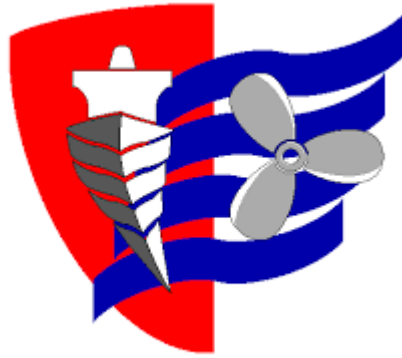




ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

**Amoníaco, Metanol e Hidrógeno: Los Nuevos
Combustibles para la Industria Marítima.**

**Ammonia, Methanol, and Hydrogen: The New
Fuels for the Maritime Industry**

Para acceder al Título de Grado en
**INGENIERÍA NÁUTICA Y TRANSPORTE
MARÍTIMO.**

Autor: Javier Díaz amores

Directora: María Victoria Biezma Moraleda

Septiembre - 2024

AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener diferencias en gran medida entre unos trabajos y otros.

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado, así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.

Resumen:

La industria marítima está bajo una presión creciente para disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero, y cumplir con el objetivo de reducirlas, al menos en un 50%, para el año 2050, en comparación con los niveles de 2008, impuestos por la Organización Marítima Internacional. Para lograr estos objetivos, es esencial explorar alternativas a los combustibles fósiles tradicionales, que sean más limpias y ecológicas. Entre las alternativas más prometedoras se encuentran el amoníaco, el metanol y el hidrógeno, especialmente, en sus formas más limpias y sostenibles.

El amoníaco se considera una opción viable, debido a su alta densidad energética y a la infraestructura existente para su almacenamiento y transporte. La producción tradicional de amoníaco utiliza el proceso Haber-Bosch, que consume grandes cantidades de energía y emite dióxido de carbono. Sin embargo, los métodos de producción de amoníaco verde, que utilizan hidrógeno producido mediante electrólisis del agua con energía renovable y nitrógeno del aire, reducen significativamente las emisiones de dióxido de carbono.

El metanol es otra alternativa viable, conocido por ser un líquido a temperatura ambiente, lo que facilita su manejo y almacenamiento en comparación con el hidrógeno y el amoníaco. El metanol se puede producir a partir de gas natural, carbón o biomasa, y su conversión a metanol verde implica el uso de dióxido de carbono capturado e hidrógeno verde. Este proceso no sólo reduce las emisiones de dióxido de carbono, sino que también reutiliza el dióxido de carbono capturado, cerrando el ciclo de carbono.

El hidrógeno es considerado el combustible del futuro, debido a su potencial para generar energía sin emitir dióxido de carbono. El hidrógeno verde, producido mediante electrólisis del agua utilizando electricidad de fuentes renovables, es una opción particularmente limpia. Además, el hidrógeno puede desempeñar un papel crucial en la producción de amoníaco y metanol verdes, actuando como intermediario esencial en estos procesos.

Para alcanzar los objetivos de cero emisiones netas de dióxido de carbono para 2050 en la industria marítima, es imperativo avanzar en el desarrollo y la adopción de combustibles alternativos como el amoníaco, el metanol y el hidrógeno. Cada uno de estos combustibles presenta ventajas y desafíos únicos, pero juntos representan una transición viable hacia un futuro energético más limpio y sostenible. La clave para el éxito será la inversión en investigación y desarrollo, la creación de políticas de apoyo, y la expansión de la infraestructura necesaria para facilitar su adopción a gran escala.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es investigar y evaluar el potencial de los combustibles alternativos, como el amoníaco, el metanol y el hidrógeno, en la descarbonización de la industria marítima. A través de un análisis detallado de las propiedades, ventajas y desafíos asociados con cada combustible, este estudio busca proporcionar una visión integral de cómo estas alternativas pueden contribuir a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono en el sector.

Este Trabajo Fin de Grado aporta al campo de la ingeniería marítima un análisis comparativo de los combustibles alternativos emergentes, y su viabilidad para su adopción a gran escala.

Palabras clave: Amoníaco, amoníaco verde, metanol, biometanol, hidrógeno, hidrógeno verde, biomasa, sector marítimo.

Abreviaturas:

CII: *Carbon Intensity Indicator* (Indicador de Intensidad de Carbono)

CO: Monóxido de Carbono

CO₂: Dióxido de Carbono

COV: Compuestos Orgánicos Volátiles

ECA: Área de Control de Emisiones

EEXI: *Energy Efficiency Existing Ship Index* (Índice de Eficiencia Energética Aplicable a los Buques Existentes)

EGR: Recirculación de Gases de Escape

GEI: Gases de Efecto Invernadero

MARPOL: Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques

METHAPU: *Methanol Auxiliary Power Unit* (Unidad de Potencia Auxiliar de Metanol)

NECA: *Nitrogen Oxides Emission Control Area*. (Área de Control de Emisiones de Óxidos de Nitrógeno)

NO_x: Óxidos de Nitrógeno

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

OMI: Organización Marítima Internacional

SCR: *Selective Catalytic Reduction* (Reducción Catalítica Selectiva)

SECA: *Sulphur Emission Control Area* (Área de Control de Emisiones de Azufre)

SMR: *Steam Methane Reforming* (Reformado con Vapor)

SO_x: Óxidos de Azufre

TFG: Transición a Fuentes de Energía más Limpias

WGS: *Water-Gas Shift* (Desplazamiento de agua-gas)

Abstract:

The maritime industry is under increasing pressure to reduce its greenhouse gas emissions and meet the goal of reducing them by at least 50% by the year 2050 compared to 2008 levels, as mandated by the International Maritime Organization. To achieve these objectives, it is essential to explore alternatives to traditional fossil fuels that are cleaner and more environmentally friendly. Among the most promising alternatives are ammonia, methanol, and hydrogen, especially in their cleaner and more sustainable forms.

Ammonia is considered a viable option due to its high energy density and the existing infrastructure for its storage and transportation. Traditional ammonia production uses the Haber-Bosch process, which consumes large amounts of energy and emits carbon dioxide. However, green ammonia production methods, which use hydrogen produced by electrolysis of water with renewable energy and nitrogen from the air, significantly reduce carbon dioxide emissions.

Methanol is another viable alternative, known for being a liquid at room temperature, which makes it easier to handle and store compared to hydrogen and ammonia. Methanol can be produced from natural gas, coal, or biomass, and its conversion to green methanol involves the use of captured carbon dioxide and green hydrogen. This process not only reduces carbon dioxide emissions but also reuses the captured carbon dioxide, closing the carbon cycle.

Hydrogen is considered the fuel of the future due to its potential to generate energy without emitting carbon dioxide. Green hydrogen, produced by electrolysis of water using electricity from renewable sources, is a particularly clean option. Furthermore, hydrogen can play a crucial role in the production of green ammonia and methanol, acting as an essential intermediary in these processes.

To achieve the goal of net-zero carbon dioxide emissions by 2050 in the maritime industry, it is imperative to advance the development and adoption of alternative fuels like ammonia, methanol, and hydrogen. Each of these fuels presents unique advantages and challenges, but together they represent a viable transition toward a cleaner and more sustainable energy future. The key to success will be investment in research and development, the creation of supportive policies, and the expansion of the necessary infrastructure to facilitate their large-scale adoption.

The main objective of this Final Degree Project is to investigate and evaluate the potential of alternative fuels, such as ammonia, methanol, and hydrogen, in the decarbonization of the maritime industry. Through a detailed analysis of the properties, advantages, and challenges associated with each fuel, this study seeks to provide a comprehensive view of how these alternatives can contribute to the reduction of carbon dioxide emissions in the sector.

This Final Degree Project contributes to the field of maritime engineering by providing a comparative analysis of emerging alternative fuels and their viability for large-scale adoption.

Keywords: Ammonia, green ammonia, methanol, biomethanol, hydrogen, green hydrogen, biomass, maritime sector.

Abbreviations

CII: Carbon Intensity Indicator

CO: Carbon Monoxide

CO₂: Carbon Dioxide

COV: Volatile Organic Compounds

ECA: Emission Control Area

EEXI: Energy Efficiency Existing Ship Index

EGR: Exhaust Gas Recirculation

GEI: Greenhouse Gases

MARPOL: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships

METHAPU: Methanol Auxiliary Power Unit

NECA: Nitrogen Oxides Emission Control Area

NO_x: Nitrogen Oxides

ODS: Sustainable Development Goals

OMI: International Maritime Organization

SCR: Selective Catalytic Reduction

SECA: Sulphur Emission Control Area

SMR: Steam Methane Reforming

SO_x: Sulfur Oxides

TFG: Transition to Cleaner Energy Sources

WGS: Water-Gas Shift

INDICE

1	Introducción	10
1.1	Contexto y Planteamiento del Problema	10
1.2	Objetivos	11
1.2.1	Objetivo General	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
1.3	Justificación	11
1.4	Alcance y Limitaciones	13
2	Marco Teórico	17
2.1	Amoníaco	17
2.1.1	Producción de Amoníaco	17
2.1.2	Uso del Amoníaco en la Industria Marítima	20
2.2	Metanol	23
2.2.1	Producción de Metanol	23
2.2.2	Uso del Metanol en la Industria Marítima	27
2.3	Hidrógeno	29
2.3.1	Producción de Hidrógeno	29
2.3.2	Uso del Hidrógeno en la Industria Marítima	31
2.4	Impacto Medioambiental de los Combustibles Tradicionales	34
2.4.1	Emisiones de CO ₂ y Otros Contaminantes	35
2.4.2	Regulaciones Medioambientales	36
2.5	Comparación de Costos y Eficiencia entre Combustibles	39
3	Resultados	41
3.1	Comparación de Emisiones	41
3.1.1	Motores que usan Amoníaco como combustible	41
3.1.2	Motores que usan metanol como combustible	42
3.1.3	Motores que usan hidrógeno como combustible	43
3.2	Eficiencia Energética	44

3.2.1	Comparación de Rendimiento de los Combustibles	44
3.2.2	Consumo de Combustible y Autonomía	47
4	Discusión.....	50
4.1	Viabilidad de los Combustibles Alternativos.....	50
4.1.1	Factores Económicos	50
4.1.2	Factores Técnicos.....	52
4.2	Desafíos y Oportunidades	53
4.2.1	Implementación en la Flota Actual	53
4.2.2	Innovaciones Futuras	54
5	Conclusiones	58
6	Referencias BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto y Planteamiento del Problema

El transporte marítimo es una pieza clave en el comercio global, responsable de movilizar alrededor del 90% de los bienes que se comercializan internacionalmente. Sin embargo, esta industria también es una de las principales fuentes de contaminación debido a su alta dependencia de combustibles fósiles tradicionales como el fueloil y el diésel marino. Estos combustibles, aunque económicos y eficientes en términos de energía, generan una cantidad considerable de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes atmosféricos, tales como óxidos de azufre (SOx) y óxidos de nitrógeno (NOx), que tienen un impacto significativo en el medio ambiente y la salud pública.

La Organización Marítima Internacional (OMI) ha establecido metas ambiciosas para reducir las emisiones de GEI del transporte marítimo, con el objetivo de reducir a 0 emisiones CO₂ para el año 2050 [1]. Para alcanzar estas metas, es esencial la transición hacia combustibles alternativos que sean más limpios y sostenibles. Entre las opciones más prometedoras se encuentran el amoníaco, el metanol y el hidrógeno. Estos combustibles no sólo tienen el potencial de reducir significativamente las emisiones de GEI, sino que también pueden eliminar virtualmente las emisiones de SOx y NOx.

El amoníaco, por ejemplo, no emite dióxido de carbono durante su combustión y tiene una alta densidad energética, lo que lo hace atractivo para el transporte marítimo. El metanol, aunque menos denso energéticamente, es más fácil de manejar y almacenar, y puede producirse de manera renovable a partir de biomasa o CO₂ reciclado. El hidrógeno, por otro lado, es considerado el combustible del futuro debido a su potencial para ser producido de manera completamente limpia mediante electrólisis utilizando energía renovable [2]. Sin embargo, cada uno de estos combustibles presenta desafíos técnicos y económicos que deben ser superados para su adopción generalizada.

La implementación de estos combustibles alternativos requiere tanto avances tecnológicos en la producción y almacenamiento, como unos cambios significativos en la infraestructura existente y en la normativa reguladora. Además, es crucial realizar estudios detallados sobre el impacto medioambiental de cada opción, para asegurar que la transición no solo sea técnicamente viable, sino también verdaderamente sostenible.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) “Amoníaco, Metanol e Hidrógeno: Los Nuevos Combustibles para la Industria Marítima”, pretende evaluar el impacto medioambiental de la producción y uso de amoníaco, metanol e hidrógeno como combustibles alternativos en la industria marítima, y proponer opciones sostenibles para la reducción de emisiones en grandes buques.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para ello, los objetivos específicos se enfocarán en analizar las características y ventajas del amoníaco, metanol e hidrógeno como combustibles alternativos, en comparación con los combustibles fósiles tradicionales utilizados en la industria marítima. Además, se compararán las emisiones de gases de efecto invernadero, y otros contaminantes producidos por motores de amoníaco, metanol e hidrógeno, con las emisiones de motores que utilizan combustibles fósiles. También se evaluará la eficiencia energética y la viabilidad económica de la implementación de motores de amoníaco, metanol e hidrógeno en grandes buques. Por último, se identificarán los desafíos técnicos y logísticos asociados con la producción, almacenamiento y uso de estos combustibles alternativos en la industria marítima.

1.3 Justificación

La justificación de este estudio radica en la necesidad imperiosa de reducir las emisiones de GEI, y otros contaminantes provenientes de la industria marítima, un sector crucial para el comercio global. Con el creciente reconocimiento de la crisis climática y la implementación de regulaciones más estrictas por parte de organismos internacionales, como la OMI, es vital explorar alternativas viables de los combustibles fósiles tradicionales [1]. El amoníaco, el metanol y el hidrógeno emergen como soluciones potenciales, capaces de disminuir sustancialmente la huella de carbono del transporte marítimo por su potencial como combustibles que no emiten CO₂ en su combustión.

