

DESCARBONIZACIÓN DEL SECTOR MARÍTIMO



Imagen de: Stakeholders

Master Universitario en Gestión Náutica y Transporte Marítimo
(*Master Thesis*)

Autor

Mario Flores Rodríguez 43.369.785 L

Director

Prof. Dr. José Agustín González Almeida

Marzo 2024

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

D. **José Agustín González Almeida**, Profesor de la UD de **Ingeniería Marítima** perteneciente al Departamento de **Ingeniería Civil, Náutica y Marítima** de la Universidad de La Laguna:

Expone que:

D. **Mario Flores Rodríguez** con DNI. **43.369.785 L** han realizado bajo mi dirección el trabajo fin de máster titulado: **Descarbonización del Sector Marítimo**.

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.

Santa Cruz de Tenerife a de de

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 6253243 Código de verificación: iA0DRQga

Firmado por: José Agustín González Almeida
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 04/03/2024 08:50:58

Resumen

El trabajo aborda la complejidad inherente a la adopción de nuevos combustibles en el sector marítimo y los desafíos asociados con la descarbonización. El objetivo de este trabajo es examinar cómo la transición hacia combustibles más limpios y sostenibles representa un aspecto crítico para alcanzar los objetivos globales de reducción de emisiones de carbono. Este análisis incluye una evaluación de los combustibles emergentes, las políticas regulatorias necesarias para facilitar esta transición, y la importancia de la cooperación internacional para superar los obstáculos técnicos y económicos. La discusión se centra en encontrar soluciones viables que equilibren las demandas ambientales con las necesidades operativas y económicas del transporte marítimo.

La flota marítima mundial, clave en el comercio internacional con un 80-90% del volumen, ha crecido en número y en responsabilidad ambiental, representando el 20% de la flota pero el 85% de las emisiones de GEI del sector. Desde 1980, la demanda de bunkers marinos ha aumentado significativamente, impulsando la OMI a establecer el Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI) en 2011 para promover la eficiencia y reducir emisiones. Los buques graneleros, portacontenedores, petroleros y quimiqueros, especialmente los de gran tamaño, han visto un crecimiento acelerado, destacando la importancia de políticas para una navegación más sostenible.

Para reducir las emisiones en el sector marítimo, la estrategia principal es sustituir los combustibles fósiles por alternativas más limpias, siguiendo las regulaciones de la OMI. Esto implica la adopción de biocombustibles, biogás, metanol, amoníaco y hidrógeno, considerando aspectos como el suministro y la viabilidad económica. La OMI advierte que, sin acciones de mitigación, las emisiones podrían aumentar considerablemente para 2050. La transición hacia energías limpias y la recuperación son esenciales para el crecimiento sostenible del sector.

Escenario IRENA de 1,5°C propone limitar el calentamiento global como máximo en dicho incremento y alcanzar cero emisiones netas de CO₂ para 2050, lo que requiere una transición a energías renovables y mayor eficiencia energética. Se anticipa competencia por combustibles renovables entre diversos sectores, destacando la importancia de políticas coordinadas y colaboración intersectorial para la descarbonización marítima. La inversión en producción de energías renovables y el desarrollo de asociaciones son cruciales para cumplir con estos objetivos climáticos.

Debemos tener en cuenta que el sector marítimo internacional, que contribuye con cerca del 3% a las emisiones globales de GEI (Gas de Efecto Invernadero), enfrenta un aumento en las emisiones sin medidas de descarbonización efectivas. La OMI destaca la importancia de adoptar buques cero emisiones y combustibles renovables, como el

hidrógeno verde y el e-amoniaco, para cumplir con los objetivos climáticos globales. La transición hacia energías renovables y la implementación de políticas internacionales coordinadas son cruciales para lograr cero emisiones netas para 2050, incentivando el uso de combustibles renovables y evitando inversiones en infraestructuras obsoletas.

Abstract

The paper addresses the complexity inherent in the adoption of new fuels in the maritime sector and the challenges associated with decarbonisation. The aim of this paper is to examine how the transition to cleaner and more sustainable fuels represents a critical aspect of achieving global carbon emission reduction targets. This analysis includes an assessment of emerging fuels, the regulatory policies needed to facilitate this transition, and the importance of international cooperation to overcome technical and economic barriers. The discussion focuses on finding viable solutions that balance environmental demands with the operational and economic needs of shipping.

The global maritime fleet, key to international trade with 80-90% of the volume, has grown in number and environmental responsibility, accounting for 20% of the fleet but 85% of the sector's GHG emissions. Since 1980, demand for marine bunkers has increased significantly, prompting the IMO to establish the Energy Efficiency Design Index (EEDI) in 2011 to promote efficiency and reduce emissions. Bulk carriers, container ships, oil tankers and chemical tankers, especially large ones, have seen accelerated growth, highlighting the importance of policies for more sustainable shipping.

To reduce emissions in the maritime sector, the main strategy is to replace fossil fuels with cleaner alternatives, following IMO regulations. This involves the adoption of biofuels, biogas, methanol, ammonia and hydrogen, considering aspects such as supply and economic viability. The IMO warns that without mitigation action, emissions could increase significantly by 2050. Clean energy transition and recovery are essential for the sustainable growth of the sector.

IRENA's 1.5°C scenario proposes limiting global warming by no more than 1.5°C and achieving zero net CO₂ emissions by 2050, which requires a transition to renewable energies and greater energy efficiency. Competition for renewable fuels among various sectors is anticipated, highlighting the importance of coordinated policies and cross-sectoral collaboration for maritime decarbonization. Investment in renewable energy production and the development of partnerships are crucial to meeting these climate goals.

We should note that the international maritime sector, which contributes about 3% of global GHG emissions, faces increasing emissions without effective decarbonization measures. IMO stresses the importance of adopting zero-emission ships and renewable fuels, such as green hydrogen and e-ammonia, to meet global climate targets. The transition to renewable energy and the implementation of coordinated international policies are crucial to achieve net zero emissions by 2050, incentivizing the use of renewable fuels and avoiding investments in obsolete infrastructure.

Índice

Lista de figuras	ix
1 Introducción General	1
2 Material y Método	3
3 Generalidades económicas del sector	5
3.1 Flota marítima internacional	6
3.2 Eficiencia energética	8
3.2.1 Panorama general de la demanda de energía	8
3.2.2 Directrices de eficiencia energética	8
3.2.3 Rutas de navegación y la descarbonización	11
3.2.4 Infraestructura de bunkering	11
4 Combustible alternativos y su aplicación al sector	15
4.1 Biofuel	15
4.2 Gases licuados	17
4.3 Hidrógeno	18
4.4 Metano	19
4.5 Amoníaco	21
5 Descarbonización	25
5.1 Escenarios futuros	25
5.2 Tendencia de demanda	26
5.3 Análisis de los diferentes escenarios	26
6 Acciones hacia la descarbonización	29
7 Conclusiones	33
7.1 Español	33
7.2 Ingles	34

Bibliografía

34

Índice de Figuras

3.1	Imagen de: Revisión del transporte marítimo (2023)	6
3.2	Elaboración propia	7
3.3	Imagen de GASNAM: m ³ suministrados totales	12
3.4	Imagen de GASNAM: N ^o de operaciones bunkering GNL totales	12
4.1	Imagen artículo [6]. Evaluación final de los combustibles	23
5.1	Imagen artículo [2]. Estadísticas a partir de 2020 y posibles escenarios para la distribución de los distintos tipos de combustibles marinos en el mercado del transporte marítimo de aquí a 2050	26

1 Introducción General

Actualmente nos encontramos en una etapa crucial de transformación energética y descarbonización económica para evitar las consecuencias más extremas del cambio climático, como olas de calor, sequías e inundaciones. Esto plantea la necesidad de acelerar este proceso y pone en discusión la sostenibilidad del transporte marítimo en este nuevo contexto ambiental.

El sector del transporte marítimo, al igual que otros sectores económicos, genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y debe reducir su huella de carbono dado que alrededor del 80-90% del comercio mundial es realizado por dicho transporte, siendo este el responsable de alrededor del 3% de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero de dióxido de carbono (CO₂) a nivel global. Representando el transporte marítimo internacional alrededor del 9% de las emisiones mundiales asociadas al sector del transporte [12].

Por consiguiente es necesario actuar con urgencia para acelerar el ritmo de la descarbonización de la economía, incluido el sector del transporte marítimo, ya que es un sector estratégico de la economía mundial.

Aunque el transporte marítimo en realidad contribuye en una proporción relativamente pequeña a las emisiones de GEI por unidad de trabajo de transporte, sin nuevas medidas, las emisiones del sector seguirían aumentando. Para que el transporte marítimo logre descarbonizarse y contribuya a evitar niveles peligrosos de calentamiento global, el sector debe alcanzar cuanto antes un consenso sobre el marco regulador y las medidas de mitigación de GEI del futuro.

El transporte marítimo internacional se rige por normas y reglamentos negociados y acordados en la Organización Marítima Internacional (OMI), y actualmente se está trabajando en la OMI para desarrollar normas mundiales sobre la descarbonización del transporte marítimo que se apliquen al transporte marítimo comercial. Al mismo tiempo, las normativas regionales están influyendo en el proceso mundial, como ilustran los reglamentos adoptados a escala de la Unión Europea y aplicables a todos los buques que hacen escala en puertos europeos.

La Organización Marítima Internacional (OMI) ha establecido una serie de objetivos para la industria, como:

1.- Reducción de los gases de efecto invernadero en un 50% por debajo de los niveles de 2008 para 2050

2.- Reducción de la intensidad de carbono de las emisiones en un 40% para 2030 y en un 70% para 2040 y llegar a 2050 con unas emisiones de GEI netas nulas, todo ello tomando como referencia los niveles del 2008 [11].

Sin embargo, estos objetivos no son por el momento legalmente vinculantes [3].

