56] *Sustainable Shipping — World Shipping Council*. (s. f.). World Shipping Council. Recuperado 18 de mayo de 2023, de <https://www.worldshipping.org/sustainable-shipping>
- [57] Tamim, B. (2023, 2 abril). «MF Hydra»: World's first liquid hydrogen-powered ferry gets operational. *Interesting Engineering*. Recuperado 24 de junio de 2023, de <https://interestingengineering.com/transportation/mf-hydra-worlds-first-liquid-hydrogen-powered-ferry>
- [58] The climate implications of using LNG as a marine fuel. (2020). *INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION*. https://theicct.org/sites/default/files/publications/LNG%20as%20marine%20fuel,%20working%20paper-02_FINAL_20200416.pdf
- [59] *Thorium's Long-Term Potential in Nuclear Energy: New IAEA Analysis*. (s. f.). IAEA. Recuperado 9 de julio de 2023, de <https://www.iaea.org/newscenter/news/thorium-long-term-potential-in-nuclear-energy-new-iaea-analysis>
- [60] *Under Way on Wind Power: Sail-Assisted Ships | Proceedings - November 2019 Vol. 145/11/1,401*. (2019, 31 octubre). U.S. Naval Institute. Recuperado 6 de julio de 2023, de <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2019/november/under-way-wind-power-sail-assisted-ships>

- [61] Wang, Y., & Wright, L. A. (2021). A Comparative Review of Alternative Fuels for the Maritime Sector: Economic, Technology, and Policy Challenges for Clean Energy Implementation. *World*, 2(4), 456-481.
<https://doi.org/10.3390/world2040029>
- [62] Van Der Kolk, N. (2019). *Case study: Wind-assisted ship propulsion performance prediction, routing, and Economic Modelling*. TU Delft Research Portal.
<https://research.tudelft.nl/en/publications/case-study-wind-assisted-ship-propulsion-performance-prediction-r>
- [63] World Maritime News & World Maritime News. (2011, 12 diciembre). Maersk, US Navy Test Algae-based Biofuel on Container Ship Maersk Kalmar. *Offshore Energy*. Recuperado 9 de julio de 2023, de <https://www.offshore-energy.biz/maersk-us-navy-tests-algae-based-biofuel-on-container-ship-maersk-kalmar/>
- [64] *World's Largest Cruise Ship Wonder of the Seas Delivered to Royal Caribbean*. (s. f.). MarineLink. Recuperado 3 de julio de 2023, de <https://www.marinelink.com/news/worlds-largest-cruise-ship-wonder-seas-493893>
- [65] *Ледокол «Арктика» готов на 60%*. (s. f.). <https://www.ruselprom.ru/about/press-tsentr/novosti/ledokol-arktika-gotov-na-60/>
- [66] *Электродвигатели «Русэлпрома» погружены на ледокол «Сибирь»*. (s. f.). <https://www.ruselprom.ru/about/press-tsentr/novosti/elektrodvigateli-ruselproma-pogruzheny-na-ledokol-sibir/>

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 – Sistema de propulsión e-Drive de la marca Rolls-Royce - https://www.mtu-solutions.com/au/en/applications/commercial-marine/system-solutions/propulsion-systems.html _____	- 16 -
Ilustración 2 – Mapa de zonas ECA a nivel global – http://ingmaritima.blogspot.com/2017/06/zonas-eca.html _____	- 18 -
Ilustración 3 - Ejemplo de sistema de propulsión 100% eléctrico - https://twindisc.com/goelectric/marine/full-electric-single-electric-motor-with-energy-storage-2/ _____	- 20 -
Ilustración 4 - Ejemplo de sistema de propulsión con pila de combustible - https://www.mtu-solutions.com/eu/en/about-us/innovation-and-technology/fuel-cells.html _____	- 23 -
Ilustración 5 – Diagrama de sistema de propulsión nuclear - https://scholar.princeton.edu/sites/default/files/sp6/files/jnmm-philippe-2014.pdf _____	- 24 -
Ilustración 6 – Crucero clase Kirov - https://paperzonevn.com/kirov-class-battlecruiser-1-700.t1263/ _____	- 25 -
Ilustración 7 – Comparativa de funcionamiento de motores 4 tiempos y 2 tiempos - https://news.kixxoil.com/choosing-motorcycle-engine-oil/ _____	- 27 -
Ilustración 8 – Ejemplo de sistema de propulsión diésel-eléctrico - https://twindisc.com/goelectric/marine/diesel-electric/ _____	- 28 -
Ilustración 9 - Ejemplo de sistema de propulsión híbrido - https://twindisc.com/goelectric/marine/serial-hybrid-single-electric-motor-with-generator-power-energy-storage/ _____	- 30 -
Ilustración 10 – Motor Diesel capaz de funcionar con biocombustibles, modelo 175D de la empresa MAN - https://www.marinelink.com/news/mans-d-highspeed-engine-biofuelready-504636 _____	- 32 -
Ilustración 11 – Turbina de gas modelo MT30 - https://www.linquip.com/device/11084/marine-gas-turbine-mt30-50-hz _____	- 33 -
Ilustración 12 – Sistema de propulsión con generadores de GNL y propulsores eléctricos - https://www.hyundai-engine.com/en/aboutus/Himsen _____	- 36 -
Ilustración 13 – Buque Yangtze River Three Gorges 1 - https://www.travelmole.com/news/worlds-largest-electric-cruise-ship-sets-sail/ _____	- 37 -
Ilustración 14 – Buque Aurora - https://www.soefart.dk/article/view/648248/forsea_vil_kobe_nye_oresundsfaerger _____	- 38 -
Ilustración 15 – Buque Three Gorges Hydrogen Boat 1 - https://www.globaltimes.cn/page/202303/1287659.shtml _____	- 39 -
Ilustración 16 – Buque MF Hydra - https://www.uib.no/en/energy/151373/mf-hydra-%E2%80%93-world%E2%80%99s-first-lh2-driven-ship-and-challenges-ahead-towards-zero-emission _____	- 40 -
Ilustración 17 – Buque N.S. Ural - https://www.cruisemapper.com/ships/NS-Ural-icebreaker-1768 _____	- 41 -
Ilustración 18 – Buque N.S. Savannah - https://newyorkship.org/history/into-the-nuclear-age/ _____	- 42 -
Ilustración 19 – Buque Wonder of the Seas - https://www.royalcaribbeanblog.com/wonder-of-the-seas _____	- 43 -