La industria marítima es responsable de una proporción significativa de las emisiones globales de GEI, contribuyendo considerablemente al calentamiento global y la contaminación del aire. Las emisiones de CO₂, NO_x y SO_x de los buques son factores importantes que exacerban estos problemas. Con el endurecimiento de las regulaciones, como la adopción del límite global de azufre en los combustibles marinos establecido por la OMI en 2020, y los objetivos de reducción 0% de emisiones de CO₂ para 2050, la industria se encuentra bajo una

presión creciente para adoptar prácticas más sostenibles [1]. En este contexto, la exploración de combustibles alternativos se convierte en una necesidad urgente.

El uso de combustibles alternativos no sólo tiene el potencial de mitigar el impacto ambiental, sino también de mejorar la eficiencia energética de los buques. La transición a estos combustibles requiere una evaluación detallada de su viabilidad técnica y económica, así como de su impacto medioambiental. El hidrógeno, por ejemplo, es conocido por su alta eficiencia y cero emisiones de CO₂, pero presenta desafíos significativos en términos de almacenamiento y manejo debido a su alta inflamabilidad y baja densidad volumétrica [2]. El amoníaco, por otro lado, aunque también ofrece ventajas en términos de cero emisiones de CO₂, plantea retos relacionados con su toxicidad y la necesidad de controlar las emisiones de NO_x. El metanol, siendo más fácil de manejar y almacenar, ofrece una alternativa viable, pero requiere optimizaciones en su producción renovable para ser verdaderamente sostenible [3].

Además, la investigación sobre estos combustibles alternativos puede impulsar la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías, creando oportunidades para el avance científico y tecnológico. Este impulso a la innovación no sólo beneficiará al sector marítimo, sino también a otros sectores industriales que buscan reducir su dependencia de los combustibles fósiles. La adopción de combustibles alternativos también puede fomentar la independencia energética, al reducir la necesidad de importar petróleo y sus derivados, y promover el uso de recursos locales y renovables. La producción local de hidrógeno, metanol o amoníaco a partir de fuentes renovables puede generar empleo, y estimular el crecimiento económico en las regiones productoras.

La transición hacia una industria marítima más sostenible también tiene implicaciones significativas para la salud pública. La reducción de emisiones de SO_x y NO_x mejorará la calidad del aire en áreas portuarias y costeras, disminuyendo la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en las poblaciones locales. Además, la adopción de combustibles más limpios contribuirá a la protección de los ecosistemas marinos, reduciendo la acidificación de los océanos y la contaminación por hidrocarburos [3].

Finalmente, este TFG tiene la finalidad de proporcionar una visión del futuro combustible que utilizaremos en la industria marítima.

1.4 Alcance y Limitaciones

El alcance de este estudio se centra en evaluar el impacto medioambiental y la viabilidad de la implementación de amoníaco, metanol e hidrógeno como combustibles alternativos en la industria marítima. Este análisis abarca las características técnicas y económicas de estos combustibles, así como sus beneficios y desafíos en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. La investigación incluirá una revisión exhaustiva de la literatura existente, estudios de caso y modelos teóricos para proporcionar una comprensión integral de las oportunidades y limitaciones asociadas con cada combustible. Toda esta información la he conseguido utilizando la base de datos de *Google académico* [4].

Uno de los objetivos principales es determinar cómo estos combustibles alternativos pueden contribuir a la reducción de las emisiones de GEI, y otros contaminantes en la industria marítima. Para ello, se evaluarán parámetros clave como la eficiencia energética, las emisiones de CO₂, NO_x y SO_x, y la compatibilidad de estos combustibles con los motores y tecnologías actuales de los buques. Se prestará especial atención a las tecnologías de control de emisiones y a la posibilidad de adaptar motores existentes para utilizar estos nuevos combustibles.

Además, este estudio analizará la infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento y distribución de estos combustibles alternativos. Esto incluye la identificación de las instalaciones portuarias y los sistemas logísticos necesarios para manejar amoníaco, metanol e hidrógeno, así como la evaluación de los costos asociados con la construcción y el mantenimiento de esta infraestructura. También se considerará el impacto de la adopción de estos combustibles en los costos operativos de los buques y las implicaciones de las regulaciones medioambientales más estrictas.

Se llevarán a cabo estudios particulares para ilustrar ejemplos prácticos de la implementación de estos combustibles en la industria marítima. Estos estudios ayudarán a contextualizar los hallazgos teóricos, y proporcionar una visión más realista de los beneficios y desafíos que enfrentan los operadores de buques al adoptar combustibles alternativos. También se utilizarán modelos teóricos para simular diferentes escenarios y predecir el rendimiento y las emisiones de los buques que utilizan estos combustibles.

El flujograma [Fig:1] ilustra los pasos necesarios para llevar a cabo el estudio, desde el análisis inicial hasta la evaluación de costos y la aplicación práctica, mediante estudios de caso y modelos teóricos.

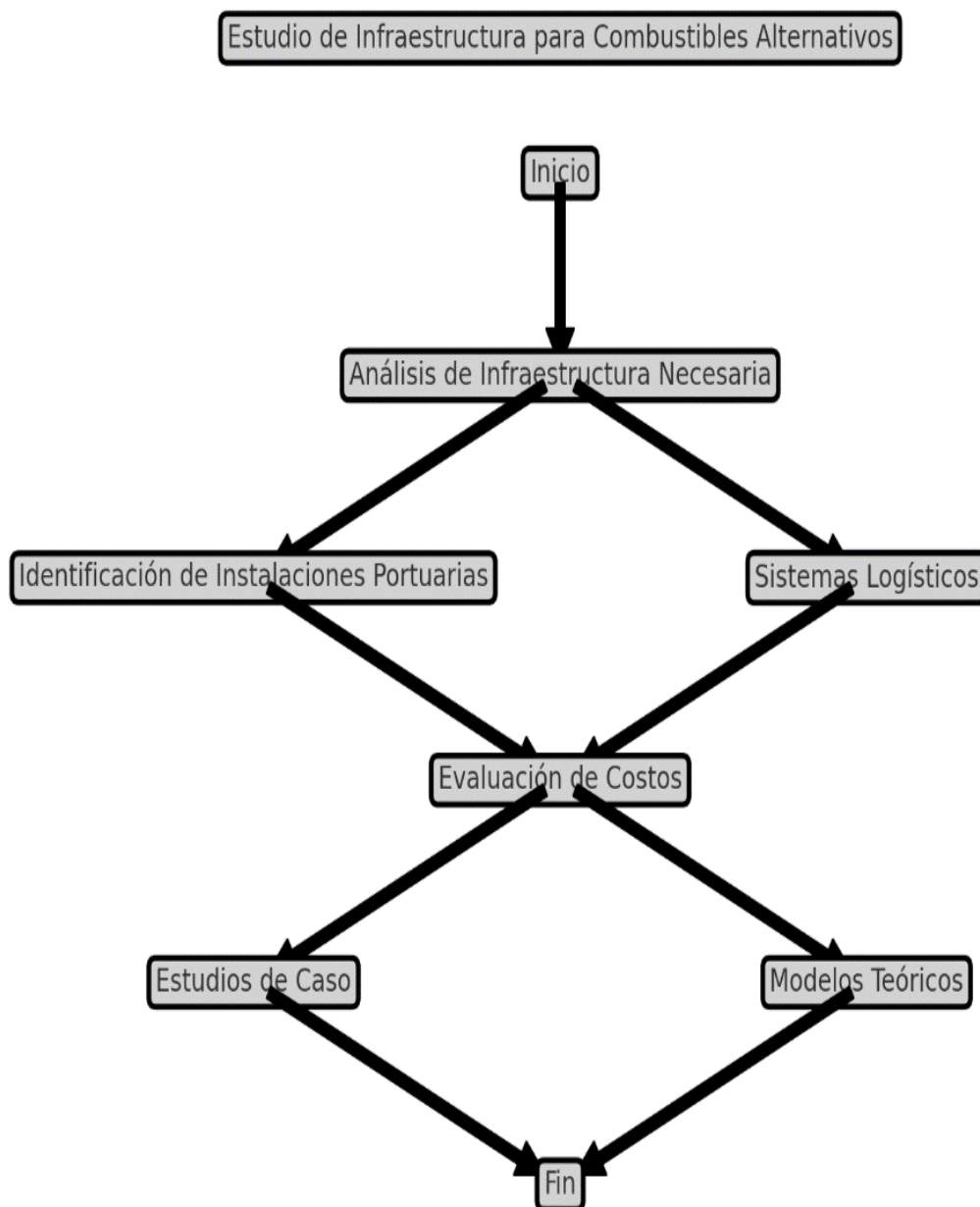


Figura 1. Flujograma secuencial en el desarrollo del TFG. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, durante la realización de este estudio, se han encontrado varias limitaciones. Por un lado, la disponibilidad de datos precisos y actualizados, ya que la investigación sobre estos combustibles alternativos aún está en desarrollo. La mayoría de los datos disponibles provienen de estudios preliminares y proyectos piloto, lo que puede limitar la aplicabilidad y la precisión de los resultados. Asimismo, la variabilidad en las condiciones operativas de los buques, y las diferencias regionales en la infraestructura y las regulaciones pueden afectar a realizar conclusiones generalistas sobre los datos encontrados. Por ejemplo, los resultados obtenidos en una región con infraestructura avanzada para el manejo de hidrógeno pueden no

ser aplicables en regiones con infraestructura menos desarrollada. En el caso de España se lanzó en 2020 su "Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde", que establece un marco para el desarrollo de una economía del hidrógeno basada en fuentes renovables. Esta estrategia tiene como objetivo situar a España como líder en la producción y el uso de hidrógeno verde, impulsando la inversión y la innovación en el sector [5].

Otra limitación importante es la falta de estudios de campo y experimentos a gran escala. Aunque los modelos teóricos y los estudios de caso proporcionan información valiosa, la ausencia de pruebas en condiciones reales de operación, puede limitar la validez de algunos hallazgos. La implementación de proyectos piloto y la recopilación de datos empíricos son esenciales para validar los resultados y proporcionar una base más sólida para futuras investigaciones.

Este estudio pretende proporcionar un documento sólido, tras una extensa búsqueda en las bases de datos de *Google* académico [4] y Scopus, y que sirva de referencia para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en el uso de combustibles alternativos en la industria marítima.

Al identificar las áreas clave de oportunidad y los principales obstáculos, esta investigación puede guiar a las partes interesadas hacia soluciones más sostenibles y eficientes, contribuyendo al avance hacia una industria marítima más limpia y responsable. La evaluación exhaustiva de amoníaco, metanol e hidrógeno como combustibles alternativos permitirá a los legisladores, reguladores y líderes de la industria tomar decisiones informadas y desarrollar políticas y estrategias que promuevan la adopción de tecnologías limpias y sostenibles en el sector marítimo. Con el tiempo, estos esfuerzos contribuirán significativamente a la reducción de la huella de carbono de la industria y al cumplimiento de los 30 objetivos globales de sostenibilidad (ODS). En este TFG contribuiremos en los siguientes ODS [6]:

- ODS 7: Energía asequible y no contaminante - Este objetivo impulsa la disponibilidad de energía accesible, segura, sostenible y contemporánea para todos, abarcando la utilización de combustibles alternativos para disminuir la huella de carbono. [6].
- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura - Este objetivo pretende crear infraestructuras resilientes, promover una industrialización inclusiva y sostenible, y estimular la innovación. Las iniciativas para desarrollar infraestructuras para combustibles alternativos están en consonancia con este objetivo. [6].

- ODS 13: Acción por el clima - Este objetivo urge a tomar acciones inmediatas para enfrentar el cambio climático y sus efectos. Reducir la huella de carbono de la industria marítima apoya directamente este propósito [6].
- ODS 14: Vida submarina - Este objetivo promueve el uso sostenible de océanos y recursos marinos. Reducir las emisiones marítimas beneficia a los ecosistemas marinos [6].

2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo, abordaremos de manera exhaustiva la producción de amoníaco, metanol e hidrógeno, así como su aplicación en la industria marítima. Este análisis nos permitirá comprender las técnicas de producción actuales, las innovaciones recientes y las implicaciones medioambientales y económicas de cada uno de estos compuestos. Empezaremos con el amoníaco.

2.1 Amoníaco

El amoníaco (NH_3) es un compuesto químico formado por un átomo de nitrógeno y tres átomos de hidrógeno. Es conocido principalmente por su uso en la fabricación de fertilizantes y productos químicos industriales. Sin embargo, en los últimos años ha surgido como una prometedora alternativa de combustible limpio debido a su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.1.1 Producción de Amoníaco

El amoníaco es un compuesto químico fundamental, ampliamente utilizado en la industria química, especialmente en la producción de fertilizantes. Su producción a gran escala se realiza principalmente mediante el proceso Haber-Bosch. En la Figura 2 se presentan las etapas para la producción del amoníaco, en base al proceso Haber-Bosch., desarrollado a principios del siglo XX. Este proceso implica la reacción de nitrógeno e hidrógeno bajo altas presiones y temperaturas en presencia de un catalizador para formar amoníaco. A pesar de su eficiencia en términos de rendimiento de producción, el proceso Haber-Bosch es intensivo en energía y depende en gran medida de fuentes de energía fósil, lo que contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero [7].

El Proceso Haber-Bosch produce amoníaco a partir de nitrógeno (N_2) e hidrógeno (H_2) bajo condiciones específicas de alta presión y temperatura en presencia de un catalizador. A continuación, se describe el proceso en detalle:

Reacción Principal: $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$ [Fórmula:1] Esta reacción es exotérmica, liberando energía en forma de calor.