En la actualidad, alrededor del 99% de la demanda energética del sector del transporte marítimo internacional es de combustibles fósiles, si no se toman medidas, la OMI ha alertado de que las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al sector del transporte marítimo podrían crecer entre un 50% y un 250% para 2050 en comparación con los niveles de emisión de hace una década, sin contar con los que quedan fuera de los marcos nacionales de contabilidad lo que hace evidente el nivel de incertidumbre en cuanto a la evolución del sector en los próximos 30 años, siendo incluso el mejor escenario de emisiones una gran preocupación en términos de calentamiento global.

Conociendo estas preocupaciones, este trabajo aborda el camino que toma el sector marítimo hacia la descarbonización, cuyo objetivo principal es alcanzar una vía hacia el ambicioso Acuerdo de París (CMNUCC, 2015), que incluye "proseguir los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales", y acercar las emisiones de CO₂ a cero para mediados de siglo. Por ello, analizaremos la dinámica del mercado del sector del transporte marítimo y las últimas tendencias comercio, la demanda energética asociada y las emisiones de carbono.

2 Material y Método

El presente trabajo, de naturaleza documental, se ha basado en la revisión exhaustiva de un amplio espectro de fuentes bibliográficas. Las herramientas digitales, en particular, han sido indispensables para la realización de este trabajo. Las búsquedas bibliográficas se llevaron a cabo principalmente a través de navegadores comerciales reconocidos, como Google Chrome y Firefox. Estos navegadores se han preferido debido a su eficiencia y velocidad, facilitando el acceso a una vasta cantidad de información de manera rápida y efectiva. Además, el uso de un dispositivo personal de alto rendimiento ha permitido manejar de manera óptima los recursos en línea y las herramientas digitales involucradas en el proceso de investigación.

En lo que respecta al software utilizado para la preparación del documento final, se ha hecho un uso extensivo de diversas aplicaciones pertenecientes al paquete de Microsoft Office. Microsoft Word, por ejemplo, ha sido la herramienta predilecta para la redacción y organización del texto, permitiendo un manejo eficiente de los contenidos. Por otro lado, para el tratamiento y edición de imágenes, se han empleado programas de renombre como Adobe Acrobat y Adobe Photoshop. Estas aplicaciones no solo han facilitado la inserción de material gráfico de calidad en el trabajo/documento, sino que también han permitido realizar ajustes precisos y mejoras visuales, contribuyendo significativamente a la claridad y el impacto visual del trabajo presentado.

Este enfoque integrador, que combina métodos de investigación tradicionales con herramientas digitales avanzadas, ha permitido abordar el tema de estudio de una manera exhaustiva y actualizada. La capacidad para acceder a una amplia gama de recursos bibliográficos y la eficacia en la gestión de la información recopilada han sido aspectos clave para el desarrollo de una investigación coherente, rica en contenido y adaptada a los estándares académicos contemporáneos.

3 Generalidades económicas del sector

Entre el 80% y el 90% del comercio internacional se realiza a través de medios marítimos, es decir, buques graneleros, portacontenedores, petroleros y quimiqueros. En conjunto, este tipo de buques representan el 20% de la flota mundial y son responsables del 85% de las emisiones netas de GEI asociadas al sector marítimo. Así pues la evolución histórica del PIB mundial y los volúmenes comerciales de bienes tienden a analizarse para estimar la intensidad del nexo entre el crecimiento económico, el comercio marítimo y las necesidades energéticas posteriores [10].

Desde el año 2000, el PIB mundial ha crecido a una tasa promedio de alrededor del 3%, sin embargo, debido a la crisis financiera del año 2008, la tasa de crecimiento cayó significativamente al -1,5% durante dos años consecutivos hasta que finalmente se recuperó.

Si analizamos un período más cercano, del 2017 a 2019, se observa una desaceleración de la economía global con una tasa de crecimiento anual del PIB que varía del 3,1% (2017) al 3,0% (2018) y al 2,9% (2019). Durante el mismo período, la desaceleración económica también fue evidente en la producción industrial mundial, así como el de los servicios de transporte marítimo, que registró una caída al 3,1% entre 2017 y 2018 y por consiguiente el decrecimiento del comercio mundial de mercancías (importaciones y exportaciones).

A los factores antes mencionados, hay que añadir las restricciones a las importaciones y los aumentos arancelarios que afectan a los países del norte de África y Asia occidental que también se han identificado como factores de desaceleración del comercio marítimo en los últimos años, siendo la pandemia de **COVID-19** la más influyente en esta desaceleración siendo según la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo una caída general del 4,1% en el transporte y el comercio marítimos a finales de 2020.

Para 2019 en adelante, antes de la crisis del COVID, el Fondo Monetario Internacional (FMI) había proyectado que entre 2019 y 2024 el PIB global crecería a una tasa promedio del 3,6%. Sin embargo, desde que comenzó la pandemia y se adoptaron en todo el mundo las medidas sanitarias necesarias (aislamiento, confinamientos y cierres generalizados), la economía mundial se ha hundido notablemente. De hecho, el FMI indicó que en 2020 la economía mundial se contrajo un -3,3%, una caída mucho peor que el de la crisis financiera de 2008-2009.

La recuperación económica post-2008 y COVID-19 mostró una incertidumbre sobre la economía mundial, pero el transporte marítimo logró recuperarse con un cre-

cimiento anual del 3.2% gracias al apoyo gubernamental. A pesar de una contracción del 0.4% en 2022 alcanzando los 12.027 millones de toneladas de mercancías, por debajo de los 12.072 millones de toneladas de 2021 y un crecimiento del 2.4% en 2023, el sector sigue siendo vital, representando más del 80% del comercio mundial y cerca del 3% de las emisiones de GEI, con un aumento del 20% en una década. La transición a combustibles renovables y la eficiencia energética son cruciales para la descarbonización, estimada en un costo anual de entre 8.000 y 28.000 millones de dólares hasta 2050.

Varios factores influyeron en el débil crecimiento de los flujos comerciales marítimos en 2022. El menor crecimiento económico mundial, la elevada inflación que afectó al gasto de los consumidores, las perturbaciones causadas por la guerra en Ucrania y las estrictas medidas de contención del COVID-19 que afectaron a los resultados económicos y comerciales de China tuvieron una especial repercusión. Pero la UNCTAD prevé un crecimiento continuado, aunque moderado, del volumen del comercio marítimo [figura 3.1](#) a medio plazo (2024-2028).

International maritime trade development forecast, 2024–2028 (Annual percentage change)

Year	Total seaborne trade	Containerized trade
2024	2.1	3.2
2025	2.2	3.2
2026	2.2	3.2
2027	2.1	3.0
2028	2.1	2.9

Figura 3.1: Imagen de: Revisión del transporte marítimo (2023)

3.1 Flota marítima internacional

La flota marítima mundial está compuesta por 105.493 buques [10]. Entre 2013 y 2018, el número total de buques aumentó a una tasa de crecimiento anual promedio "Average Annual Growth Rate" (a.a.g.r.) del 2,49% y un 3,2% desde 2018 hasta la actualidad. Sin embargo, los datos muestran que los buques cisterna, graneleros y portacontenedores son los segmentos de la flota que crecen más rápidamente. De hecho, en muchos casos la flota mundial de estos buques creció a una tasa media superior al 25%, comprendiendo principalmente buques categorizados como buques VLS.

A pesar de que existen un número mayor de buques pequeños y medianos, las categorías LS y VLS, que incluyen graneleros, portacontenedores, petroleros y químiqueros,

manejan el 82% del peso de carga mundial. Esto indica que el consumo de combustible está más ligado a la cantidad de carga que al número de buques. Por tanto, la descarbonización debe enfocarse en estos tipos de buques, ya que seis categorías específicas son responsables del 85% del consumo energético en el transporte marítimo internacional [figura 3.2](#), según el estudio de la OMI.

Energy consumption for international shipping

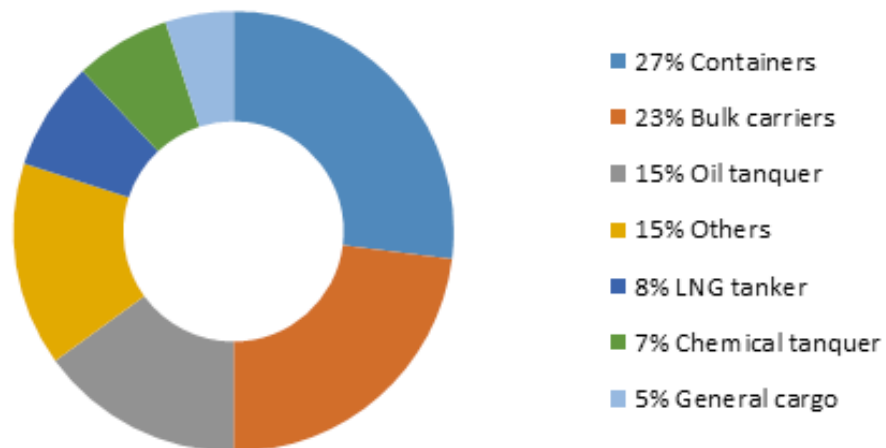


Figura 3.2: Elaboración propia

La construcción de barcos más grandes se motiva por la economía de escala, ya que requieren menos energía por cantidad de carga transportada, mejorando la eficiencia y maximizando ganancias para fabricantes y propietarios. La edad promedio de la flota indica la urgencia en desarrollar alternativas sostenibles de transporte marítimo, apuntando hacia buques de cero emisiones. Con una vida útil técnica de 25 a 30 años, se prevé reemplazar ciertos tipos de buques para 2030, necesitando que los primeros modelos con combustibles renovables se lancen antes.

Entre 2005 y 2018, el número de buques operativos creció un promedio anual del 3.3%, con un aumento total del 50%. Este crecimiento se notó especialmente en graneleros, portacontenedores, petroleros y químicos. Los segmentos de SS (Small ship) y MS (medium ship) crecieron a un ritmo más lento en comparación con los LS (large ship) y VLS (very large ship), que experimentaron los aumentos más significativos. La antigüedad promedio de las flotas de SS y MS es mayor que la de LS y VLS. De seguir esta tendencia, se podría triplicar el número de barcos para 2050, siendo los LS y VLS los que más aumentarían.