Ilustración 20 – Buque Celebrity Millennium - <https://www.thecelebritycommitment.com/ships/celebrity-millennium/> _____ - 44 -

Ilustración 21 – Buque MS Color Hybrid - <https://www.caranddriver.com/es/estilo-de-vida/a28619974/el-barco-hibrido-ya-esta-aqui-y-sus-baterias-equivalen-a-las-de-50-tesla/> _____ - 45 -

Ilustración 22 – Impresión artística del buque Saint-Malo en alta mar - <https://brittanyferriesnewsroom.com/brittany-ferries-saint-malo-will-be-the-largest-hybrid-vessel-ever-built/> - 46 -

Ilustración 23 – Buque MAERSK KALMAR - <https://www.shipspotting.com/photos/2015662> _____ - 47 -

Ilustración 24 – Buque AIDAnova - <https://reisetopia.de/kreuzfahrten/aida-cruises/aida-nova/> _____ - 48 -

Ilustración 25 – Métodos de propulsión asistida por viento más prometedores – <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2019/november/under-way-wind-power-sail-assisted-ships> - <https://www.dezeen.com/2020/10/22/wallenius-marin-oceanbird-ship-wind-design/> - <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/ECO-FLETTNER-rotor-sail-stands-the-test.html> _____ - 50 -

Ilustración 26 - La vista 3D, las líneas y la disposición general del ferry - <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/6/755> _____ - 58 -

Tablas

<i>Tabla 1 – Flota mundial categorizada por tipo de buque medido en millones de DWT.....</i>	<i>- 13 -</i>
<i>Tabla 2 – Valores de niveles</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Tabla 3 – Impacto medioambiental de los materiales y el ensamblado de las baterías</i>	<i>- 21 -</i>
<i>Tabla 4 – Reducción de emisiones atmosféricas de diferentes tecnologías.....</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Tabla 5 – Comparación de las emisiones de distintos sistemas de propulsión de remolcadores.....</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Tabla 6 – Emisiones atmosféricas de varios combustibles en fase TTP (g/MJ)</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Tabla 7 – Emisiones de CO₂ de diferentes combustibles y motores.....</i>	<i>- 35 -</i>
<i>Tabla 8 – Comparativa de emisiones de CO₂ de diferentes combustibles</i>	<i>- 54 -</i>
<i>Tabla 9 – Densidades energéticas de diferentes combustibles</i>	<i>- 55 -</i>
<i>Tabla 10 – Nivel de madurez de diferentes sistemas</i>	<i>- 56 -</i>
<i>Tabla 11 - Dimensiones del ferry costero conceptual.....</i>	<i>- 57 -</i>
<i>Tabla 12 - Escenario del viaje del ferry costero.....</i>	<i>- 58 -</i>
<i>Tabla 13 - Especificación del generador y la pila de combustible en la fase TTP</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Tabla 14 – Comparativa de emisiones de NO_x, SO_x, y CO₂ en la fase de TTP</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Tabla 15 – Emisiones GWP de los 3 sistemas combinando emisiones WTT y TTP</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Tabla 16 – Comparativa entre diferentes combustibles.....</i>	<i>- 60 -</i>

Permiso de divulgación del Trabajo Final de Grado

El alumno **Jorge Ricardo del Villar González**, autor del trabajo final de Grado titulado **“Estado Actual y Avances en Sistemas de Propulsión Marina Ecoeficientes: Desde Una Perspectiva Medioambiental”**, y tutorizado por el/los profesor/es **Javier Machado Toledo**, a través del acto de presentación de este documento de forma oficial para su evaluación, manifiesta que **PERMITE** la divulgación de este trabajo, una vez sea evaluado, y siempre con el consentimiento de su/s tutor/es, por parte de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, del Departamento de Náutica y Transporte Marítimo y de la Universidad de La Laguna, para que pueda ser consultado y referenciado por cualquier persona que así lo estime oportuno en un futuro.

Esta divulgación será realizada siempre que ambos, alumno y tutor/es del Trabajo Final de Grado, den su aprobación. Esta hoja supone el consentimiento por parte del alumno, mientras que el profesor, si así lo desea, lo hará constar en futuras reuniones, una vez finalizado el proceso de evaluación del mismo.

Nota: Este documento será obligatorio presentarlo como última hoja del documento final del TFG