Nitrógeno: Se obtiene del aire mediante un proceso de separación de gases, generalmente usando un sistema de destilación criogénica. Hidrógeno: Se obtiene principalmente del gas natural (metano) a través de un proceso de reformado de metano con vapor (SMR). El proceso de SMR incluye las siguientes etapas:

Reformado Primario: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ [Fórmula 2]

Reformado Secundario y Reacción de Cambio de Agua-Gas: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ [Fórmula 3]. Se eliminan las impurezas del gas de síntesis resultante, incluyendo CO_2 , para obtener hidrógeno de alta pureza.

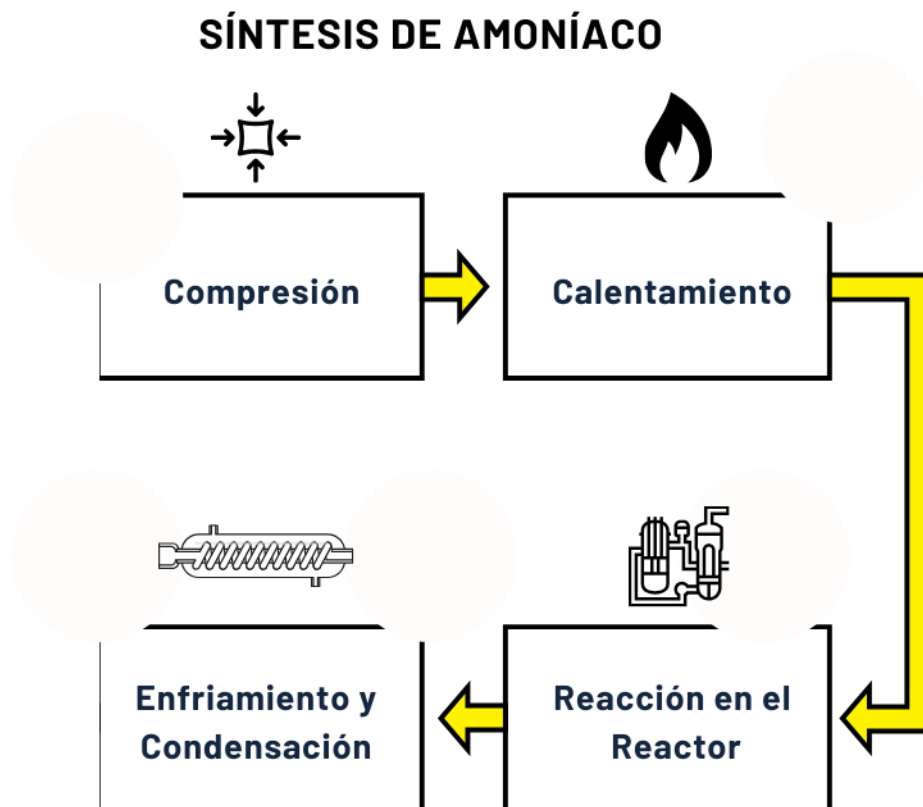


Figura 2. Representación gráfica de la síntesis del amoníaco Fuente: Elaboración propia

El proceso Haber-Bosch requiere grandes cantidades de hidrógeno, que tradicionalmente se obtiene a partir del reformado de gas natural, un proceso que también produce CO_2 como subproducto. Este doble impacto, tanto en el consumo de energía fósil como en la emisión de GEI, ha llevado a una búsqueda intensiva de métodos de producción más sostenibles. En respuesta a las crecientes preocupaciones ambientales, y a la necesidad de reducir la huella de carbono, se están desarrollando métodos alternativos de producción de amoníaco que utilizan fuentes de energía renovable [8].

Entre estos métodos alternativos se destaca la electrólisis del agua, para obtener hidrógeno verde. Este hidrógeno se produce mediante la división del agua en hidrógeno y oxígeno usando

electricidad generada a partir de fuentes renovables como la solar, eólica o hidroeléctrica. Una vez obtenido, el hidrógeno verde puede reaccionar con nitrógeno en condiciones más sostenibles para producir amoníaco. Este enfoque no solo reduce las emisiones de CO₂ asociadas con el reformado de gas natural, sino que también mejora la eficiencia energética y económica del proceso de producción de amoníaco [9].

La producción de amoníaco utilizando energías renovables presenta desafíos técnicos significativos. La infraestructura necesaria para la electrólisis y la captura de nitrógeno debe ser robusta y eficiente, para competir con los métodos tradicionales como el proceso Haber-Bosch. Además, la integración de estas tecnologías en las cadenas de suministro existentes requiere una inversión considerable y una reestructuración de la infraestructura industrial. La electrólisis del agua, por ejemplo, requiere grandes cantidades de electricidad, y la captura de nitrógeno a partir del aire también consume energía. Sin embargo, los avances tecnológicos y la economía de escala pueden reducir estos costos con el tiempo [10].

Los procesos para la producción de amoníaco sin emisiones de CO₂, también llamado amoníaco verde que se refiere a la producción de amoníaco utilizando hidrógeno generado a partir de fuentes renovables, como la energía solar, eólica o hidráulica, en lugar de gas natural [10]. Este enfoque busca reducir significativamente las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas con el proceso tradicional Haber-Bosch. Para generar Hidrogeno verde lo hacemos por un proceso de electrólisis del agua: Utiliza electricidad proveniente de fuentes renovables para descomponer el agua (H₂O) en oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂) [11]: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ [Fórmula 4]

Almacenamiento y Transporte: El hidrógeno producido se almacena y transporta para su uso en la síntesis de amoníaco.

Síntesis de Amoníaco: Proceso Haber-Bosch Modificado [12]: El hidrógeno verde se combina con nitrógeno (N₂) del aire bajo condiciones controladas de alta presión y temperatura, utilizando un catalizador: $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$ [Fórmula 5]

Otro desafío es la estabilidad y el almacenamiento del amoníaco verde producido. El amoníaco es un compuesto volátil y tóxico, lo que requiere precauciones especiales en su manejo y almacenamiento. A pesar de estos desafíos, los beneficios potenciales en términos de sostenibilidad y reducción de emisiones son significativos, lo que impulsa la investigación y el desarrollo continuo en este campo [13].

El amoníaco producido de manera sostenible no sólo puede servir como fertilizante, su uso más común, sino también como un combustible alternativo en diversas aplicaciones industriales y de transporte. La industria marítima, en particular, podría beneficiarse significativamente de estos avances tecnológicos, pues los motores de combustión interna pueden ser adaptados para funcionar con amoníaco, reduciendo así la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de CO₂. Además, el amoníaco puede ser utilizado en celdas de combustible, que convierten el amoníaco directamente en electricidad, ofreciendo una fuente de energía limpia y eficiente [9].

En conclusión, la producción de amoníaco mediante métodos sostenibles representa una oportunidad significativa para reducir las emisiones de GEI y avanzar hacia una economía más verde. Aunque existen desafíos técnicos y económicos, la investigación y el desarrollo continuo, junto con el apoyo de políticas gubernamentales, pueden superar estas barreras. La industria marítima, junto con otras industrias dependientes de combustibles fósiles, tiene mucho que ganar al adoptar el amoníaco verde como una alternativa viable y sostenible. La implementación exitosa de estas tecnologías puede servir como un modelo para otras industrias, demostrando que es posible combinar el crecimiento económico con la sostenibilidad ambiental [9].

En el siguiente punto, profundizaremos en el uso del amoníaco en la industria marítima. Esta sección examinará las razones detrás del interés creciente en el amoníaco como un combustible alternativo para el sector marítimo, destacando tanto sus ventajas como los desafíos que presenta su implementación.

2.1.2 Uso del Amoníaco en la Industria Marítima

El amoníaco se considera una opción prometedora como combustible alternativo en la industria marítima, debido a su alta densidad energética y su capacidad para ser almacenado y transportado de manera similar a los combustibles fósiles tradicionales. A diferencia de estos combustibles, el amoníaco no emite dióxido de carbono durante su combustión, lo que lo convierte en una alternativa atractiva para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector marítimo [14].

La combustión del amoníaco no genera CO₂, pero en su producción con los medios tradicionales usando el proceso Haber-Bosch con gas natural o carbón podemos observar en la Tabla 1, que los niveles de CO₂ son demasiados elevados para considerar dicho combustible como medioambientalmente aceptable.

Proceso / Combustible	Emisiones de CO₂ (g CO₂/kWh o g CO₂/kg producto)
Producción de Amoníaco (Haber-Bosch con Gas Natural) [15]	1.8 - 2.0 kg CO ₂ /kg NH ₃
Producción de Amoníaco (Haber-Bosch con Carbón) [16]	2.5 - 3.0 kg CO ₂ /kg NH ₃
Carbón (Generación de Electricidad) [17]	0.9 - 1.05 kg CO ₂ /kWh
Petróleo (Generación de Electricidad) [18]	0.7 - 0.9 kg CO ₂ /kWh
Gas Natural (Generación de Electricidad) [19]	0.4 - 0.5 kg CO ₂ /kWh
Biodiésel (Generación de Electricidad) [20]	0.04 - 0.09 kg CO ₂ /kWh
Energía Solar (Generación de Electricidad) [21]	0.02 - 0.05 kg CO ₂ /kWh
Energía Eólica (Generación de Electricidad) [21]	0.01 - 0.02 kg CO ₂ /kWh

Tabla 1. Comparativa emisiones de CO₂ en la producción de amoníaco con medios tradicionales frente a otros combustibles. Fuente: elaboración propia

La implementación del amoníaco como combustible marino enfrenta desafíos técnicos significativos. Los motores de combustión interna y las celdas de combustible deben ser adaptados o rediseñados para utilizar amoníaco de manera eficiente y segura. En el caso de los motores de combustión interna, esto puede implicar la modificación de los sistemas de inyección y combustión para manejar las propiedades químicas y físicas del amoníaco. Además, el uso de celdas de combustible de amoníaco, que convierten directamente el amoníaco en electricidad mediante una reacción electroquímica, representa una tecnología emergente con el potencial de ofrecer una eficiencia superior y cero emisiones de contaminantes [9].

El manejo del amoníaco también requiere precauciones especiales debido a su toxicidad [22] y potencial para causar corrosión [23] en los sistemas de almacenamiento [24] y distribución. El amoníaco es tóxico por inhalación y puede causar irritación severa a los ojos y las vías respiratorias [22]. Por lo tanto, es esencial implementar medidas de seguridad rigurosas en todas las etapas de su manejo, desde la producción hasta el almacenamiento y la combustión. Además, los materiales utilizados en los sistemas de almacenamiento y distribución deben ser resistentes a la corrosión para evitar fugas y garantizar la integridad del sistema [24].

A pesar de estos desafíos, varias iniciativas y proyectos piloto están explorando la viabilidad del amoníaco como combustible marino, demostrando su potencial para

descarbonizar el transporte marítimo. Por ejemplo, algunos proyectos están probando motores marinos de amoníaco en buques de investigación y demostración, mientras que otros están desarrollando celdas de combustible de amoníaco para aplicaciones marítimas. Estos proyectos proporcionan datos valiosos sobre el rendimiento, la eficiencia y los desafíos técnicos asociados con el uso de amoníaco como combustible [25].

El uso del amoníaco en la industria marítima también presenta ventajas económicas, pues la infraestructura existente para el almacenamiento y transporte de amoníaco, desarrollada para su uso en la industria de fertilizantes y otros sectores, puede ser adaptada para su uso como combustible, pudiendo reducir los costos iniciales de implementación. Esto es particularmente ventajoso en comparación con la infraestructura requerida para otros combustibles alternativos, como el hidrógeno, que puede ser más costosa y compleja de desarrollar [26].

Podemos observar en la Figura 3 como el precio de amoníaco ha bajado a lo largo de los años, convirtiéndose en un combustible atractivo, desde el punto de vista económico.

Variación del precio del amoníaco desde junio 2009 hasta junio 2019

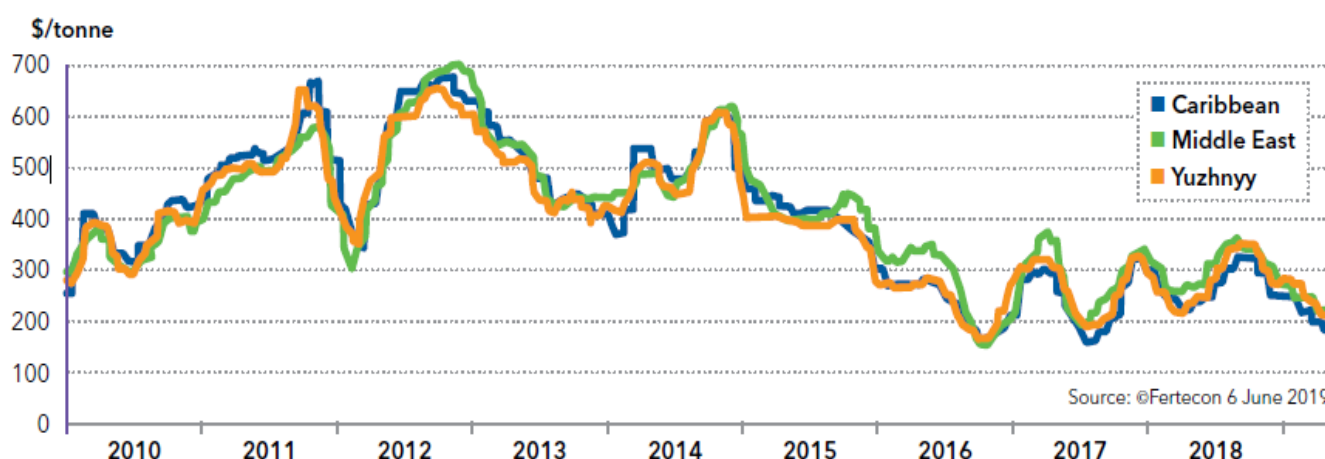


Figura: 3. Variación del precio del amoníaco durante un periodo de 10 años desde junio 2009. Fuente: [26]

Además, la producción de amoníaco a partir de fuentes renovables, como el hidrógeno verde y el nitrógeno del aire, puede estabilizar los precios del combustible y reducir la dependencia de los mercados volátiles de petróleo [8].