Aunque los LS y VLS conforman solo el 20% de la flota mundial, generan alrededor del 85% de las emisiones de GEI del sector marítimo. La mezcla de combustibles en 2018 estaba dominada por HFO (79%), seguido por MDO (16%), GNL (4%) y una mínima parte de metanol. La descarbonización se enfoca especialmente en estos buques, cruciales en el transporte marítimo internacional.

3.2 Eficiencia energética

3.2.1 Panorama general de la demanda de energía

Desde la década de 1980, la demanda de bunkers marinos, esenciales para el sector naviero, ha crecido significativamente. En particular, entre 2005 y 2018, la demanda global de este combustible aumentó en más del 25%, con un crecimiento medio anual de 1,77% durante este periodo. Este aumento está directamente relacionado con el papel crítico del transporte marítimo, que facilita entre el 80% y el 90% del comercio mundial, vinculando estrechamente la demanda de energía del sector con el volumen de comercio global y el crecimiento del PIB.

Factores como el PIB global, el comercio y la actividad manufacturera han sido determinantes en la demanda de energía del transporte marítimo internacional. Aunque la adopción de medidas de eficiencia energética (EE) puede reducir la dependencia entre estos factores, la importancia del transporte marítimo en la economía global limita el impacto de la EE. Sin embargo, las energías renovables emergen como elementos clave para la descarbonización del sector hacia mediados del siglo.

El análisis del desempeño energético del sector muestra que, idealmente, debería reducirse la demanda de energía mientras aumenta el volumen comercializado. No obstante, históricamente se ha observado lo contrario: el incremento en el comercio ha llevado a un mayor uso de energía. A pesar de que los índices energéticos muestran una mayor eficiencia, esta mejora ha sido impulsada en gran parte por los altos precios del petróleo y sus derivados.

Los eventos económicos y geopolíticos, como la crisis financiera de 2008-2009 y la Primavera Árabe, han influido en el precio del petróleo, afectando la gestión energética del sector. Los precios bajos del petróleo resultan en una menor atención hacia el uso eficiente de la energía, mientras que los altos precios promueven una gestión más eficiente y la adopción de prácticas como la navegación lenta.

3.2.2 Directrices de eficiencia energética

Para abordar el problema de la demanda energética, la OMI ha desarrollado cuatro directrices centradas en mejorar la eficiencia energética en todos los buques: I) EEDI (Índice de diseño de eficiencia energética); II) SEEMP (Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Buque); III) EEXI (Índice de Eficiencia Energética de Buques Existentes); IV) EEOI (Indicador Operacional de Eficiencia Energética); y V) CII (Indicador de Intensidad de Carbono). A continuación, vamos a proporcionar detalles sobre estas directrices [1].

En 2011, la Organización Marítima Internacional (OMI) estableció el Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI) a través de las enmiendas en el Anexo VI del Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por los Buques (MARPOL), especificadas en la resolución MEPC.203(62). Este índice busca fomentar el uso de motores y equipos más eficientes a bordo de los buques para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), estableciendo un mínimo de eficiencia energética (EE) que varía según el tamaño y tipo de buque. El EEDI se mide en gramos de CO₂ por tonelada-milla [8].

I).Fases de Implementación del EEDI

La Organización Marítima Internacional (OMI) implementó el Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI) en 2011 para fomentar el uso de tecnologías más eficientes en los buques y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en línea con las enmiendas del Anexo VI del Convenio MARPOL. Este índice, que mide la eficiencia energética de los buques en gramos de CO₂ por tonelada-milla, varía según el tamaño y tipo de buque. El EEDI se aplica en fases progresivas, comenzando con una reducción del 10% en los niveles de CO₂ y aumentando cada cinco años para alcanzar una reducción del 30% para 2025, en comparación con los buques construidos entre 2000 y 2010.

Las fases del EEDI son:

Fase 0 (2013-2014): Incentivo inicial para implementar medidas de eficiencia energética.

Fase 1 (2015-2019): Requiere una reducción de CO₂ del 10% para cargueros y del 5% para buques de pasajeros.

Fase 2 (2020-2024): Exige una reducción de CO₂ del 20% o 15% según el tipo de buque, con una meta del 20% para los grandes cargueros.

Fase 3 (a partir de 2025): Obliga a una reducción del 30% en todos los tipos de buques.

El sistema basado en el desempeño del EEDI deja en manos de los diseñadores y constructores de buques la elección de tecnologías para alcanzar las metas de eficiencia energética, promoviendo así la innovación continua en el sector.

II) SEEMP Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Buque.

El Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Buque (SEEMP) fue introducido en 2013 junto al EEDI por la Organización Marítima Internacional (OMI) como una estrategia operativa para mejorar la eficiencia energética de los buques de manera económica. Obligatorio para todos los buques de más de 400 toneladas de arqueo bruto, el SEEMP establece un enfoque sistemático y personalizado para gestionar la eficiencia energética a bordo, abarcando la planificación, implementación, seguimiento, y mejora continua. Este proceso cíclico de cuatro etapas es esencial para optimizar el rendimiento energético de los buques, facilitando así las decisiones de mejora por parte de propietarios y administradores de flotas. La implementación efectiva del SEEMP es clave para la gestión energética sostenible en el sector marítimo.

III) EEXI (Índice de Eficiencia Energética de Buques Existentes).

En 2019, Japón propuso a la Organización Marítima Internacional (OMI) la implementación del Índice de Eficiencia Energética para Buques Existentes (EEXI), una medida para mejorar la eficiencia energética (EE) de los buques en servicio. Durante una reunión en febrero de 2020, se elaboró una directriz para integrar el EEXI en el Anexo VI de MARPOL, con la OMI planeando su incorporación para 2023. El EEXI establece un estándar de EE que los buques deben alcanzar, basado en un porcentaje específico de reducción en comparación con una línea base del Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI). Este índice es obligatorio para todos los buques de más de 400 toneladas de arqueo bruto y sirve como una ampliación del EEDI, dirigida a mejorar la sostenibilidad de la flota marítima existente.

IV) EEOI Indicador Operacional de Eficiencia Energética.

El Indicador Operativo de Eficiencia Energética (EEOI) es una herramienta clave, introducida en 2013, para evaluar y mejorar la eficiencia energética de los buques a lo largo del tiempo. Parte fundamental del seguimiento del Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Buque (SEEMP), el EEOI permite a los operadores medir la eficiencia del combustible y el impacto de diversas operaciones en la eficiencia energética, como la optimización de rutas o el mantenimiento de las hélices. A diferencia del mandatorio Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI), el EEOI es voluntario y personalizado para cada buque, reflejando la variabilidad en capacidades y estrategias de eficiencia. Se mide en CO₂ emitido por tonelada-milla, similar al EEDI, ofreciendo una forma directa para que los propietarios y operadores monitoreen y mejoren el rendimiento energético de sus flotas.

V) CII Indicador de Intensidad de Carbono.

Desde 2023, siguiendo la decisión del MEPC 76 de la OMI en junio de 2021, el Indicador de Intensidad de Carbono (CII) aplicará a todos los buques de carga, Ro-Pax y cruceros con más de 5000 GT, midiendo las emisiones de CO₂ por milla de peso muerto. Los buques serán clasificados anualmente de A a E, con umbrales de clasificación que se endurecerán gradualmente hasta 2030 para fomentar mejoras continuas en las emisiones de CO₂. Los objetivos establecen una reducción del 1% anual en la intensidad de carbono de 2020 a 2022, aumentando a una reducción del 2% anual de 2023 a 2026. Las metas para 2027-2030 se revisaron en 2023, manteniendo el compromiso con la eficiencia energética y la sostenibilidad en el sector marítimo.

Resumen:

Desde la introducción del EEDI, SEEMP y EEOI en 2013, la eficiencia energética y la intensidad de carbono en la navegación internacional han mejorado significativamente. La intensidad energética se redujo un 14,5% de 2012 a 2018, mientras que la intensidad de carbono bajó de 9,8 a 8,39 gCO₂/tonelada-km en el mismo período. Sin embargo, fluctuaciones en los precios de los combustibles fósiles han influido históricamente en el rendimiento de eficiencia energética del sector. La implementación de mecanismos de cumplimiento para las directrices de eficiencia energética es crucial.

Para alinearse con los estándares del EEDI, los nuevos diseños de buques incorporan medidas de eficiencia energética que abarcan desde la estructura hasta la propulsión y el uso de energías alternativas. La OMI continúa promoviendo la descarbonización del sector marítimo, adaptándose a las tecnologías emergentes. Tanto el EEDI, que se enfoca en la fase de diseño, como el SEEMP y el EEOI, que monitorean las operaciones, son herramientas clave para avanzar hacia un sector marítimo más verde y eficiente.

Mejoras en la Gestión del Diseño del Viaje:

Llegada Justo a Tiempo (JIT): Optimización de la velocidad para garantizar el atraque o servicio puntual.

Optimización de la Velocidad del Barco: Ajuste de velocidad para conservar combustible, aplicable tanto a buques nuevos como existentes.

Ruta Meteorológica: Planificación de rutas considerando las condiciones climáticas para asegurar viajes seguros y llegadas precisas.

Mejoras en el Piloto Automático: Uso de software avanzado para decisiones eficientes en el manejo del timón.

Optimización de Trimado, Calado y Lastre: Ajustes en la configuración del buque para maximizar la eficiencia de combustible y energía.

Sistemas para la Gestión de la Energía:

Reducir la Demanda de Energía a Bordo: Minimización del consumo energético de maquinaria y equipos.

Informes de Calidad y Consumo de Combustible: Sistemas de seguimiento para optimizar la logística de combustible y gestión de costos.

Medidas de Mantenimiento del Buque:

Gestión de Rugosidad del Casco: Técnicas para reducir la fricción y el consumo energético mediante el mantenimiento del casco.

Gestión de Rugosidad de la Hélice: Mantenimiento de hélices para prevenir pérdidas de eficiencia por corrosión o incrustaciones.

3.2.3 Rutas de navegación y la descarbonización

Para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte marítimo, es crucial enfocarse en mejorar la cadena de suministro y la infraestructura logística. La Organización Europea de Puertos Marítimos (2018) identifica 12 tipos de infraestructura portuaria clave, divididos en infraestructura de terminales y equipamiento operativo [5].