El desarrollo de regulaciones y estándares específicos para el uso del amoníaco como combustible marino es crucial para su adopción generalizada. Estas regulaciones deben abordar aspectos de seguridad, eficiencia y sostenibilidad para garantizar una transición ordenada y

efectiva hacia el uso de combustibles más limpios en la industria marítima. La colaboración entre gobiernos, industria y academia es esencial para superar los desafíos técnicos y regulatorios y aprovechar plenamente el potencial del amoníaco en la descarbonización del transporte marítimo [14].

En conclusión, aunque el uso del amoníaco en la industria marítima presenta desafíos técnicos y de seguridad, sus beneficios ambientales y económicos, lo convierten en una opción viable y prometedora para la descarbonización del transporte marítimo. La investigación y el desarrollo continuos, junto con la implementación de regulaciones adecuadas y la colaboración entre las partes interesadas, serán cruciales para lograr una transición exitosa hacia el uso de amoníaco como combustible marino [25].

A continuación, procederemos a realizar un análisis detallado del metanol, con el objetivo de comprender en profundidad, tanto la producción del metanol como su aplicación en la industria marítima, además de explorar sus características, ventajas y desafíos asociados.

2.2 Metanol

Iniciaremos un análisis detallado de los diversos métodos empleados para la producción de metanol, un compuesto químico crucial en numerosas aplicaciones industriales y como posible alternativa en el ámbito energético [27].

2.2.1 Producción de Metanol

El metanol es un alcohol simple, que se utiliza ampliamente en la industria química como materia prima para la producción de una variedad de productos químicos, así como combustible alternativo en diversas aplicaciones. La producción a gran escala de metanol se realiza, principalmente, a través de la conversión del gas natural en una serie de reacciones químicas que culminan en la producción de metanol. Este proceso implica la reformado del gas natural para producir gas de síntesis, una mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno, que luego se convierten en metanol, mediante reacciones catalíticas bajo altas presiones y temperaturas [10]. La reacción principal es: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ (Fórmula 6)

El CO producido se somete a una reacción de desplazamiento de agua-gas (WGS) para generar más hidrógeno: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ (Fórmula 7)

Este método es ampliamente utilizado debido a su eficiencia y a la disponibilidad de gas natural como fuente de metano. Aunque la producción de metanol a partir de gas natural es

eficiente, es un proceso que consume mucha energía y tiene un impacto considerable en las emisiones de GEI. En respuesta a las crecientes preocupaciones ambientales y la necesidad de reducir la huella de carbono, se están desarrollando métodos alternativos de producción de metanol que utilizan fuentes de energía renovable. Entre estos métodos alternativos se destaca la producción de metanol a partir de biomasa, residuos agrícolas y forestales, así como la utilización de CO₂ capturado y agua en un proceso conocido como la economía circular del carbono [13].

La producción de metanol a partir de biomasa implica la gasificación de materiales orgánicos para producir gas de síntesis, que luego se convierte en metanol mediante reacciones catalíticas. Este proceso, no sólo reduce las emisiones de GEI, sino que también aprovecha residuos que de otro modo se quemarían o se desecharían, contribuyendo así a la sostenibilidad y la economía circular. Además, la captura y utilización de CO₂ en la producción de metanol ofrece una solución para reducir las emisiones de CO₂ industriales, cerrando el ciclo del carbono y proporcionando un combustible renovable y sostenible [9].

Otro método actualmente prometedor para la producción de metanol es la electrólisis del agua para producir hidrógeno verde, que luego se combina con CO₂ capturado. Esta alternativa utiliza electricidad generada a partir de fuentes renovables, como la solar y la eólica, para producir hidrógeno, que luego se combina con CO₂ en una reacción catalítica para formar metanol. Este método no sólo es sostenible, sino que también ofrece una solución para el almacenamiento de energía renovable, convirtiendo el exceso de electricidad en un combustible líquido fácilmente almacenable y transportable [8].

Sin embargo, la producción de metanol utilizando energías renovables presenta desafíos técnicos y económicos significativos, relativos a la infraestructura necesaria para la electrólisis y la captura de CO₂, pues debe competir con los métodos tradicionales. Además, la integración de estas tecnologías en las cadenas de suministro existentes requiere una inversión considerable y una reestructuración de la infraestructura industrial. La producción de hidrógeno verde mediante electrólisis, por ejemplo, requiere grandes cantidades de electricidad, y la captura de CO₂ es un proceso costoso que aún está en desarrollo [10].

Esta instalación (Figura 4) utiliza energía eólica y solar para generar la electricidad requerida en la producción de hidrógeno. El hidrógeno, combinado con el CO₂ derivado de la

biomasa, se convierte en metanol verde, el cual está listo para ser transportado y utilizado.

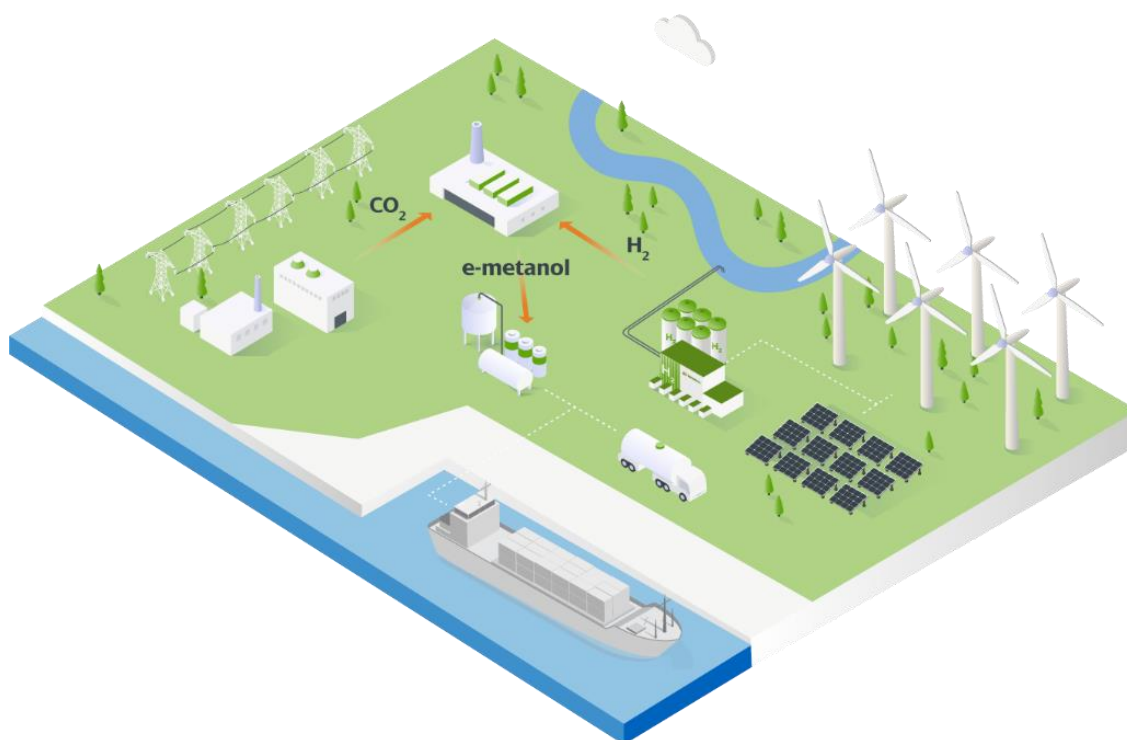


Figura 4. Representación gráfica de una planta de metanol verde. Fuente: [28]

La transición hacia métodos de producción de metanol más limpios y sostenibles es crucial para cumplir con los objetivos globales de reducción de emisiones y combatir el cambio climático. Las ayudas para la investigación y el desarrollo, así como los incentivos fiscales para la adopción de tecnologías limpias, pueden acelerar la transición hacia una producción de metanol más sostenible [9].

En conclusión, la producción de metanol mediante métodos sostenibles representa una oportunidad significativa para reducir las emisiones de GEI y avanzar hacia una economía más verde. Aunque existen desafíos técnicos y económicos, la investigación y el desarrollo continuo, junto con el apoyo de políticas gubernamentales, pueden superar estas barreras. La industria marítima, junto con otras industrias dependientes de combustibles fósiles, tiene mucho que ganar al adoptar el metanol verde como una alternativa viable y sostenible. La implementación exitosa de estas tecnologías puede servir como un modelo para otras industrias, demostrando que es posible combinar el crecimiento económico con la sostenibilidad ambiental [13].

La Tabla 3 presenta una comparativa entre las propiedades del amoníaco y metanol; destaca cómo, a pesar de sus diferencias en estado físico, aplicaciones, y manejo, ambos

compuestos presentan oportunidades para contribuir a una economía más sostenible, a través de su uso como combustibles alternativos, y su producción mediante tecnologías más limpias.

Aspecto	Amoníaco	Metanol
Fórmula Química	NH ₃	CH ₃ OH
Estado Físico a Temperatura Ambiente	Gas (a presión atmosférica)	Líquido
Producción Principal	Reformado de gas natural o gasificación del carbón	Reformado de gas natural o gasificación del carbón
Aplicaciones Principales	Fertilizantes, refrigeración industrial, procesos químicos [24]	Solventes, aditivos en combustibles, productos químicos, y como combustible alternativo
Uso como Combustible	Sí, emergente en la industria marítima	Sí, en la industria y como alternativa en transporte
Ventajas Ambientales	Reducción de emisiones de CO ₂ cuando se usa como combustible y se produce con energía renovable	Puede reducir emisiones si se produce a partir de biomasa o con energía renovable
Almacenamiento	Se almacena como líquido a baja temperatura o a alta presión [24]	Se almacena a temperatura ambiente en forma líquida [29]
Toxicidad	Alta: Puede causar daño a los tejidos y ser corrosivo [22]	Menor en comparación con el amoníaco, pero aún tóxico y puede causar efectos adversos en grandes cantidades [30]
Corrosividad	Alta: Corrosivo para metales y materiales comunes [23]	Menor corrosividad en comparación con el amoníaco, pero puede afectar ciertos materiales con el tiempo [31]
Costos de Producción	Relativamente bajo debido a la infraestructura existente para fertilizantes [26]	Varía dependiendo del método; producción a partir de energía renovable puede ser más costosa
Tecnología de Uso	Tecnología establecida y en uso para diversos fines industriales y agrícolas	Tecnología en desarrollo para aplicaciones como combustible en el transporte y en sistemas de energía

Tabla 3. Tabla comparativa entre amoníaco y metanol. Fuente: elaboración propia

Ahora, vamos a examinar en detalle cómo se está utilizando el metanol en la industria marítima. Este análisis incluirá tanto su implementación actual como el potencial futuro del metanol como una opción de combustible en el sector. Exploraremos los beneficios y desafíos asociados con su uso, así como las iniciativas y desarrollos recientes que están dando forma a su adopción en el transporte marítimo.

2.2.2 Uso del Metanol en la Industria Marítima

El uso del metanol como combustible en la industria marítima está siendo impulsado por varias iniciativas a nivel global que buscan fomentar su adopción y superar los desafíos asociados. Estas iniciativas incluyen proyectos piloto, colaboraciones entre industrias, y esfuerzos de regulación y política. A continuación, se detallan las principales iniciativas y su impacto en la adopción del metanol en el sector marítimo.

La naviera Viking Line [32] ha sido pionera en el uso de metanol como combustible para sus ferris. El M/S Viking Grace, en servicio desde 2013, fue uno de los primeros barcos de pasajeros en operar con metanol. En 2021, Viking Line también lanzó el M/S Viking Glory, que continúa con el uso de metanol y demuestra la viabilidad de esta tecnología en una flota comercial. Estos proyectos han demostrado la viabilidad técnica y operativa del metanol como combustible marino. La experiencia acumulada proporciona datos valiosos sobre el rendimiento del metanol en condiciones reales de operación [33].

El proyecto METHAPU (*Methanol as a Fuel for the Marine Industry*) es una iniciativa financiada por la Unión Europea que busca desarrollar y demostrar la viabilidad del metanol como combustible marino. Incluye la colaboración de varios socios industriales y académicos para investigar y optimizar el uso de metanol en la industria marítima. Este proyecto tiene como objetivo proporcionar pruebas de concepto y estudios de caso que apoyen la adopción del metanol. Los resultados se utilizan para influir en políticas y regulaciones relacionadas con los combustibles marítimos [34].

Diversas alianzas y asociaciones industriales están trabajando para promover el uso del metanol en la industria marítima. Un ejemplo es la colaboración entre Methanex Corporation [35], un importante productor de metanol, y varias compañías navieras para explorar y expandir el uso del metanol como combustible. Estas asociaciones facilitan el intercambio de conocimientos, el desarrollo de tecnología y la creación de infraestructura necesaria para el suministro y almacenamiento de metanol. La cooperación entre productores, armadores y operadores ayuda a superar barreras tecnológicas y económicas [36].

Se están desarrollando y ampliando instalaciones para el almacenamiento y suministro de metanol en puertos clave alrededor del mundo. Estos desarrollos incluyen tanques de almacenamiento específicos y sistemas de distribución para facilitar el abastecimiento de metanol a los barcos. La expansión de la infraestructura de suministro es esencial para la adopción generalizada del metanol como combustible marítimo, pues mejora la accesibilidad y reduce los costos asociados con su uso. Como ejemplo en nuestro país la colaboración entre Cepsa [37] y A.P. Moller – Maersk [38], conlleva la instalación de la mayor planta de metanol verde en Europa, con una capacidad de producción anual proyectada de 300.000 toneladas. Se estima que la planta contribuirá a la reducción de hasta un millón de toneladas de emisiones de CO₂. La planta comenzara producción en 2028 [39].

Los fabricantes de motores están desarrollando y adaptando tecnologías para hacer que los motores marinos sean compatibles con el metanol. Esto incluye la modificación de motores existentes y la creación de nuevos diseños, que optimicen el rendimiento del metanol. Como el caso de la compañía Wärtsilä [40] con su motor Wärtsilä 32 (Figura 5), fruto de su desarrollo en los motores alimentados con metanol que han impulsado el ferry Stena Line Stena Germanica desde 2015 [41].

Motor Wärtsilä 32

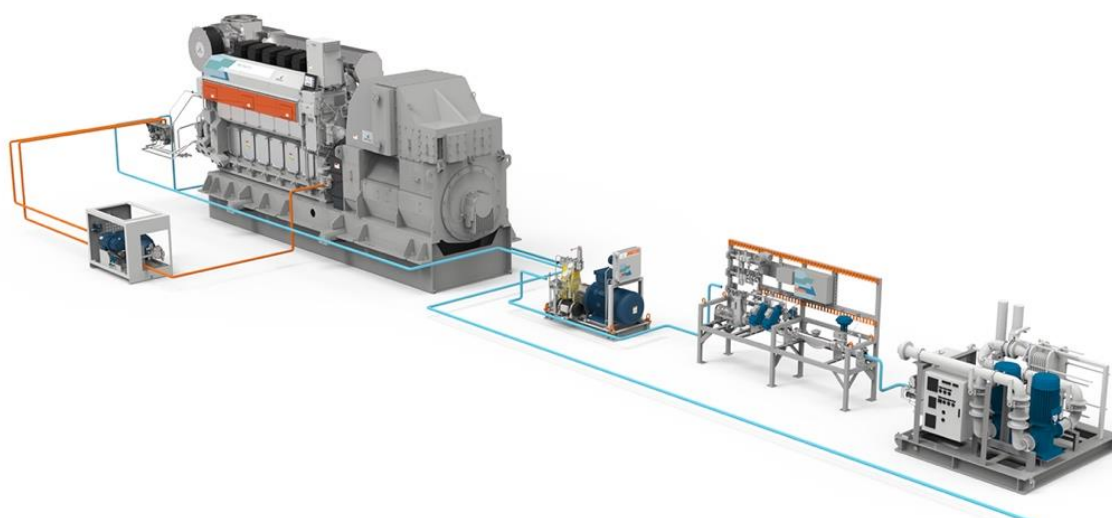


Figura 5. Motor Wärtsilä 32. Fuente [42]

A continuación, vamos a dirigir nuestra atención al hidrógeno como combustible. Exploraremos sus características, ventajas y desafíos en el contexto de la industria marítima. Este análisis incluirá una revisión detallada de cómo el hidrógeno puede ser utilizado para reducir las emisiones y contribuir a la descarbonización del transporte marítimo. También

examinaremos las tecnologías emergentes y los desarrollos recientes en el uso del hidrógeno como una alternativa viable y sostenible a los combustibles tradicionales.

2.3 Hidrógeno

2.3.1 Producción de Hidrógeno

La producción de hidrógeno ha ganado una atención significativa en los últimos años, debido a su potencial para descarbonizar múltiples sectores, incluida la industria marítima. El hidrógeno se puede producir a través de varios métodos, siendo los más comunes la reformación de gas natural y la electrólisis del agua. La reformación de gas natural es actualmente el método más utilizado debido a su costo relativamente bajo y alta eficiencia. Sin embargo, este proceso emite una cantidad considerable de dióxido de carbono, lo que contrarresta los beneficios ambientales del uso de hidrógeno como combustible [8].

Se presentarán los diferentes tipos de producción de hidrógeno, cuya denominación se relaciona con sus emisiones; así encontramos el hidrógeno gris, hidrógeno azul, hidrógeno turquesa e hidrógeno verde.

El hidrógeno gris se obtiene a partir de combustibles fósiles, como el metano o el carbón, mediante procesos como el reformado con vapor o la gasificación: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ (Fórmula 8). Esta producción genera grandes cantidades de CO_2 , por lo que el hidrógeno gris no es una solución viable para lograr emisiones netas cero [12]. Para su producción lo más común es emplear el proceso SMR. El metano (CH_4), principal componente del gas natural se mezcla con vapor de agua (H_2O) y se somete a altas temperaturas (700-1.000 °C) en un reactor con un catalizador de níquel. En la reacción principal se produce hidrógeno y CO [43]:

En la reacción secundaria: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ (Fórmula 9). El monóxido de carbono se convierte en CO_2 e hidrógeno:

Este proceso genera grandes cantidades de CO_2 , ya que el monóxido de carbono y el dióxido de carbono se liberan como subproductos.

El hidrógeno azul, es similar al hidrógeno gris en su proceso de producción, e incorpora la captura y almacenamiento de CO_2 para mitigar las emisiones. Aunque reduce significativamente el CO_2 liberado, en comparación con el hidrógeno gris, aún no cumple con el objetivo de emisiones netas cero y depende de tecnologías de captura que no están completamente desarrolladas a escala comercial. [44].

El hidrógeno turquesa, es producido a través de la pirólisis del metano, que convierte el carbono en un sólido (carbono negro) en lugar de liberarlo como CO₂. Aunque es una opción prometedora, y puede ser más fácil de manejar en términos de almacenamiento del carbono, esta tecnología aún se encuentra en una fase piloto, y no está ampliamente implementada. [44].

Entre las distintas formas de hidrógeno, el hidrógeno verde, producido a partir de energía renovable, es el más adecuado para una transición energética sostenible. La electrólisis del agua con electricidad renovable es la tecnología más consolidada para obtener hidrógeno verde [44].

La Tabla 4 ofrece una visión detallada y comprensiva de los distintos tipos de hidrógeno, especificando los métodos empleados para su producción, así como las fuentes de energía asociadas a cada uno de ellos. Cada tipo de hidrógeno tiene características particulares que influyen en su sostenibilidad y viabilidad económica.

Tipo de Hidrógeno	Proceso de Producción	Fuentes de Energía	Características
Hidrógeno Gris	Reformado con vapor de metano (SMR)	Gas natural	Alta emisión de CO ₂ ; no adecuado para descarbonización total.
Hidrógeno Azul	Reformado con vapor de metano (SMR) + Captura y almacenamiento de CO ₂	Gas natural	Emisiones reducidas con CCS; aún no alcanza emisiones netas cero.
Hidrógeno Turquesa	Pirólisis del metano	Gas natural	Convierte carbono en sólido; menor emisión de CO ₂ ; aún en fase piloto.
Hidrógeno Verde	Electrólisis del agua usando electricidad renovable	Energías renovables (solar, eólica, hidroeléctrica)	Sin emisiones de CO ₂ ; ideal para una transición sostenible.

Tabla 4. Tabla comparativa entre Hidrógeno Gris, Hidrógeno Azul, Hidrógeno Turquesa e Hidrógeno Verde. Fuente: elaboración propia

En contraste, la electrólisis del agua, que descompone el agua en oxígeno e hidrógeno utilizando electricidad, puede ser completamente limpia si se utiliza energía renovable. Este método, aunque más costoso y menos eficiente actualmente, está viendo una rápida evolución tecnológica y reducción de costos, gracias a la inversión en energías renovables y la economía del hidrógeno. La producción de hidrógeno verde, a partir de la electrólisis con energía eólica

o solar, es una de las vías más prometedoras para lograr una verdadera descarbonización del sector energético [45].

Además de estos métodos principales, también se están explorando técnicas avanzadas como la gasificación de biomasa y el uso de fotocatalizadores para producir hidrógeno de manera más sostenible. La gasificación de biomasa convierte materiales orgánicos en hidrógeno y otros productos químicos útiles, mientras que los fotocatalizadores utilizan la luz solar para acelerar la reacción de descomposición del agua. Estos métodos, aunque todavía en etapas experimentales, tienen el potencial de ofrecer rutas adicionales para la producción de hidrógeno con bajas emisiones de carbono [46].

La gasificación de biomasa implica la descomposición térmica de materiales orgánicos en condiciones controladas para producir gas de síntesis, una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Este gas de síntesis puede ser procesado para separar el hidrógeno, ofreciendo una fuente renovable de este combustible. Este proceso aprovecha residuos agrícolas y forestales, contribuyendo a una economía circular y reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles [13].

Por otro lado, los fotocatalizadores representan una tecnología emergente que utiliza materiales semiconductores para promover la reacción de descomposición del agua bajo la luz solar. Este enfoque imita el proceso de fotosíntesis natural, y tiene el potencial de convertir la energía solar directamente en hidrógeno, sin emisiones de carbono. Aunque aún está en etapas de investigación y desarrollo, los avances en materiales y eficiencia de los fotocatalizadores podrían hacer de esta una opción viable en el futuro [10].

A continuación, abordaremos en detalle el uso del hidrógeno en la industria marítima, un área de creciente interés y desarrollo, debido a la necesidad urgente de reducir las emisiones de GEI, y avanzar hacia una navegación más sostenible.

2.3.2 Uso del Hidrógeno en la Industria Marítima

El uso del hidrógeno, como combustible en la industria marítima, representa una de las alternativas más prometedoras para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El hidrógeno puede ser utilizado en celdas de combustible para generar electricidad a bordo de los buques, eliminando así las emisiones de CO₂ y otros contaminantes asociados con los combustibles fósiles tradicionales. Esta tecnología permite una operación limpia y eficiente, con la única emisión de agua como subproducto [9].

Uno de los mayores desafíos para la adopción del hidrógeno en la industria marítima es la infraestructura necesaria para su almacenamiento y distribución. La Tabla 5 compara la densidad volumétrica del hidrógeno con el fuel y gasoil marino, poniendo en evidencia que el hidrógeno tiene una densidad volumétrica más baja que los combustibles fósiles, lo que implica que se requieren tanques de almacenamiento más grandes, o sistemas de almacenamiento a alta presión o en forma líquida, los cuales presentan desafíos técnicos y de seguridad. A pesar de estos obstáculos, se están desarrollando soluciones innovadoras, como los tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido y los sistemas de hidruros metálicos, para mejorar la viabilidad de su uso en el transporte marítimo. [47].

Combustible	Densidad Volumétrica (a presión atmosférica y temperatura ambiente) kg/m³	Comentarios
Hidrógeno (gaseoso)	0.0899	Muy baja; el hidrógeno gaseoso es menos denso que el aire. Requiere compresión o licuefacción para su almacenamiento eficiente.
Hidrógeno (líquido)	70.85	Alta densidad en estado líquido, pero requiere almacenamiento a bajas temperaturas (-253°C).
Fuel Marinos (Bunker Fuel)	900-1050	Mucho más denso que el hidrógeno en estado gaseoso; comúnmente usado debido a su alta densidad y energía por volumen. Incluye residuos pesados de petróleo, muy denso y sucio, utilizado ampliamente en la industria marítima.
Gasoil Marino (Marine Diesel)	850-880	Similar al fuel marino respecto a densidad y energía por volumen con respecto al hidrógeno. Usado comúnmente en aplicaciones marítimas, con alta densidad volumétrica.

Tabla 5. Tabla que compara la densidad volumétrica del hidrógeno con el fuel y gasoil marino. Fuente: elaboración propia

Una planta moderna de producción de hidrógeno (Figura 5) utiliza tecnología avanzada para transformar energía renovable en hidrógeno limpio, una alternativa prometedora a los combustibles fósiles en múltiples aplicaciones, incluyendo el transporte marítimo. La primera etapa en la producción de hidrógeno es la generación de electricidad a partir de fuentes renovables. En una planta de hidrógeno verde, la energía necesaria para el proceso de

electrólisis proviene de recursos como [48]: Paneles Solares, Turbinas Eólicas y Energía Hidráulica.

Estas fuentes aseguran que el hidrógeno producido sea totalmente libre de emisiones de carbono, contribuyendo a una reducción significativa de la huella ambiental. Con esta electricidad se realiza la electrólisis del agua. En este proceso, el agua (H_2O) se divide en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) utilizando electricidad [49]. Después de la electrólisis, el hidrógeno producido es un gas que debe ser comprimido y almacenado para su uso efectivo.

Se comprime el hidrógeno al aumentar la presión del hidrógeno gaseoso, facilitando su almacenamiento en tanques de alta presión [50]. Estos compresores permiten almacenar el hidrógeno a presiones de hasta 700 bar. Alternativamente, el hidrógeno puede ser almacenado en forma líquida, lo cual requiere una unidad de licuefacción para enfriarlo a temperaturas criogénicas ($-253^{\circ}C$), mejorando la densidad volumétrica, lo que facilita su transporte y almacenamiento en grandes cantidades [51].

El último componente, es el sistema de distribución, que incluye tuberías y estaciones de carga, para permitir el transporte del hidrógeno, desde la planta hasta los usuarios finales, tales como estaciones de servicio de hidrógeno para vehículos o puertos marítimos para aplicaciones industriales.



Figura 5. Planta de producción de hidrógeno verde. Fuente [52]

Un ejemplo notable de una planta de producción de hidrógeno verde es la instalación de Air Products en Alemania [53], una de las más grandes dedicadas a dicha producción. La planta utiliza energía solar y eólica para alimentar el proceso de electrólisis, produciendo hidrógeno para diversas aplicaciones industriales y de transporte. Con una capacidad de producción significativa, la planta no sólo demuestra la viabilidad del empleo de la tecnología existente, sino que también establece un precedente para futuras y potenciales instalaciones a nivel mundial.

Las plantas de producción de hidrógeno están en el centro de la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. Utilizando electricidad renovable para realizar la electrólisis del agua, estas instalaciones producen hidrógeno limpio que puede ser utilizado como combustible en diversas aplicaciones. La integración de tecnologías avanzadas en generación de energía, electrólisis, almacenamiento y distribución es crucial para superar los desafíos asociados con el hidrógeno y avanzar hacia un futuro descarbonizado [54].

El desarrollo de motores y sistemas de propulsión, específicamente diseñados para utilizar hidrógeno, es otro aspecto crucial. Los fabricantes de motores marinos están investigando y desarrollando motores de combustión interna adaptados para quemar hidrógeno, así como celdas de combustible de alta eficiencia. Estos desarrollos tecnológicos son esenciales para garantizar que el hidrógeno pueda ser utilizado de manera segura y eficiente en las condiciones exigentes del entorno marítimo [13].