La descarbonización de puertos importantes puede reducir significativamente las emisiones de CO₂ del transporte marítimo. La ubicación de los puertos y las rutas marítimas son esenciales para optimizar el comercio global, considerando los límites geográficos. Las rutas marítimas clave incluyen el Canal de Panamá, que conecta los océanos Atlántico y Pacífico; el Canal de Suez en Egipto, que enlaza el Mediterráneo con el Golfo de Suez, facilitando una ruta directa entre Europa y Asia; y el estrecho de Malaca, crucial para el comercio entre el océano Índico y el Pacífico, beneficiando especialmente a las naciones insulares del Pacífico y el comercio desde Oriente Medio.

3.2.4 Infraestructura de bunkering

El bunkering, almacenamiento y reabastecimiento de combustible, es crucial en la infraestructura portuaria, con Singapur, Fujairah y Rotterdam liderando a nivel mundial. Los combustibles principales son HFO, MGO y VLSFO, con un cambio de HFO a VLSFO en 2020 debido a las regulaciones de la OMI sobre el azufre. Se están explorando alternativas como biocombustibles y hidrógeno para reducir las emisiones de CO₂ y GEI. El GNL, aunque popular, presenta retos como el almacenamiento criogénico y el deslizamiento de metano, limitando su capacidad para descarbonizar profundamente el sector.

185 puertos de todo el mundo pueden abastecerse de GNL [9], especialmente en Europa y Asia, pero la expansión de esta infraestructura enfrenta desafíos significativos. La descarbonización requiere enfocarse en ubicaciones estratégicas, incluidos

puertos comerciales clave y rutas de navegación. El acceso a combustibles renovables y el cumplimiento de las directrices de eficiencia energética son fundamentales.

En 2021, España consolidó su liderazgo en el bunkering de gas natural licuado (GNL), evidenciando un notable crecimiento en este sector. El total de operaciones de abastecimiento experimentó un ascenso significativo, alcanzando las 943 [figura 3.3](#), lo que representa un incremento del 27% en comparación con las 741 operaciones registradas en 2020.

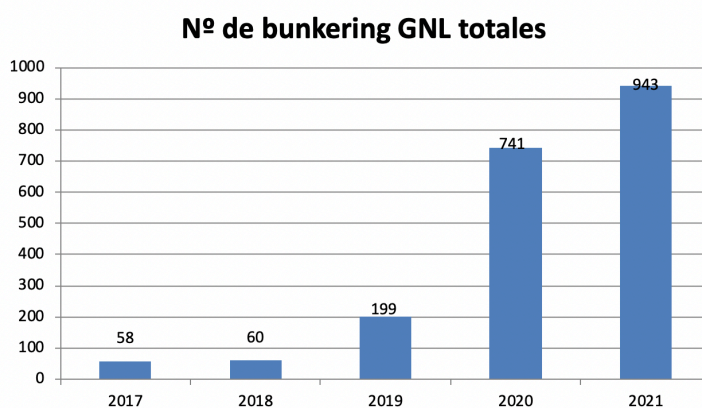


Figura 3.3: Imagen de GASNAM: m³ suministrados totales

Durante el año, se distribuyeron 142.523 m³ de GNL [figura 3.4](#). De este total, el 64,87% se entregó mediante camiones cisterna, el 34,13% a través de buques de suministro, y el 1% restante provino de terminales de regasificación.

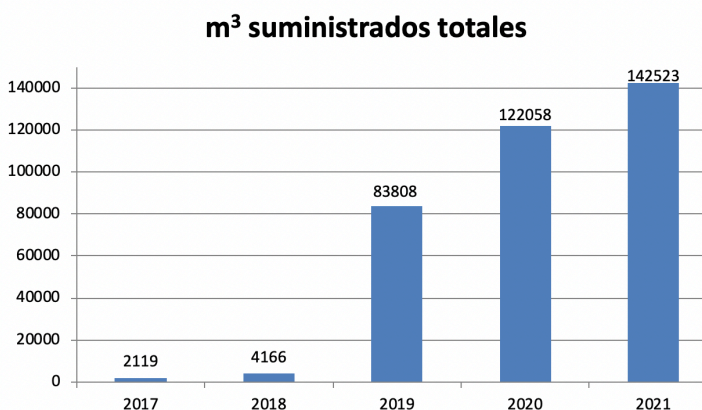


Figura 3.4: Imagen de GASNAM: Nº de operaciones bunkering GNL totales

Además, se observó una expansión en la red de puertos capacitados para realizar operaciones de bunkering. En 2021, se ofreció GNL como combustible en una diversidad de puertos, incluyendo Algeciras, Almería, Barcelona, Bilbao, Cádiz, Cartagena, Denia, Ferrol, Gibraltar, Gijón, Huelva, Málaga, Motril, Tenerife, Valencia y Viana do Castelo, marcando el debut en la provisión de GNL en Cádiz, Gijón y Motril.

Destacaron especialmente los puertos de Barcelona y Valencia por su actividad en este ámbito, con 230 operaciones y 60.951 m³ suministrados, y 240 operaciones y

27.174 m³ suministrados, respectivamente, liderando tanto en número de operaciones como en volumen de GNL distribuido [4].

La descarbonización también implica reconocer oportunidades en puertos, como el planchado en frío con electricidad renovable. Aunque la infraestructura para esto aún no es amplia, se espera su desarrollo. Las emisiones de los buques portuarios, consideradas como navegación nacional, podrían estar sujetas a regulaciones más estrictas.

La elección de combustibles renovables debe considerar factores como la densidad energética y la viabilidad económica. El amoníaco y el metanol son opciones, cada una con sus propias ventajas y desafíos. La transición energética en el transporte marítimo implica un análisis detallado de estas alternativas y el desarrollo de infraestructuras compatibles.

4 Combustible alternativos y su aplicación al sector

El enfoque principal para reducir las emisiones en el sector marítimo es reemplazar los combustibles fósiles actuales (MGO, GNL y LSFO) por alternativas más limpias, en conformidad con las regulaciones de la OMI. A pesar de que estos combustibles cumplen con los límites de azufre, siguen siendo grandes emisores de CO₂. Para cumplir con el objetivo de la OMI de reducir las emisiones de CO₂ en un 50% para 2050, es necesario adoptar combustibles renovables como el biocombustible, biogás, metanol, amoníaco y hidrógeno. La selección de estos combustibles depende de varios factores, incluidos el suministro, la tecnología del motor, el impacto ambiental y la viabilidad económica, siendo los costos de producción y disponibilidad determinantes.

Los aspectos como la densidad energética y la temperatura de almacenamiento afectan la viabilidad económica y la logística de los combustibles renovables. Por ejemplo, el amoníaco necesita más espacio de almacenamiento comparado con el MGO y el GNL debido a su menor densidad energética, mientras que el metanol se almacena a temperatura ambiente, lo que simplifica su manejo en comparación con el GNL, que requiere condiciones criogénicas. Cada combustible tiene pros y contras en términos de logística, infraestructura y seguridad, lo que influye en la elección de la opción más adecuada para cada tipo y tamaño de buque. La transición hacia combustibles renovables implica considerar estos factores para asegurar una implementación efectiva y sostenible en el sector marítimo [7].

4.1 Biofuel

Existen dos métodos principales para utilizar biocombustibles líquidos en el sector marítimo: el primero implica mezclar biocombustibles de primera generación con combustibles fósiles para reducir parcialmente las emisiones, aunque este enfoque puede presentar desafíos de sostenibilidad, como la seguridad alimentaria y el uso de la tierra. El segundo método se centra en los biocombustibles de segunda generación, que reemplazan a los combustibles convencionales y ofrecen reducciones significativas de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo preferibles debido a su menor impacto ambiental y su potencial de reducción de GEI del 70-100% en comparación con el MGO. Entre los biocombustibles líquidos más prometedores se encuentran el biodiésel FAME, HVO, diésel Fischer-Tropsch, DME y biometanol, destacados por su eficiencia en términos de emisiones de GEI a lo largo de su ciclo de vida. La selección

de materias primas y procesos de producción adecuados es crucial para maximizar los beneficios ambientales de estos combustibles.

Preparación tecnológica del combustible y el motor

El biodiésel FAME es popular por sus propiedades similares al diésel fósil, producido a partir de aceites y grasas reciclados, incluidos los residuos alimentarios y semillas como la colza y palma. Mezclas de hasta un 20% de FAME con diésel fósil se pueden usar sin modificar los motores de los buques, aunque se requieren aditivos para evitar problemas como el crecimiento bacteriano. La tecnología de motores 100% metanol está probada, permitiendo a nuevos buques operar enteramente con biocombustibles.

El HVO, al igual que el FAME, puede usarse sin modificaciones en el motor. Aunque su producción a partir de aceites vegetales vírgenes plantea preocupaciones de emisiones de ciclo de vida, los residuos son una materia prima preferible. A diferencia del FAME, el HVO tiene un mayor potencial de reemplazo total del fuelóleo pesado, aunque su uso práctico es aún limitado.

El diésel FT, producido a partir de biomasa lignocelulósica no alimentaria, presenta un potencial a largo plazo por su disponibilidad y compatibilidad con motores actuales como combustible drop-in. Sin embargo, su tecnología de producción compleja limita su implementación práctica.

El DME, obtenido a partir de gasificación de biomasa o reformado de biometano, requiere modificaciones específicas en los buques por su bajo punto de inflamación. Aunque se ha experimentado con mezclas de hasta un 40%, su uso comercial es aún inexistente debido al estado de desarrollo de la tecnología.

Escalabilidad e infraestructura.

La información comercial sobre biocombustibles de segunda generación es escasa, lo que restringe las proyecciones de su escalabilidad y balance oferta/demanda, especialmente para FAME. No obstante, su infraestructura puede adaptarse de la existente para HFO, facilitando una transición económica. Sin embargo, la competencia por biocombustibles entre varios sectores podría limitar la disponibilidad para el transporte marítimo debido a la demanda de descarbonización y la limitada producción de FOG. Se prevé que la producción global de HVO alcance entre 6 y 7 millones de toneladas para 2020, con un potencial de 12 millones de toneladas anuales en la UE.

El HVO enfrenta desafíos de infraestructura para satisfacer la demanda marítima. El diésel FT, usando materias primas no alimentarias, emerge como una alternativa futura, aunque el uso de gas natural comprometería sus beneficios de reducción de carbono. El DME, que puede reemplazar al propano en GLP, aprovecha la infraestructura existente para su distribución.

Características del combustible y otras consideraciones clave.

En términos de características del combustible, el FAME ofrece un 90% de la densidad energética del diésel fósil, siendo preferible su derivación de FOG a semillas oleaginosas por el impacto del cambio indirecto de uso de la tierra. El HVO, con menores emisiones de NOx que el biodiésel FAME y una densidad energética ligeramente superior, junto con el diésel FT, representa opciones de combustible con menores emisiones de carbono. El DME, producido a partir de biomasa lignocelulósica en vez de

gas natural, emerge como un candidato para el sector marítimo debido a su potencial para reducir emisiones de GEI.

4.2 Gases licuados

Las principales formas de combustibles gaseosos renovables para buques incluyen biogás comprimido (CBG), biogás licuado (LBG) y metano sintético, con un creciente interés en el GNL debido a su disponibilidad. Para cumplir con los objetivos globales de descarbonización y reducir significativamente las emisiones de CO₂, la incorporación de LBG y otros combustibles gaseosos renovables es crucial en el sector marítimo. Estos combustibles se producen transformando biogás en biometano, que luego se licua o comprime para obtener LBG y CBG. El biogás se genera principalmente mediante digestión anaerobia de residuos y biomasa agrícola y ganadera, que después de ser purificado y licuado, puede mezclarse con GNL para disminuir las emisiones de GEI. Además, la producción de metano a partir de CO₂ mediante hidrogenación presenta una alternativa que prescinde de la biomasa como materia prima.

Preparación tecnológica del combustible y el motor.

El biogás comprimido (CBG) y el biogás licuado (LBG) son combustibles renovables compuestos principalmente por metano (97%). El CBG se obtiene comprimiendo biometano a 200 bares, siendo compatible con los sistemas de distribución de GNL sin necesidad de modificaciones, y puede mezclarse con gas natural comprimido (GNC). El LBG se produce enfriando biometano a -162°C para licuarlo, permitiendo a los buques que usan GNL cambiar a LBG sin ajustes en los sistemas de motor y combustible. Ambos se derivan del biogás generado por la digestión anaeróbica de materia orgánica, como residuos alimentarios, con una tecnología madura pero limitada por su escalabilidad. La metanación, que transforma CO₂ y CO en metano mediante hidrogenación, ofrece un método adicional para producir combustibles marítimos alternativos, incluyendo metano sintético como opción "drop-in". Aunque esta tecnología muestra potencial, aún se encuentra en etapas experimentales iniciales.

Escalabilidad e infraestructura.

El CBG es adecuado para vehículos de transporte terrestre y embarcaciones que cubren distancias cortas debido a sus requisitos de almacenamiento voluminosos y la necesidad de repostar con frecuencia. Su uso es limitado en la navegación de larga distancia. La expansión del LBG en la industria marítima enfrenta obstáculos por la falta de infraestructura de repostaje, aunque Suecia lidera en producción de LBG, con servicios de repostaje en el puerto de Gotemburgo. ESL Shipping ha incorporado el primer granelero seco impulsado por LBG 100% renovable. Sin embargo, la disponibilidad limitada de materia prima orgánica y los altos costos de transporte de estos combustibles disminuyen su viabilidad económica para el sector marítimo, siendo más rentable su uso en calefacción urbana.

El proceso de metanación, que no depende de biomasa sino de CO₂, ofrece una mayor escalabilidad, pero su aplicación práctica se ve limitada por la baja madurez tecnológica y la dependencia de CO₂ como materia prima. Por lo tanto, tanto el CBG

como el LBG tienen un potencial restringido en el transporte marítimo internacional, aunque pueden ser útiles en aplicaciones específicas. La metanización también enfrenta desafíos de escalabilidad debido a la necesidad de CO₂.

Características del combustible y otras consideraciones clave.

El biogás comprimido (CBG) actúa como alternativa al gas natural comprimido (GNC), ofreciendo un ciclo de vida con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y nulas emisiones de azufre. Sin embargo, su densidad energética es de 7,2 GJ/m³, notablemente inferior a la del MGO convencional que posee 36,6 GJ/m³. Con la industria inclinándose hacia el gas natural licuado (GNL) en lugar del fuelóleo pesado (HFO), el biogás licuado (LBG) emerge como una opción superior para la descarbonización naviera, reduciendo significativamente las emisiones de GEI. El LBG presenta una densidad energética de 21,2 GJ/m³, mientras que el metano licuado alcanza los 23 GJ/m³, siendo este último el más denso energéticamente entre los combustibles gaseosos, lo que los hace adecuados para el transporte marítimo de larga distancia. La implementación de tecnologías como la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS) podría reducir aún más las emisiones de estos combustibles renovables.

4.3 Hidrógeno

El hidrógeno (H₂) emerge como una opción prometedora de combustible alternativo para el sector marítimo, alineado con los objetivos de reducción de emisiones de la OMI. El H₂ puede ser utilizado mediante células de combustible (FC) o motores de combustión interna (ICE). Actualmente, se aplica en el transporte público, como los autobuses de dos pisos impulsados por H₂ en Londres. China también ha explorado su uso en transporte público desde 2009, con Foshan liderando la implementación de vehículos y la infraestructura relacionada con el H₂.

Aunque el uso del H₂ en buques mercantes se encuentra en fase de desarrollo, ya se han realizado pruebas exitosas. La producción de H₂, predominantemente a través del reformado de gas natural, resulta en H₂ gris. El H₂ azul se obtiene mediante el mismo proceso, pero capturando el CO₂ emitido. Sin embargo, el H₂ verde, producido por electrólisis con energía renovable, es la única alternativa sostenible para el sector marítimo, ofreciendo emisiones netas de ciclo de vida nulas. Es crucial evitar el H₂ gris para cumplir con los objetivos de sostenibilidad, dado que utiliza recursos no renovables y no es carbono neutral.

Preparación tecnológica del combustible y el motor.

Las aplicaciones actuales de las células de combustible de hidrógeno (H₂ FC) se limitan a embarcaciones más pequeñas, como ferris o barcos de pasajeros, sin expansión a buques mercantes más grandes debido a su fase inicial de diseño. La tecnología de motores de combustión interna (ICE) que utiliza H₂ está menos desarrollada, sin ejemplos prácticos establecidos y en fase de pruebas. La mezcla de H₂ con otros combustibles es técnicamente posible, pero los altos costos de implementación para el almacenamiento hacen su uso inviable. Además, adoptar H₂ como combustible directo requeriría una renovación completa de los sistemas de combustible y motores del barco, presentando desafíos significativos.

El H₂ es más eficiente en FC, alcanzando eficiencias del 50% al 60%, mientras que su uso en ICE modificados ofrece eficiencias del 40% al 50%. Aunque la tecnología de FC está disponible, el espacio requerido para estos sistemas es considerablemente mayor, haciéndolos más aptos para embarcaciones de tamaño pequeño a mediano.

Escalabilidad e infraestructura.

El hidrógeno (H₂) se usa principalmente para producir amoníaco en el sector agrícola, constituyendo alrededor del 55% de su consumo global. Para incorporar H₂ y amoníaco como combustibles en el transporte, se requeriría triplicar la producción actual de H₂ para satisfacer solo la demanda del sector marítimo. Aunque el H₂ no se ha implementado comercialmente en la navegación, existen planes para su uso en buques mediante formas comprimidas y líquidas. Se anticipa que el H₂ tendrá un papel crucial en el futuro del transporte marítimo, especialmente a través del desarrollo de combustibles renovables derivados del H₂ verde. Sin embargo, su uso directo en células de combustible (FC) y motores de combustión interna (ICE) jugará un papel menor en la navegación de alta mar, con más potencial para el transporte de corta distancia.

La infraestructura y el suministro de H₂ para el sector marítimo aún no están desarrollados debido a la falta de demanda actual. No obstante, con la previsión de aumento en la demanda, países como Australia, Chile, Marruecos y Noruega están planificando el desarrollo de H₂ verde. El incremento en la producción de H₂ también es factible mediante el uso de energías renovables excedentes para la electrolisis. Marruecos se destaca por su potencial para convertirse en un centro clave de abastecimiento de combustible H₂, gracias a su capacidad para desarrollar energía renovable, especialmente solar, y su ubicación estratégica.

Características del combustible y otras consideraciones clave.

El método predominante de producción de hidrógeno (H₂) utiliza combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural. Para reducir las emisiones de estos procesos, se aplica la tecnología de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS). Sin embargo, para una producción totalmente sostenible de H₂ verde, la electrólisis del agua impulsada por energía renovable se presenta como la solución ideal. Esta técnica, que separa el H₂ del agua usando electricidad, difiere de los métodos termoquímicos basados en combustibles fósiles, promoviendo una producción de H₂ sin emisiones de carbono.

El H₂ puede almacenarse como gas comprimido, líquido criogénico o convertirse en combustibles electrónicos como e-amoníaco o e-metanol. Estas formas de almacenamiento, especialmente el líquido criogénico que requiere -240°C a 13 bar, plantean desafíos en términos de costos, seguridad y espacio en los buques, ya que el H₂ es altamente inflamable y los tanques deben ser robustos y pesados, reduciendo la capacidad de carga útil del buque.

4.4 Metano

El metanol, un combustible alternativo prometedor para el transporte marítimo, se destaca por su bajo contenido de carbono y su capacidad para reducir significativamente las emisiones de SO_x, NO_x y material particulado. Aunque tradicionalmente

se produce a partir de fuentes fósiles, hay un creciente interés en la producción de metanol verde utilizando biometano, desechos agrícolas, o incluso CO₂ capturado, combinado con energía renovable. Su infraestructura existente para transporte y almacenamiento, junto con sus menores emisiones de CO₂ comparado con el HFO, lo hacen atractivo, aunque su ciclo de vida completo puede resultar en emisiones de GEI ligeramente superiores. La transición hacia el metanol verde es crucial para maximizar sus beneficios ambientales.