Como ejemplo tenemos a la empresa *MAN Energy Solutions* [55], que está desarrollando motores marinos que utilizan hidrógeno como combustible para apoyar la descarbonización del transporte marítimo. Esta innovación es clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector. La Tecnología de Motores de Hidrógeno de MAN tiene dos caminos bien definidos; por un lado, están modificando sus motores de combustión interna para funcionar con hidrógeno, que incluyen ajustes en los sistemas de inyección y combustión, para manejar las propiedades del hidrógeno. Por otro lado, la tecnología de ciclo dual permite que los motores operen con una mezcla de hidrógeno y combustibles tradicionales, facilitando una transición gradual hacia el uso exclusivo de hidrógeno [56].

2.4 Impacto Medioambiental de los Combustibles Tradicionales

En este capítulo, abordaremos el impacto medioambiental de los combustibles tradicionales utilizados en la industria y el transporte. Los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural han sido la columna vertebral de la economía global durante más de

un siglo. Sin embargo, su uso extensivo ha generado una serie de problemas medioambientales significativos que ponen en peligro la sostenibilidad del planeta.

2.4.1 Emisiones de CO₂ y Otros Contaminantes

Los combustibles fósiles tradicionales, como el fueloil y el diésel marino, son ampliamente utilizados en la industria marítima, debido a su disponibilidad y bajo costo. Sin embargo, su uso genera una cantidad considerable de emisiones de CO₂, que contribuyen al cambio climático global. Además del CO₂, estos combustibles emiten otros contaminantes nocivos, incluidos los SO_x y los NO_x, que tienen graves efectos sobre la calidad del aire y la salud pública [9].

El CO₂ es el principal gas de efecto invernadero liberado durante la combustión de combustibles fósiles. Este gas atrapa el calor en la atmósfera, lo que conduce al calentamiento global, y a cambios climáticos extremos. La industria marítima, al ser una de las principales consumidoras de combustibles fósiles, contribuye significativamente a estas emisiones. Se estima que el sector es responsable de aproximadamente el 3% de las emisiones globales de CO₂ [57], lo que subraya la necesidad urgente de buscar alternativas más limpias [58].

Además del CO₂, los combustibles fósiles liberan SO_x y NO_x, que son precursores del *smog* [59] y la lluvia ácida. Estos contaminantes pueden causar problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares y otros problemas de salud en las poblaciones expuestas. La lluvia ácida, resultante de la combinación de SO_x y NO_x con la humedad atmosférica, puede dañar los ecosistemas acuáticos y forestales, deteriorar edificios y monumentos y contaminar fuentes de agua potable [60].

El uso continuado de combustibles fósiles también implica la emisión de partículas finas y compuestos orgánicos volátiles (COV), que agravan la contaminación del aire y tienen efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente. Las partículas finas, en particular, pueden penetrar profundamente en los pulmones y el sistema cardiovascular, causando enfermedades graves y aumentando la mortalidad prematura [61].

La mitigación de estos impactos requiere una transición hacia combustibles alternativos más limpios y la implementación de tecnologías de reducción de emisiones. Las medidas como el uso de sistemas de depuración de gases de escape y la adopción de combustibles con bajo contenido de azufre son pasos iniciales muy importantes. Sin embargo, para lograr una reducción sustancial y duradera de las emisiones, es esencial avanzar hacia el uso de

combustibles como el hidrógeno, el amoníaco y el metanol, que ofrecen un perfil de emisiones mucho más limpio y sostenible [46], como se ha comentado en los apartados previos.

A continuación, abordaremos en detalle las regulaciones medioambientales. Estas normativas son esenciales para controlar y mitigar el impacto negativo de diversas actividades humanas sobre el medio ambiente.

2.4.2 Regulaciones Medioambientales

Las regulaciones medioambientales juegan un papel crucial en la reducción de las emisiones de la industria marítima, y en la promoción de prácticas más sostenibles. La OMI ha establecido varias normas y directrices destinadas a controlar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y otros contaminantes provenientes de los buques. Entre estas regulaciones destaca el Anexo VI del Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL), que establece límites estrictos para las emisiones de SO_x, NO_x y partículas [62].

La OMI ha establecido una normativa ambiciosa y crucial para abordar el cambio climático y reducir las emisiones de GEI provenientes del sector marítimo. La meta principal de esta nueva normativa es alcanzar una reducción total de las emisiones de GEI para el año 2050. Este objetivo se enmarca en una serie de medidas progresivas que buscan transformar el transporte marítimo hacia prácticas más sostenibles y ambientalmente responsables [1].

La normativa de la OMI incluye varias estrategias y regulaciones clave, como la implementación de nuevas tecnologías energéticamente eficientes, la transición a combustibles más limpios y la adopción de prácticas operativas optimizadas. Además, la normativa establece áreas de control de emisiones (ECAs, por sus siglas en inglés) donde se aplican restricciones más estrictas sobre las emisiones de SO_x, NO_x y otras partículas contaminantes. Estas áreas buscan proteger regiones marinas y costeras particularmente vulnerables a la contaminación atmosférica [1].

Un componente esencial de esta normativa es la introducción del Índice de Eficiencia Energética para Buques Existentes (EEXI) y el Indicador de Intensidad de Carbono (CII), que tienen como objetivo mejorar la eficiencia energética de los buques y reducir su huella de carbono. Estos índices proporcionan métricas claras y estándares a los que deben adherirse las embarcaciones para cumplir con las metas de reducción de emisiones establecidas por la OMI [1].

Además de estos aspectos técnicos y operativos, la normativa de la OMI promueve la cooperación internacional y el desarrollo de capacidades en países en desarrollo para asegurar una implementación efectiva y equitativa de las nuevas regulaciones. La transición hacia un transporte marítimo sin emisiones no solo depende de la regulación estricta sino también de la innovación tecnológica y la colaboración global [1].

Las Zonas de Control de Emisiones (ECA, por sus siglas en inglés) son áreas marítimas específicas donde se aplican restricciones más estrictas sobre las emisiones de ciertos contaminantes atmosféricos provenientes de los buques, con el objetivo de reducir la contaminación del aire y proteger la salud humana y el medio ambiente. Estas áreas están definidas por la OMI y establecen límites estrictos sobre las emisiones de SO_x, NO_x, partículas y otros contaminantes.

En la Figura 6 podemos ver las zonas ECA actuales en color rojo [63]:

- Mar del Norte y el Mar Báltico (NECA/SECA)
 - Mar del Norte: Establecida como área de control de emisiones de SO_x en 2006 y de NO_x en 2021.
 - Mar Báltico: Similarmente, controla las emisiones de SO_x desde 2006 y de NO_x desde 2021.
 - Estas zonas requieren el uso de combustibles con bajo contenido de azufre o tecnologías equivalentes, como depuradores de gases de escape.
- Área de Control de Emisiones de América del Norte (ECA de América del Norte)
 - Incluye las costas de Estados Unidos y Canadá, establecida en 2012.
 - Regula las emisiones de SO_x, NO_x y partículas. Los buques que operan en esta área deben usar combustible con un contenido máximo de azufre del 0.10% o utilizar tecnologías de reducción de emisiones.
- Área de Control de Emisiones del Mar Caribe de los Estados Unidos (ECA del Caribe)
 - Establecida en 2014, cubre Puerto Rico y las Islas Vírgenes de EE.UU.
 - Similar a la ECA de América del Norte, impone límites estrictos sobre las emisiones de SO_x, NO_x y partículas.

- Potenciales Futuras ECA, las vemos en amarillo en la Figura 6 [63]:
 - Mar Mediterráneo [64]: El Mar Mediterráneo es una de las áreas marítimas más transitadas del mundo y enfrenta serios problemas de contaminación del aire. La designación de esta área como ECA podría reducir significativamente las emisiones de SOx y NOx, mejorando la salud pública y el medio ambiente en las naciones costeras.
 - Región del Mar de Japón: Japón, con su extensa costa y alta densidad de tráfico marítimo, se beneficia de una mayor regulación de las emisiones. Las futuras ECA en esta región podrían mitigar los impactos negativos de la contaminación del aire en áreas urbanas costeras.
 - Partes del Sudeste Asiático: Esta región experimenta un tráfico marítimo intensivo debido a sus numerosos puertos comerciales importantes. La designación de ECA aquí podría abordar las preocupaciones sobre la calidad del aire y la salud ambiental.

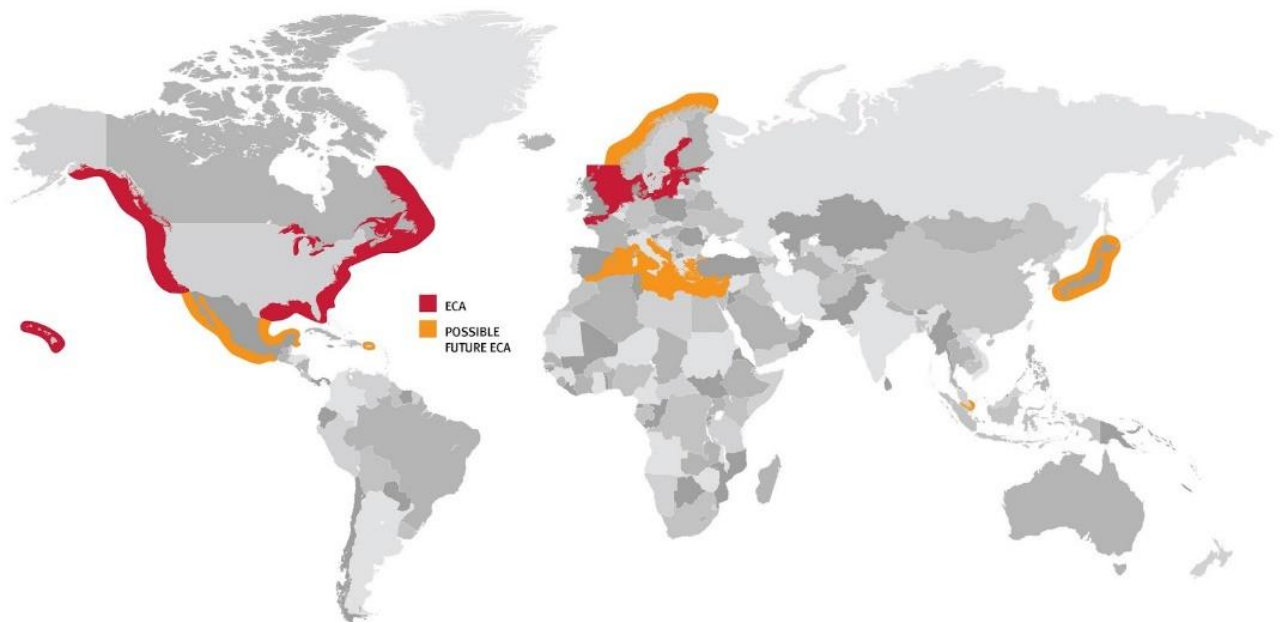


Figura 6. Mapa de zonas ECA y posibles zonas ECA en el futuro. Fuente [66]

Estas regulaciones no sólo buscan reducir las emisiones y proteger el medio ambiente, sino que también fomentan la innovación tecnológica y la adopción de prácticas más sostenibles en la industria marítima. La transición hacia combustibles alternativos y tecnologías limpias es impulsada en gran medida por estas políticas, que establecen un marco claro y obligatorio para el sector. Sin embargo, la implementación de estas regulaciones presenta desafíos

significativos, incluyendo el costo de cumplimiento y la necesidad de adaptar la infraestructura existente [8]

2.5 Comparación de Costos y Eficiencia entre Combustibles

La comparación de costos y eficiencia, entre los combustibles alternativos y los combustibles fósiles tradicionales, es crucial para evaluar la viabilidad de su adopción en la industria marítima. Los costos de producción, almacenamiento y distribución de combustibles alternativos como el hidrógeno, el amoníaco y el metanol varían significativamente, y su eficiencia energética también difiere en función de la tecnología y el contexto de uso [8].

El hidrógeno, por ejemplo, tiene una alta densidad energética en términos de peso, pero una baja densidad volumétrica, lo que plantea desafíos para su almacenamiento y transporte. La producción de hidrógeno mediante electrólisis es actualmente más costosa que la reformación de gas natural, pero esta brecha de costos se está reduciendo gracias a las mejoras tecnológicas y la expansión de las energías renovables. En términos de eficiencia, las celdas de combustible de hidrógeno son altamente eficientes, pero su implementación en la industria marítima requiere una infraestructura significativa [46].

El amoníaco, por otro lado, es más fácil de almacenar y transportar que el hidrógeno, y su producción puede ser más económica si se utilizan procesos sostenibles. Sin embargo, la eficiencia energética de los motores de combustión de amoníaco es generalmente menor que la de los motores diésel tradicionales. Además, el manejo seguro del amoníaco es crítico debido a su toxicidad. A pesar de estos desafíos, el amoníaco ofrece un perfil de emisiones significativamente más limpio, lo que lo convierte en una opción atractiva para la descarbonización del transporte marítimo [45].

El metanol presenta una solución intermedia, con una densidad energética y un costo de producción que se sitúan entre los del hidrógeno y el amoníaco. El metanol puede ser producido de manera renovable a partir de biomasa o CO₂ reciclado, lo que reduce su huella de carbono. Además, el metanol es compatible con los motores de combustión interna existentes, lo que facilita su adopción. No obstante, su eficiencia energética es menor en comparación con el hidrógeno y el amoníaco, y su combustión genera ciertas emisiones, aunque menores que las de los combustibles fósiles [8].

La Tabla 6 proporciona una comparación de hidrógeno, amoníaco, biometanol, fuel y diésel marinos en términos de coste de producción, densidad energética, densidad energética volumétrica, eficiencia energética y emisiones de CO₂.