Preparación tecnológica del combustible y el motor.

El metanol ya se utiliza como combustible en motores de combustión interna (ICE) para barcos, tanto en motores de cuatro como de dos tiempos, y su aplicación está bastante avanzada. Varias embarcaciones comerciales, incluidos once buques cisterna operados por Waterfront Shipping, Marinvest y MOL, así como el Stena Germanica de Stena Lines, han sido adaptadas para usar motores de metanol, demostrando la viabilidad comercial de esta tecnología. En total, existen nueve ejemplos de buques comerciales que usan metanol a nivel mundial, y se prevé que la flota se expanda para contribuir a los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para 2050. Aunque la tecnología ha demostrado éxito, aún está en desarrollo y los buques existentes necesitan adaptaciones, como el reemplazo de inyectores y sistemas de suministro de combustible. Los motores de dos tiempos recientes pueden operar eficazmente con metanol.

Hay diversas maneras de producir metanol. Los métodos convencionales incluyen el uso de carbón (metanol marrón) y gas natural (metanol gris), que son intensivos en carbono y no sostenibles a largo plazo. La producción de metanol verde, incluyendo e-metanol y biometanol, representa el ideal. El e-metanol se obtiene a partir de hidrógeno producido por electrólisis con energías renovables y CO₂ capturado mediante tecnologías como la captura directa de aire (DAC) y la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS). El biometanol se produce a través de la gasificación y reformación de biomasa, utilizando materias primas como residuos forestales y agrícolas, biogás de vertederos, aguas residuales, residuos sólidos municipales y licor negro de la industria del papel.

Escalabilidad e infraestructura.

La producción global de metanol alcanza los 98 millones de toneladas (Mt) en más de 90 plantas, generando unos 55 mil millones de dólares anuales en actividad económica. Su uso principal es en la síntesis de formaldehído y en la producción de olefinas, MTBE/TAME, mezclas para gasolina y DME. Con el aumento de metanol como combustible en la industria naviera, se anticipa un crecimiento en la oferta para satisfacer la demanda. Reemplazar el 50% del combustible marítimo mundial requeriría triplicar la producción actual de metanol, lo que implicaría un significativo incremento en el uso de tierras agrícolas.

El metanol beneficia al transporte marítimo por su infraestructura de distribución existente y no necesita almacenamiento especial. Sin embargo, la producción de e-metanol enfrenta desafíos económicos y técnicos, especialmente en la obtención de fuentes de carbono renovables y baratas, y en la inversión en electrólisis. El biometanol se ve limitado por la disponibilidad de biomasa y la capacidad de incrementar la producción. A pesar de estos retos, importantes actores como Maersk están explorando el uso de metanol renovable, con proyectos pilotos.

Características del combustible y otras consideraciones clave.

El metanol, con una temperatura de almacenamiento entre $-93\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, ofrece un almacenamiento y transporte más económicos en comparación con el H_2 , el amoníaco y el GNL. Su principal limitación es la baja densidad energética de $15,8\text{ GJ/m}^3$, considerablemente menor que la del GNL ($23,4\text{ GJ/m}^3$) y mucho menos que la del MGO ($36,6\text{ GJ/m}^3$). Esto resulta en que los tanques de combustible para metanol deban ser aproximadamente 2,5 veces más grandes que los usados para MGO, reduciendo el espacio disponible para carga. No obstante, el metanol ofrece mayor flexibilidad de almacenamiento que los combustibles criogénicos, pudiendo utilizar varios tipos de tanques a bordo, y presenta una alta eficiencia energética en su producción, de hasta el 70%. El uso de metanol requiere sistemas de monitoreo especializados, incluyendo detección de incendios, debido a que su llama es invisible, lo que añade consideraciones de seguridad específicas como la ubicación y protección del tanque, ventilación adecuada, contención de derrames y detección de vapores e incendios.

4.5 Amoníaco

El amoníaco verde, producido mediante electrólisis con energía renovable, emerge como un combustible alternativo prometedor para la industria marítima, alineándose con los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la OMI. Aunque su uso en motores requiere de un combustible piloto con cero emisiones para la ignición, ofrece ventajas significativas como una infraestructura logística ya existente y una mayor densidad energética en forma líquida comparado con otros combustibles verdes, eliminando la necesidad de almacenamiento criogénico. La producción actual de amoníaco a partir de gas natural (GN) genera considerables emisiones de GEI, destacando la importancia de utilizar fuentes renovables para obtener amoníaco libre de carbono. El proceso Haber-Bosch, que sintetiza amoníaco a partir de hidrógeno (H_2), junto con la alta demanda de amoníaco, especialmente como fertilizante, plantea retos para escalar su producción como combustible marítimo. A pesar de los desafíos, el amoníaco tiene un punto de licuefacción más accesible que el H_2 , facilitando su almacenamiento y transporte. La producción de amoníaco con captura y almacenamiento de carbono (CAC) puede reducir las emisiones, pero no es tan efectiva como el uso de energías renovables.

Preparación tecnológica del combustible y el motor.

Las aplicaciones de combustible de amoníaco en la industria naviera, incluyendo las células de combustible (FC) y motores de combustión interna (ICE), están aún en desarrollo, con limitadas aplicaciones prácticas hasta la fecha. A pesar de ello, la producción de amoníaco mediante el proceso Haber-Bosch, especialmente con el uso de energías renovables, está bien establecida. Se están realizando pruebas positivas con ICE en organizaciones como MAN Energy Solutions y Wärtsilä, entre otras. La propulsión mediante amoníaco también incluye la combustión directa en turbinas de gas, aunque con eficiencias menores comparadas con los ICE.

Japón y Corea del Sur lideran en el desarrollo de motores basados en amoníaco, con investigaciones centradas en motores de doble combustible y basados en encendido para avanzar hacia la descarbonización del sector marítimo. El futuro del amoníaco

como combustible marino se categoriza en tres generaciones: la primera, "amoníaco azul", utiliza secuestro de carbono con gas natural; la segunda genera amoníaco verde a través de energía renovable y electrólisis, representando la opción ideal actual sin emisiones de carbono; y la tercera explora la producción de amoníaco mediante electrorreducción de nitrógeno, ofreciendo una eficiencia energética potencialmente superior. Tanto la segunda como la tercera generación son consideradas sostenibles y representan caminos prometedores para la economía del amoníaco en el transporte marítimo.

Escalabilidad e infraestructura.

La producción global de amoníaco alcanza aproximadamente 180 millones de toneladas (Mt) anuales, con un 80% utilizado por la agricultura como fertilizante. China lidera la producción, contribuyendo con el 32%, utilizando principalmente carbón, mientras que en otras regiones se prefiere el gas natural (GN). Aunque el amoníaco aún no tiene aplicaciones comerciales como combustible marítimo, existe un notable interés en su potencial, destacando la inversión de Corea del Sur de 870 millones de dólares en transporte marítimo ecológico centrado en el amoníaco.

El amoníaco disfruta de una infraestructura de transporte y manipulación ya establecida, ofreciendo ventajas sobre alternativas como el hidrógeno. Con terminales en Japón, Estados Unidos, Europa y rutas marítimas clave, la producción de amoníaco se puede aumentar utilizando energía renovable. Los puertos con depósitos de amoníaco tienen el potencial de producir su propio combustible si tienen acceso a fuentes de energía renovable adecuadas.

Según IRENA, se proyecta que los proyectos de amoníaco renovable sumen 17 Mt anuales para 2030, representando el 9% de la producción mundial actual. Marruecos, con su ubicación estratégica y ricos recursos de energía renovable, junto con Australia, Chile, Dinamarca, los Países Bajos y Nueva Zelanda, son áreas clave para el desarrollo del amoníaco renovable, aprovechando la energía solar, eólica e hidroeléctrica.

Características del combustible y otras consideraciones clave.

El amoníaco se destaca como un combustible marítimo alternativo viable debido a sus características favorables. Su licuación a -33°C facilita un transporte y almacenamiento más sencillos y económicos en comparación con el hidrógeno, que requiere -253°C . Posee una densidad energética casi un 50% superior a la del hidrógeno líquido, con $12,7 \text{ GJ/m}^3$. Aunque los buques propulsados por amoníaco necesitan entre 1,6 y 2,3 veces más volumen de combustible que los convencionales de HFO, pueden lograr reducciones de emisiones de GEI del 83,71 al 92,1%. La combustión de amoníaco en motores de combustión interna requiere de un combustible piloto, que podría ser hidrógeno producido a partir del propio amoníaco a bordo.

A pesar de los desafíos de seguridad relacionados con su baja inflamabilidad, corrosión y toxicidad, la experiencia centenaria en la manipulación del amoníaco y la infraestructura existente permiten gestionar estos riesgos eficazmente. En resumen, el amoníaco ofrece una opción prometedora para la descarbonización del transporte marítimo, combinando viabilidad técnica con beneficios ambientales significativos.

La [figura 4.1](#) podemos ver algunos de los combustibles alternativos que hemos expuesto, estos presentan los puntos fuertes y débiles de los combustibles como resumen de los datos recopilados. Las principales propiedades en las que se examinan los

combustibles son: medio ambiente, coste, técnica, social y otras. Las propiedades se determinaron basándose tanto en estudios anteriores como en las inferencias obtenidas de los documentos recopilados. Las explicaciones de las subpropiedades son las siguientes [7]:

		Ammonia	Biodiesels	DME	Ethanol	Hydrogen	LNG	LPG	Methanol
Environment	Emissions								
	LCA			N/A					
	Health								
Cost	Production			N/A	N/A			N/A	
	CAPEX								
	OPEX								
Technical	Infrastructure			N/A	N/A				
	Technological Maturity								
	Shipping								
Social	Safety								
	Legislations								
Other	Future Outlook							N/A	

Figura 4.1: Imagen artículo [6]. Evaluación final de los combustibles

5 Descarbonización

5.1 Escenarios futuros

La OMI estima que el comercio marítimo podría crecer entre un 40% y un 115% para 2050, con casi toda la demanda energética del sector satisfecha por combustibles fósiles. Sin medidas de mitigación, las emisiones de GEI podrían aumentar entre un 50% y un 250% para 2050, poniendo en riesgo los esfuerzos para limitar el calentamiento global. La planificación y la exploración de vías para descarbonizar son cruciales.

La producción mundial de amoníaco, dominada por China y centrada en el carbón y el gas natural, muestra un gran interés en su potencial como combustible alternativo. Corea del Sur, por ejemplo, ha invertido significativamente en el desarrollo de soluciones de transporte marítimo ecológicas basadas en amoníaco.

La producción de amoníaco puede aumentarse mediante energía renovable, aprovechando la infraestructura existente y el proceso Haber-Bosch. Proyectos futuros buscan aumentar la producción de amoníaco renovable, con Marruecos destacando por su potencial en energía verde y su posición estratégica.

A corto plazo, la pandemia ha impactado el comercio marítimo y la demanda energética, con previsiones de recuperación económica. La regulación de la OMI sobre emisiones de SO_x ha influido en la elección del combustible, con la instalación de depuradores como solución para buques más grandes.

Factores geopolíticos, como la disputa comercial entre América del Norte y el Lejano Oriente, y la iniciativa OBOR de China, podrían afectar el comercio marítimo y la demanda de energía. La transición global hacia la energía limpia y la economía circular podría reducir el comercio de combustibles fósiles y la demanda energética del sector marítimo.

El escenario propuesto actúa como una hoja de ruta para integrar combustibles de baja o nula emisión en el mercado marítimo, marcando un hito en la actual 4^a revolución de la propulsión marítima. Esta transformación, aunque gradual, abre camino a prácticas más sostenibles en la industria, destacando el potencial real de estos combustibles en el avance hacia un futuro más verde para la navegación marítima. Este enfoque refleja un cambio significativo hacia la eficiencia y la sostenibilidad en el sector [figura 5.1 \[2\]](#).

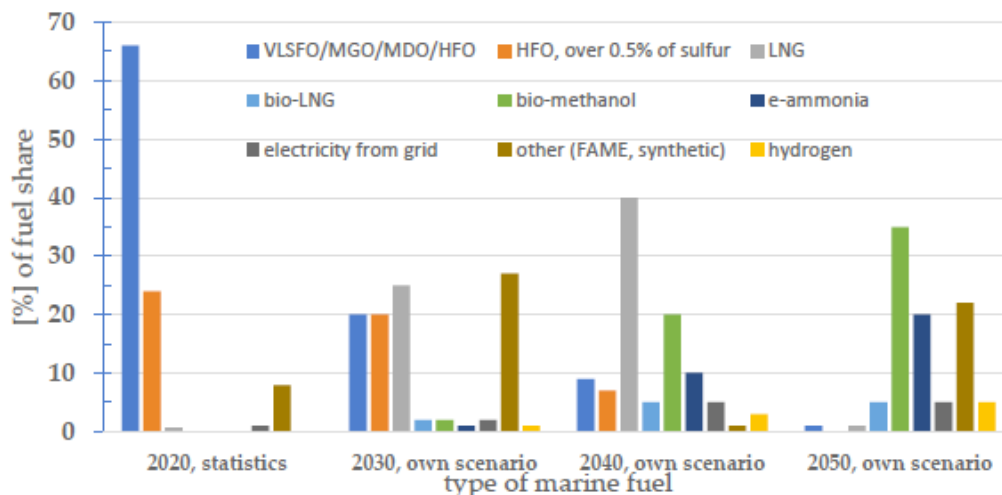


Figura 5.1: Imagen artículo [2]. Estadísticas a partir de 2020 y posibles escenarios para la distribución de los distintos tipos de combustibles marinos en el mercado del transporte marítimo de aquí a 2050

5.2 Tendencia de demanda

La transición hacia la energía limpia en el transporte marítimo podría reducir la demanda de transporte de combustibles fósiles, mientras se proyecta un aumento en el comercio de materiales para energías renovables y almacenamiento de baterías. Factores como el crecimiento económico de economías emergentes y bajas tasas de interés podrían influir en un aumento de la demanda energética del sector. A corto plazo, la pandemia de COVID-19 ha impactado negativamente en los niveles de actividad y demanda energética, aunque se espera una recuperación económica global.

La adopción de las directrices de eficiencia energética y la implementación de tecnologías limpias son clave para reducir el consumo de combustible y las emisiones. Se destaca la importancia de políticas que promuevan el uso de combustibles renovables y la adopción de prácticas de economía circular. A largo plazo, se espera que iniciativas globales y la transición hacia una economía más verde y localizada disminuyan la demanda final de energía en el sector marítimo.

En resumen, el futuro del transporte marítimo dependerá de una combinación de factores económicos, tecnológicos y regulatorios que impulsen hacia una mayor eficiencia y sustentabilidad, marcando una transición significativa hacia combustibles renovables y prácticas de descarbonización para 2050.

5.3 Análisis de los diferentes escenarios

Es necesario intensificar el uso de combustibles renovables, como el biocombustible, H₂ verde, metanol y amoníaco verde, para lograr la descarbonización del sector marítimo para 2050. A corto plazo, el GNL jugará un papel crucial, aunque los biocombustibles están ganando terreno rápidamente. La descarbonización requerirá un aumento significativo en el uso de biocombustibles avanzados, con un crecimiento

anual del 9% necesario. La electrificación indirecta, el uso de biocombustibles avanzados, la mejora en la eficiencia energética y la reducción de la demanda son medidas clave para alcanzar este objetivo. La producción de H₂ verde será fundamental, especialmente para generar amoníaco y metanol renovables.

6 Acciones hacia la descarbonización

El Escenario IRENA de 1,5°C busca limitar el aumento global de la temperatura en dicho valor y alcanzar cero emisiones netas de CO₂ para 2050, lo cual plantea desafíos debido a la necesidad de una transición completa hacia la energía renovable y los problemas de escalabilidad de la infraestructura necesaria. La competencia entre sectores por los combustibles renovables, especialmente el hidrógeno, podría intensificarse dado que la aviación y el transporte terrestre pueden tener mayor capacidad de pago que el transporte marítimo. Para reducir las emisiones de CO₂ y alcanzar los objetivos de 2050, es crucial promover la eficiencia energética (EE), lo que conlleva beneficios inmediatos en reducción de emisiones y ahorro económico. La disminución en el costo de las energías renovables y la necesidad de reducir aún más los costos de tecnologías de apoyo son esenciales para que los combustibles renovables sean la principal opción de propulsión. La descarbonización del sector marítimo requiere políticas internacionales coordinadas y la colaboración entre industrias energéticas intensivas, proveedores de energía y el sector petroquímico. Para superar los objetivos de descarbonización y lograr el Escenario de 1,5°C, se deben adoptar acciones estratégicas en diversas categorías, enfocándose en la inversión en producción de combustibles renovables y el desarrollo de modelos de negocios y asociaciones estratégicas [6].

Sinergias entre múltiples partes interesadas.

Para alcanzar cero emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector marítimo para 2050, se requiere una estrategia multifacética que involucre a todas las partes interesadas clave:

a. **Colaboración Sectorial:** Formuladores de políticas, armadores, operadores de buques, autoridades portuarias, desarrolladores de energías renovables y empresas de servicios públicos deben unirse para establecer asociaciones estratégicas con objetivos comunes de descarbonización. Es crucial desarrollar planes de acción detallados y participativos que abarquen metas a corto, medio y largo plazo.

b. **Sinergias Internacionales:** Mejorar la cooperación internacional entre el transporte marítimo, la aviación, industrias energéticamente intensivas (como el cemento, hierro y acero), proveedores de energía y el sector petroquímico es fundamental. Los combustibles energéticos presentan una ruta prometedora hacia la descarbonización, y es vital fomentar su aceptación como solución viable para alcanzar los objetivos climáticos globales. La inclusión de expertos, académicos, ONGs, think tanks y gobiernos en estos debates enriquecerá la discusión y facilitará el consenso.

c. **Compromiso con la Sociedad Civil:** Informar y sensibilizar a la sociedad civil sobre los impactos ambientales y las soluciones de descarbonización puede incrementar el apoyo a opciones de transporte sostenible. La educación y la comunicación efectiva

son herramientas poderosas para promover el cambio hacia prácticas más sostenibles en el transporte marítimo.

Acciones impulsadas por políticas.

Para impulsar la transición del sector marítimo hacia la sostenibilidad y cumplir con los objetivos de emisiones de la OMI, se proponen acciones estratégicas clave:

d. Implementar un Impuesto al Carbono: Establecer un impuesto al carbono ajustable que refleje el costo real del carbono de cada combustible, promoviendo así los combustibles renovables y desincentivando la inversión en infraestructuras de combustibles fósiles.

e. Refuerzo de la Eficiencia Energética (EE): Fortalecer inmediatamente los mandatos de EE, desarrollar sistemas de monitoreo y asegurar el cumplimiento de medidas de EE que abarquen desde el diseño hasta la operación de los buques.

f. Regulaciones Locales para Limitar Emisiones: Imponer regulaciones estrictas para reducir las emisiones en puertos y vías navegables interiores, incluyendo el uso obligatorio de la conexión a tierra (planchado en frío) en puertos donde sea posible.

g. Aumento de Combustibles Renovables: Establecer un mandato para incrementar progresivamente el uso de combustibles renovables, comenzando con biocombustibles avanzados y biometano, y promover la transición a combustibles verdes basados en hidrógeno (H₂) con incentivos efectivos.

h. Desarrollo de Certificaciones de Sostenibilidad: Crear certificaciones y garantías de origen para asegurar a los operadores la renovabilidad y sostenibilidad de los combustibles, alineando la producción de combustible energético con la adición de capacidad de energía renovable.

i. Promoción de Bienes Sostenibles: Anticipar la demanda de bienes sostenibles mediante la implementación de un sistema de etiquetado que permita a los consumidores tomar decisiones informadas y motivar a las empresas a optar por opciones de envío sostenibles.