COMPARACIÓN DE COSTOS Y EFICIENCIA

Combustible	Coste de Producción (€/GJ)	Densidad Energética (MJ/Kg)	Densidad Energética Volumétrica (MJ/L)	Eficiencia Energética (%)	Emisiones de CO ₂ (Kg/GJ)
Hidrógeno	10-20 [67]	120 [70]	8.5 (gas) [70]	30-40%	0 (si se produce con renovables) [67]
Amoníaco	15-25 [68]	18.6 [68]	11.5 [68]	30-40%	0 (si se produce con renovables) [68]
Metanol	15-30 [69]	19.9 [69]	15.8 [69]	50-60%	0 (si se produce con renovables) [69]
Fuel Marino	5-10 [71]	40.5 [72]	35.0 [72]	30-40%	77 [71]
Diésel Marino	8-15 [71]	42.6 [72]	38.2 [72]	35-45%	74 [71]

Tabla 6. Comparación de costos y eficiencias de los combustibles alternativos con el fuel y diésel marinos. Fuente: elaboración propia

Los combustibles alternativos como el hidrógeno, amoníaco y Metanol ofrecen ventajas significativas en términos de reducción de emisiones de CO₂, lo que es crucial para cumplir con los objetivos de sostenibilidad y cambio climático. Sin embargo, sus costes de producción y desafíos en almacenamiento y transporte requieren avances tecnológicos y de infraestructura. Los combustibles fósiles marinos, aunque más económicos y fáciles de manejar actualmente, tienen un impacto ambiental mucho mayor debido a sus altas emisiones de CO₂.

En el siguiente capítulo, presentaremos los hallazgos de este estudio comparativo. Analizaremos las emisiones generadas por cada tipo de combustible, evaluando su impacto ambiental y su contribución a la reducción de la huella de carbono de la industria marítima. Además, examinaremos la eficiencia de cada combustible, proporcionando una comprensión profunda de su rendimiento en términos de consumo energético y costos operativos.

3 **RESULTADOS**

Este capítulo presenta los hallazgos del estudio comparativo entre diferentes combustibles marinos en términos de emisiones y eficiencia. Los resultados obtenidos proporcionan una comprensión profunda del rendimiento de cada combustible en condiciones operativas y su impacto ambiental.

3.1 **Comparación de Emisiones**

Las emisiones de CO₂ son un indicador crucial para evaluar el impacto ambiental de los combustibles. La reducción de emisiones es fundamental para cumplir con los objetivos internacionales de sostenibilidad y descarbonización, como los establecidos por la OMI.

3.1.1 Motores que usan Amoníaco como combustible

El análisis de la literatura existente [73] sobre el uso de amoníaco como combustible en motores marinos, muestra que el amoníaco puede reducir significativamente las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. Al no contener carbono, el amoníaco no produce CO₂ durante su combustión, lo que lo convierte en una opción prometedora para la descarbonización del transporte marítimo. Esta característica hace del amoníaco una alternativa atractiva y sostenible para reducir la huella de carbono de la industria marítima [25]. Sin embargo, estudios revisados han revelado que la combustión de amoníaco puede generar emisiones de NO_x debido a las altas temperaturas requeridas para su ignición y combustión completa [9].

Para mitigar las emisiones de NO_x, se han explorado diversas tecnologías de reducción de emisiones, como los sistemas de recirculación de gases de escape (EGR) [74] y los catalizadores de reducción selectiva (SCR). Estas tecnologías han demostrado ser efectivas en la reducción de NO_x, aunque requieren una gestión cuidadosa y un mantenimiento regular para garantizar su eficiencia a lo largo del tiempo. Además, el diseño de los motores de amoníaco se ha optimizado en estudios para mejorar la mezcla de combustible y aire, reduciendo así las temperaturas de combustión y, en consecuencia, las emisiones de NO_x [13].

Otra preocupación importante destacada en la literatura es la formación de trazas de amoníaco no quemado, conocido como "*slip* de amoníaco" [75]. Este fenómeno puede ser problemático debido a la toxicidad del amoníaco y su impacto potencial en la salud humana y el medio ambiente. Las soluciones para minimizar el *slip* de amoníaco incluyen mejoras en el diseño de los sistemas de inyección, y la implementación de tecnologías de postcombustión que capturan y neutralizan el amoníaco no quemado, antes de su liberación al medio ambiente [46].

En términos de eficiencia energética, los motores de amoníaco han mostrado un rendimiento competitivo en comparación con los motores diésel, aunque la densidad energética más baja del amoníaco significa que se requiere un mayor volumen de combustible para generar la misma cantidad de energía [76]. Las pruebas de eficiencia en estudios han permitido optimizar la gestión del calor residual y mejorar la eficiencia térmica general del motor, lo que contribuye a un uso más efectivo del amoníaco como combustible marino [65].

3.1.2 Motores que usan metanol como combustible

El análisis de la literatura sobre el uso de metanol como combustible en motores marinos muestra resultados prometedores en la reducción de emisiones de gases contaminantes. El metanol, un alcohol simple, se quema de manera más limpia que los combustibles fósiles tradicionales, produciendo menos CO₂, SO_x y partículas [8]. Además, las emisiones de NO_x también son reducidas, especialmente cuando se utilizan tecnologías avanzadas de control de emisiones como los sistemas EGR y los SCR [10].

Los estudios han demostrado que los motores que usan metanol como combustible pueden operar de manera eficiente con modificaciones relativamente menores en comparación con los motores diésel tradicionales. Estas modificaciones incluyen ajustes en los sistemas de inyección de combustible y la incorporación de componentes resistentes a la corrosión, debido a la naturaleza del metanol [45]. La facilidad de almacenamiento y manejo del metanol también ha sido un factor positivo, ya que puede ser almacenado a temperatura ambiente y no requiere de sistemas de alta presión o criogénicos [14].

En términos de eficiencia energética, los motores que usan metanol han mostrado un rendimiento comparable al de los motores diésel, aunque con una densidad energética ligeramente inferior. Esto significa que se requiere un mayor volumen de metanol para producir la misma cantidad de energía que el diésel. Sin embargo, la menor producción de contaminantes y la mayor seguridad en el manejo compensan esta desventaja. Además, el metanol puede ser producido de manera renovable a partir de biomasa o residuos de CO₂, lo que añade un beneficio ambiental adicional al ciclo de vida del combustible [47].

Los análisis de emisiones han confirmado que el metanol produce significativamente menos emisiones de SO_x y partículas en comparación con el diésel marino. Esta reducción es crucial para mejorar la calidad del aire en áreas costeras y portuarias, donde las emisiones de los buques pueden tener un impacto significativo en la salud pública [65]. Además, el metanol

tiene un alto potencial para cumplir con las normativas ambientales más estrictas, como las establecidas por la OMI y las zonas ECA [46].

La implementación de motores de metanol en la industria marítima también ha sido facilitada por la existencia de infraestructuras de producción y suministro de metanol, que pueden ser adaptadas para uso marino [13]. Los estudios en condiciones reales de operación han demostrado que los buques equipados con motores de metanol pueden operar de manera fiable y eficiente en rutas comerciales [60].

3.1.3 Motores que usan hidrógeno como combustible

La revisión de la literatura sobre el uso de hidrógeno como combustible en motores marinos ha revelado su gran capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes en la industria marítima. El hidrógeno, al quemarse, no produce CO_2 ni SO_x , lo que lo convierte en un combustible muy atractivo para la descarbonización del transporte marítimo [47]. Además, las emisiones de NO_x pueden ser gestionadas de manera efectiva mediante el uso de tecnologías avanzadas como EGR y los SCR [46].

Uno de los principales desafíos en el uso de hidrógeno es su almacenamiento y manejo seguro debido a sus propiedades altamente inflamables y su baja densidad volumétrica. Los estudios han incluido la utilización de sistemas de almacenamiento de hidrógeno comprimido y líquido, así como tecnologías de hidruros metálicos que permiten un almacenamiento más seguro y eficiente. Estos sistemas han demostrado ser viables, aunque requieren de una infraestructura adecuada y procedimientos de seguridad estrictos para su implementación en buques [9].

En términos de eficiencia energética, los estudios han mostrado que los motores de combustión interna de hidrógeno verde pueden alcanzar niveles de eficiencia comparables a los de los motores diésel, con el beneficio adicional de producir cero emisiones de CO_2 . Además, las celdas de combustible de hidrógeno, que convierten el hidrógeno directamente en electricidad mediante una reacción electroquímica, han demostrado una eficiencia aún mayor, superando a la combustión interna en muchos casos [8]. Estas celdas de combustible ofrecen una operación silenciosa y libre de emisiones, lo que es especialmente beneficioso en aplicaciones sensibles al ruido y en áreas ambientalmente protegidas [13].

Los análisis de emisiones han confirmado que los motores que usan hidrógeno, tanto de combustión interna como de celdas de combustible, producen significativamente menos

contaminantes en comparación con los motores que utilizan combustibles fósiles. La principal emisión de los motores de hidrógeno es el vapor de agua, lo que contribuye a una mejora significativa en la calidad del aire en las áreas portuarias y costeras [10]. Sin embargo, la gestión de las emisiones de NOx sigue siendo un área de enfoque, y se están desarrollando y probando tecnologías adicionales para minimizar estos compuestos [14].

La adopción de hidrógeno como combustible marino requiere una inversión significativa en infraestructura, incluyendo estaciones de abastecimiento y sistemas de almacenamiento a bordo. Los estudios en condiciones reales de operación han demostrado que los buques equipados que usan como combustible el hidrógeno puede operar de manera eficiente y segura, siempre y cuando se implementen las medidas de seguridad adecuadas. La colaboración entre los fabricantes de motores, los proveedores de hidrógeno y los operadores de buques es crucial para desarrollar soluciones prácticas y escalables que permitan una transición hacia un transporte marítimo más limpio y sostenible [9].

En resumen, el hidrógeno como combustible representa una opción viable y eficiente para la industria marítima, ofreciendo una reducción significativa en las emisiones de contaminantes y contribuyendo a la descarbonización del sector [10].

Después de ver como los combustibles alternativos serán el camino para los nuevos motores de la industria marítima, vamos a estudiar su eficiencia energética.

3.2 Eficiencia Energética

Este capítulo presenta los resultados del análisis de la eficiencia energética de diversos combustibles utilizados en la industria marítima. La eficiencia energética es un factor crucial para determinar la viabilidad y sostenibilidad de estos combustibles. Además, se aborda el consumo de combustible y la autonomía de los buques, aspectos fundamentales para las operaciones marítimas.

3.2.1 Comparación de Rendimiento de los Combustibles

El rendimiento de los combustibles alternativos como el hidrógeno, el amoníaco y el metanol en la industria marítima se evalúa principalmente en términos de eficiencia energética y emisiones. La comparación de estos combustibles con los tradicionales, como el diésel, revela ventajas y desventajas específicas de cada uno.

El hidrógeno es reconocido por su alta densidad energética por peso, lo que permite una gran cantidad de energía con un volumen relativamente pequeño de combustible. Sin embargo, su baja densidad volumétrica presenta desafíos significativos para el almacenamiento a bordo de los buques. Los motores de hidrógeno, tanto de combustión interna como de celdas de combustible, han mostrado niveles de eficiencia comparables o superiores a los de los motores diésel tradicionales. Las celdas de combustible de hidrógeno, en particular, ofrecen una eficiencia energética del 40% al 60%, mientras que los motores de combustión interna de hidrógeno alcanzan eficiencias del 30% al 40% [9]. Estas celdas de combustible también tienen la ventaja adicional de producir solo vapor de agua como subproducto, eliminando las emisiones de CO₂ y otros contaminantes [77].

Comparando los valores de los indicadores, se concluyó que el hidrógeno verde es completamente sostenible tanto en términos de uso de energía como de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el hidrógeno verde puede ser más fácil de implementar económicamente que el azul, cuando el hidrógeno se produce localmente [78].

El amoníaco, por otro lado, presenta una densidad energética más baja en comparación con el hidrógeno y el diésel, lo que significa que se requiere un mayor volumen para la misma cantidad de energía. A pesar de esto, el amoníaco es relativamente fácil de almacenar y manejar, y su infraestructura de producción y suministro está bien establecida debido a su uso en la industria química. Los motores de amoníaco han demostrado eficiencias energéticas del 30% al 40%, similares a los motores de hidrógeno de combustión interna, pero con el desafío adicional de gestionar las emisiones de NO_x y el slip de amoníaco [9].

El metanol ofrece una densidad energética intermedia entre el hidrógeno y el amoníaco, y es más fácil de almacenar que el hidrógeno debido a su estado líquido a temperatura ambiente. Los motores que utilizan metanol han mostrado eficiencias energéticas del 35% al 45%, comparables a los motores diésel, con la ventaja de producir menos emisiones de SO_x y partículas. El metanol puede ser producido de manera renovable a partir de biomasa o CO₂ capturado, lo que añade un beneficio ambiental adicional [8].

Comparando estos combustibles, el hidrógeno se destaca por su alta eficiencia y cero emisiones de CO₂, aunque enfrenta desafíos significativos en términos de almacenamiento y manejo seguro. El amoníaco es una opción viable con una infraestructura de almacenamiento más fácil, pero requiere tecnologías adicionales para gestionar sus emisiones de NO_x y el slip de amoníaco. El metanol, con su facilidad de almacenamiento y manejo, y su capacidad de ser

producido de manera renovable, representa una solución intermedia con un buen equilibrio entre eficiencia energética y reducción de emisiones.

Con los datos expuestos en este TFG, se presenta como colofón de este bloque la Figura 7 que gráficamente nos muestra los datos analizados, para poder comparar el rendimiento de combustibles marinos.