Estas estrategias requieren una colaboración global y el compromiso de todas las partes interesadas del sector marítimo, desde formuladores de políticas hasta la sociedad civil, para lograr una transición efectiva hacia la descarbonización y cumplir con los objetivos climáticos globales.

Investigación, desarrollo e innovación.

Para avanzar hacia la descarbonización del sector marítimo y cumplir con los objetivos de emisiones, se recomiendan varias estrategias de acción:

j. Análisis de Combustibles Renovables: Las instituciones de investigación y desarrollo deben examinar a fondo la viabilidad, producción y ciclo de vida de GEI de combustibles renovables para el transporte marítimo, incluyendo biocombustibles y combustibles verdes basados en hidrógeno (H₂), para proporcionar asesoramiento técnico detallado sobre su disponibilidad y costos.

k. Desarrollo de Estrategias Sectoriales: Es esencial colaborar con países ricos en energías renovables y desarrollar estrategias energéticas de bajo costo que satisfagan las demandas futuras de energía nacional, regional e internacional para combustibles renovables, promoviendo así inversiones estratégicas en energía renovable.

l. Fomento de la Tecnología de Motores para Combustibles Verde: Asegurar una inversión adecuada en I+D para el desarrollo de tecnologías de motores que utilicen eficazmente combustibles verdes basados en H₂, como el amoníaco verde, con el objetivo de que estén listas y sean escalables para 2025.

Estas acciones buscan garantizar que el sector marítimo pueda transitar eficazmente hacia un futuro con cero emisiones de carbono, aprovechando las energías renovables y los combustibles verdes, y al mismo tiempo promover la eficiencia energética y la sostenibilidad en la cadena de suministro global.

Invertir en energías renovables y eficiencia energética.

Para acelerar la transición hacia embarcaciones con cero emisiones de carbono y mejorar la eficiencia energética en el sector marítimo, se proponen las siguientes acciones estratégicas:

m. Fomento de la Innovación y Modernización: Facilitar el acceso a líneas de crédito asequibles e introducir incentivos fiscales para promover el desarrollo de nuevas embarcaciones con cero emisiones y financiar la modernización de las flotas existentes para utilizar combustibles renovables y mejorar su eficiencia energética. Este apoyo financiero debe priorizar grandes buques, responsables de la mayor parte del consumo energético en el sector.

n. Planificación Basada en el Potencial de Energía Renovable: Destinar recursos para identificar áreas con un alto potencial de energía renovable y comprender los costos asociados a la producción de combustibles renovables a corto y largo plazo. Una entidad internacional debería coordinar esta planificación, actuando como enlace entre países y el sector marítimo, y consolidar datos cruciales para orientar las inversiones hacia plantas de energía de bajo costo y la producción sostenible de combustibles.

o. Inversiones Estratégicas en Infraestructura de Combustibles Renovables: Invertir en el desarrollo de un suministro eficiente, seguro y confiable de combustibles renovables para el sector marítimo, fomentando la colaboración entre proveedores de combustible, autoridades portuarias y el sector de energías renovables. Se deben identificar y financiar inversiones clave en puertos estratégicos para avanzar en la infraestructura necesaria para la adopción de combustibles renovables, asegurando precios competitivos y estabilidad en el suministro.

Estas medidas buscan garantizar una transición exitosa hacia un sector marítimo más verde, aprovechando el potencial de las energías renovables y fomentando la sostenibilidad y la eficiencia energética en las operaciones marítimas globales.

7 Conclusiones

7.1 Español

- 1.- A pesar de las directrices eficiencia energética existentes, el comportamiento del sector es variable, fluctuando con los precios del petróleo.
- 2.- Se subraya la necesidad de reforzar las regulaciones para promover una mayor eficiencia y reducir las emisiones en el sector marítimo internacional.
- 3.- Es imperativo promover la inversión en buques de cero emisiones y en el desarrollo de combustibles renovables como el hidrógeno verde y el e-amoniaco.
- 4.- La disminución de los costos de las energías renovables y la tecnología asociada hace del e-amoniaco una solución crucial para la descarbonización del transporte marítimo en el mediano y largo plazo.
- 5.- Se prevé que la disponibilidad de motores de amoniaco representará un avance significativo en la búsqueda de una navegación marítima más sostenible.
- 6.- La limitación del calentamiento global a 1,5°C implica la implementación de medidas concretas.
- 7.- La electrificación indirecta mediante combustibles energéticos y el uso de biocombustibles avanzados son estrategias prometedoras.
- 8.- Mejoras en la eficiencia energética de los buques son necesarias para reducir las emisiones de CO₂.
- 9.- Es fundamental considerar la reducción de la demanda sectorial mediante cambios en el comercio mundial como parte de la solución.
- 10.- La consecución de cero emisiones netas para 2050 requiere la implementación de políticas internacionales coordinadas.
- 11.- La formación de asociaciones estratégicas entre las partes interesadas del sector marítimo es crucial para alcanzar este objetivo.
- 12.- La imposición de un impuesto al carbono realista puede incentivar el uso de combustibles renovables y desalentar inversiones en infraestructuras de combustibles fósiles.
- 13.- Es fundamental invertir en la producción de combustibles energéticos en regiones con alto potencial de energía renovable.
- 14.- Se deben comprender y abordar los costos asociados para asegurar una transición efectiva hacia una energía 100% renovable.

7.2 Ingles

- 1.- Despite existing energy efficiency guidelines, the sector's performance is variable, fluctuating with oil prices.
- 2.- It stresses the need to strengthen regulations to promote greater efficiency and reduce emissions in the international maritime sector.
- 3.- Es imperativo promover la inversión en buques de cero emisiones y en el desarrollo de combustibles renovables como el hidrógeno verde y el e-amoniaco.
- 4.- The decreasing costs of renewable energies and the associated technology make e-ammonia a crucial solution for the decarbonization of shipping in the medium and long term.
- 5.- It is anticipated that the availability of ammonia engines will represent a significant advance in the quest for more sustainable maritime shipping.
- 6.- Limiting global warming to 1.5°C implies the implementation of concrete measures.
- 7.- Indirect electrification through energetic fuels and the use of advanced biofuels are promising strategies.
- 8.- Improvements in the energy efficiency of ships are necessary to reduce CO₂ emissions.
- 9.- It is essential to consider the reduction of sectoral demand through changes in world trade as part of the solution.
- 10.- Achieving net zero emissions by 2050 requires the implementation of coordinated international policies.
- 11.- Forming strategic partnerships among maritime stakeholders is crucial to achieving this goal.
- 12.- The imposition of a realistic carbon tax can incentivize the use of renewable fuels and discourage investments in fossil fuel infrastructure.
- 13.- It is essential to invest in the production of energy fuels in regions with high renewable energy potential.
- 14.- The associated costs must be understood and addressed to ensure an effective transition to renewable energy.

Bibliografía

- [1] ANAIS RAMOS AGUDO(2022)., *Análisis de las nuevas directrices de la OMI para la descarbonización del transporte marítimo*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [2] ANDRZEJ S. GRZELAKOWSKI., JERZY HERDZIK., AND, SLAWOMIR SKIBA 2022., *Maritime Shipping Decarbonization: Roadmap to Meet Zero-Emission Target in Shipping as a Link in the Global Supply Chains*. Energi, <https://doi.org/10.3390/en15176150>.
- [3] ECODES, CONSULTADO(2024)., *Propuestas de la OMI para reducir las emisiones de carbono*. <https://ecodes.org/hacemos/cambio-climatico/incidencia-en-politicas-publicas/por-un-transporte-maritimo-limpio/propuestas-de-la-omi-para-reducir-las-emisiones-de-carbono>.
- [4] GASNAM (2022)., *Las operaciones de bunkering de GNL aumentan en 2021*. Gasnam neutral transport.
- [5] IRENA, (2021), *A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050*. International Renewable Energy Agency,, ISBN 978-92-9260-330-4.
- [6] IRENA (2022), *Perspectivas de la Transición Energética Mundial*. International Renewable Energy Agency, ISBN 978-92-9260-334-2.
- [7] LEVENT BILGILI (2023), *A systematic review on the acceptance of alternative marine fuels*. Renewable and Sustainable Energy Review, 182, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113367>.
- [8] MINISTERIO DE ASUNTOS EXTERIORES Y DE COOPERACIÓN (2013), *Resolución MEPC.203(62)*. Boletín Oficial del Estado, cve:BOE-A-2013-8753.
- [9] OFFSHORE ENERGY (2023), *185 Puertos de todo el mundo pueden abastecerse de GNL*. World Energy Trade.
- [10] REVIEW OF MARITIME TRANSPORT (2023), *Towards a green and just transition*. United Nations Publications, ISBN: 978-92-1-002886-8.
- [11] SOSTENIBILIDAD (2023), *La Industria Marítima Inicia su Descarbonización*. IT Digital Media Group, <https://sostenibilidad.ituser.es/actualidad/2023/10/la-industria-maritima-inicia-su-descarbonizacion>.

- [12] VINICIUS ANDRADE DOS SANTOS., PATRICIA, PEREIRA DA SILVA AND LUIS MANUEL VENTURA SERRANO (2022)., *The Maritime Sector and Its Problematic Decarbonization: A Systematic Review of the Contribution of Alternative Fuels*. Energies, doi:org/10.3390/en15103571.

Permiso de divulgación del Trabajo Fin de Máster

El alumno: **Mario Flores Rodríguez**, autor del trabajo final de Máster titulado "**Descarbonización del Sector Marítimo**", y tutorizado por el profesor: **José Agustín González Almeida**, a través del acto de presentación de este documento de forma oficial para su evaluación (registro en la plataforma de TFM), manifiesta que **PERMITE** la divulgación de este trabajo, una vez sea evaluado, y siempre con el consentimiento de su tutor, por parte de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, del Departamento de **UD de Ciencias y Técnicas de la Navegación** 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.