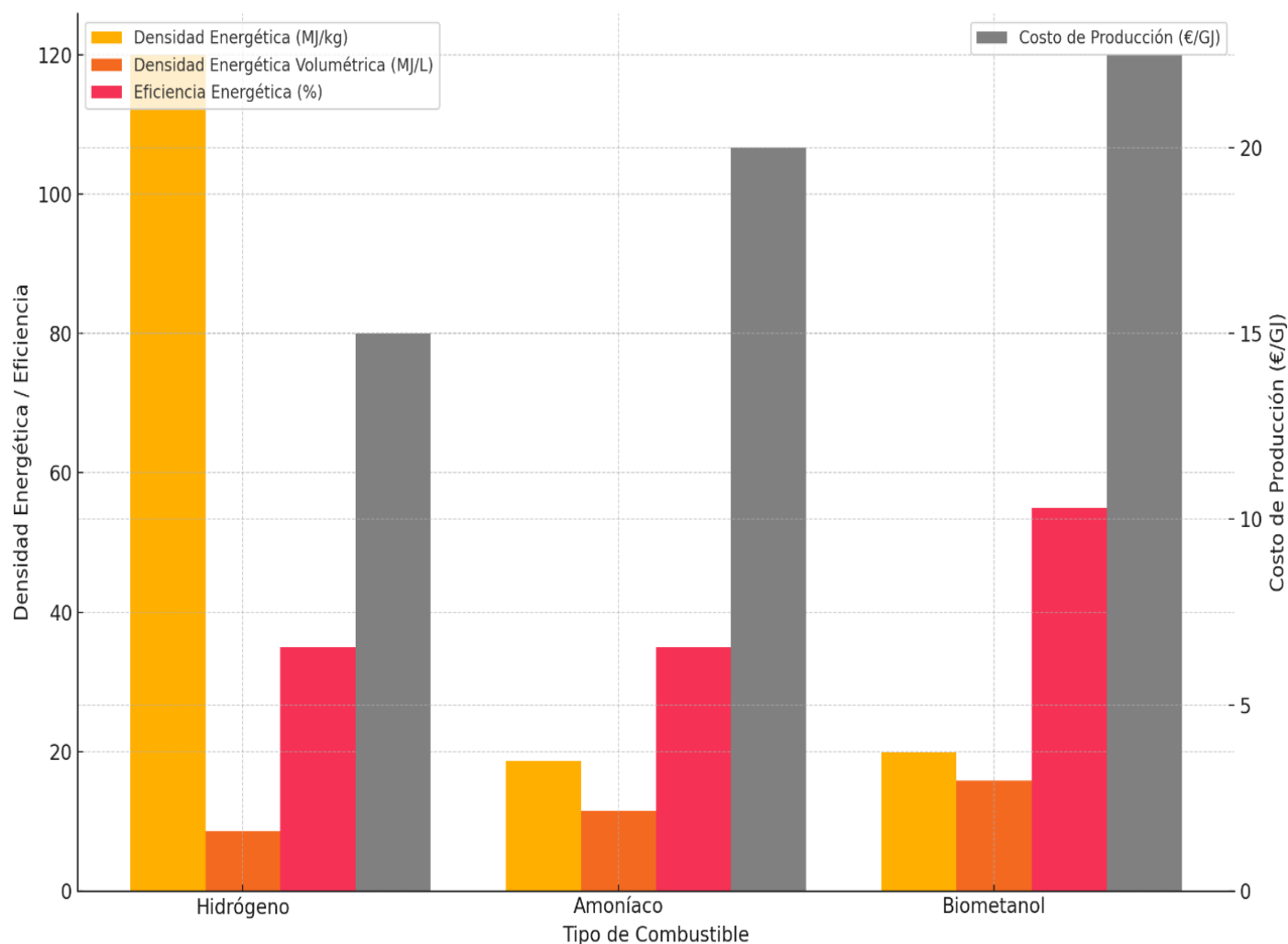


Figura 7. Comparación de rendimiento de combustibles marinos. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de las siguientes referencias [68, 69, 70, 76,77]

Viendo la Tabla podemos decir que el hidrógeno es atractivo por su alta densidad energética, pero su alto costo y baja densidad volumétrica presentan desafíos significativos. El amoníaco es una opción viable gracias a su equilibrio entre densidad energética y costos, junto con su infraestructura establecida para almacenamiento y transporte. Y el Biometanol se destaca por su alta eficiencia energética y bajo costo de producción, lo que podría posicionarlo como una opción preferible para aplicaciones donde la eficiencia y la economía son prioritarias.

En el siguiente capítulo hablaremos sobre el consumo y autonomía de los combustibles alternativos analizados en este TFG.

3.2.2 Consumo de Combustible y Autonomía

El consumo de combustible y la autonomía son factores críticos en la evaluación de la viabilidad de los combustibles alternativos en la industria marítima. La capacidad de un buque para operar de manera eficiente y mantener una autonomía adecuada, depende de la densidad energética del combustible, su eficiencia de combustión y la capacidad de almacenamiento a bordo.

El hidrógeno, a pesar de su alta densidad energética por peso, presenta desafíos significativos en términos de almacenamiento volumétrico. Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno comprimido o líquido requieren tanques grandes y robustos, lo que puede limitar el espacio disponible para la carga y afectar la autonomía del buque. Los estudios indican que los buques que utilizan hidrógeno como combustible pueden necesitar reabastecimientos más frecuentes en comparación con los que utilizan combustibles fósiles, a menos que se implementen soluciones de almacenamiento avanzadas como los hidruros metálicos [13].

El amoníaco, con una densidad energética más baja que el hidrógeno y el diésel, también enfrenta desafíos en términos de consumo y autonomía. Los motores de amoníaco requieren un mayor volumen de combustible para generar la misma cantidad de energía que los motores diésel, lo que puede reducir la autonomía del buque si no se dispone de espacio adicional para tanques de combustible más grandes. Sin embargo, la facilidad de almacenamiento y la infraestructura existente para el amoníaco son ventajas significativas que pueden mitigar algunos de estos desafíos [9].

El metanol, con una densidad energética intermedia, ofrece un equilibrio razonable entre eficiencia de combustión y capacidad de almacenamiento. Los buques que utilizan metanol pueden mantener una autonomía similar a la de los buques diésel, gracias a la mayor eficiencia de combustión del metanol y a su facilidad de almacenamiento. Además, el metanol es menos corrosivo que otros combustibles alternativos, lo que simplifica el diseño y el mantenimiento de los sistemas de almacenamiento y suministro a bordo [8].

El consumo de combustible y la autonomía también están influenciados por la eficiencia energética de los motores. Los motores que usan hidrógeno, tanto de combustión interna como de celdas de combustible, han demostrado eficiencias comparables o superiores a las de los motores diésel, lo que puede compensar parcialmente la necesidad de mayor espacio de

almacenamiento. Los motores de amoníaco y metanol, aunque tienen eficiencias ligeramente inferiores, todavía ofrecen mejoras significativas en términos de emisiones y sostenibilidad en comparación con los combustibles fósiles [10].

En la evaluación de la viabilidad de los combustibles alternativos, es crucial considerar no solo el consumo de combustible y la autonomía, sino también la disponibilidad de infraestructura de reabastecimiento y el apoyo regulatorio. Las políticas ambientales más estrictas y los incentivos gubernamentales pueden desempeñar un papel clave en la promoción de la adopción de combustibles alternativos, proporcionando los recursos y el apoyo necesarios para desarrollar la infraestructura de reabastecimiento y almacenamiento [14].

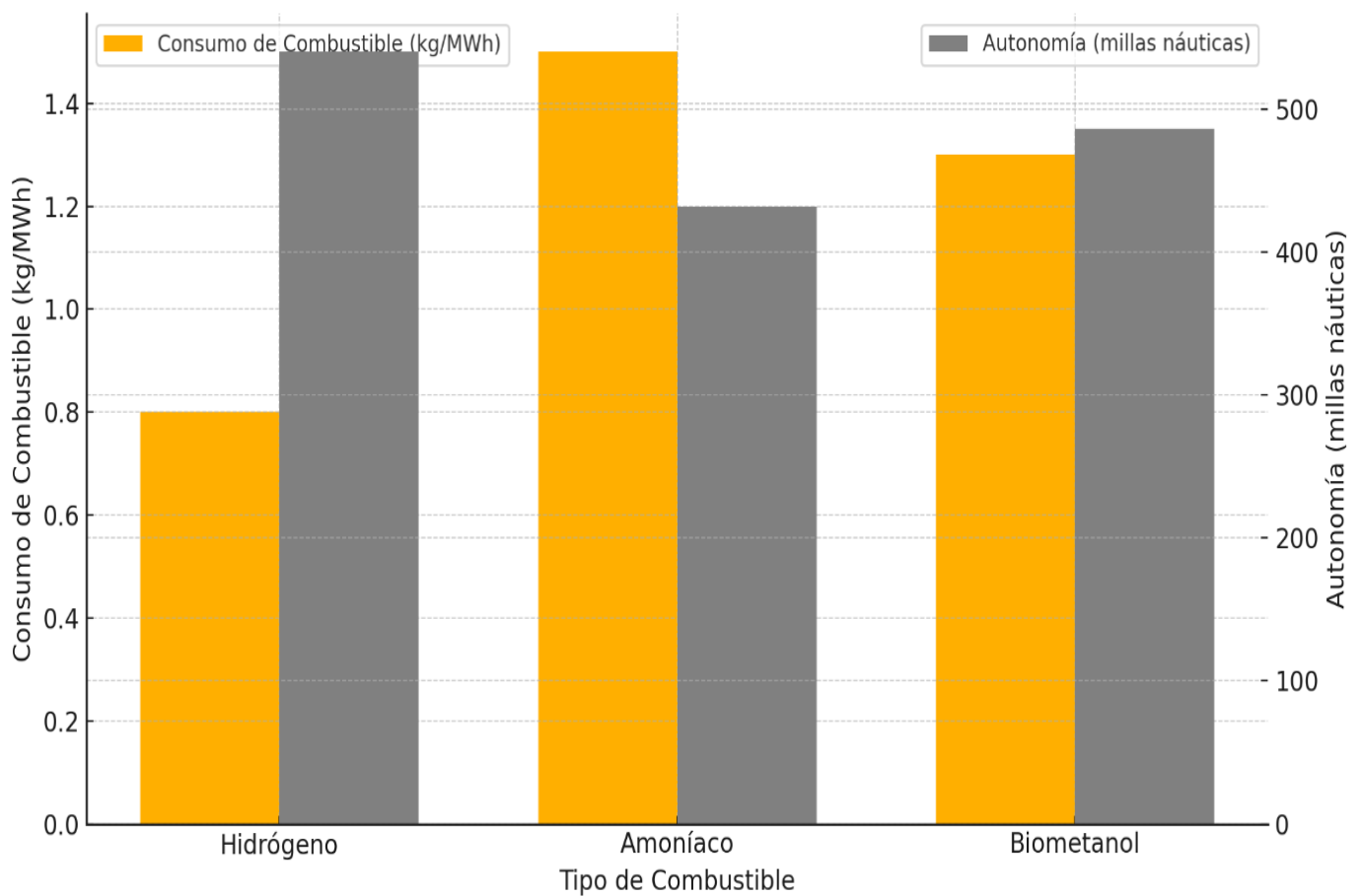


Figura 8. Consumo de combustible y autonomía de hidrógeno, amoníaco y biometanol. .
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de las siguientes referencias [19, 69, 70, 76, 77]

En conclusión, aunque cada combustible alternativo presenta desafíos y ventajas únicos, el hidrógeno, el amoníaco y el metanol ofrecen opciones viables para la descarbonización de la

industria marítima. La Figura 8 presenta una comparativa entre el consumo y autonomía de los combustibles alternativos analizados. En la cual podemos decir que el hidrogeno tiene un menor consumo de combustible que indica alta eficiencia energética, pero su baja autonomía debido a las dificultades de almacenamiento volumétrico presenta un desafío significativo para su uso en el transporte marítimo de larga distancia. El amoníaco combina un mayor consumo de combustible con una excelente autonomía, lo que sugiere su potencial para aplicaciones donde la capacidad de viajar largas distancias sin reabastecimiento es crucial. Asimismo, el biometanol, ofrece una buena combinación de eficiencia energética y autonomía, con ventajas en manejo y almacenamiento que pueden ser atractivas en aplicaciones prácticas.

4 DISCUSIÓN

Se analizarán tanto la capacidad de integración en la flota actual, como las innovaciones futuras necesarias para una adopción más amplia.

4.1 Viabilidad de los Combustibles Alternativos

La viabilidad de los combustibles alternativos como el hidrógeno, el amoníaco y el biometanol depende de múltiples factores que influyen en su adopción y uso efectivo en la industria marítima. Esta sección desglosa los aspectos económicos y técnicos que afectan su implementación.

4.1.1 Factores Económicos

La viabilidad económica de los combustibles alternativos en la industria marítima es un aspecto crucial que determina su adopción. Los factores económicos incluyen el costo de producción del combustible, la inversión en infraestructura de almacenamiento y suministro, los costos operativos y el impacto de las regulaciones ambientales y los incentivos gubernamentales.

El hidrógeno, a pesar de sus beneficios ambientales, enfrenta desafíos económicos significativos. La producción de hidrógeno mediante electrólisis es costosa, especialmente cuando se utiliza electricidad de fuentes renovables. Además, el almacenamiento y transporte del hidrógeno son caros debido a su baja densidad volumétrica y la necesidad de mantenerlo a alta presión o en estado líquido. Estas necesidades incrementan los costos operativos y de infraestructura. Sin embargo, con el avance de la tecnología y la escalabilidad de la producción de hidrógeno verde, se espera que los costos disminuyan. Los incentivos gubernamentales y las políticas de apoyo pueden jugar un papel crucial en la reducción de estos costos y en la promoción del hidrógeno como combustible marino.

Se anticipa que la transición inicial hacia el hidrógeno comenzará con su producción a partir de combustibles fósiles utilizando la infraestructura energética actual. Este enfoque servirá como una etapa intermedia en el camino hacia una economía completamente basada en hidrógeno. [79].

El amoníaco, por otro lado, tiene una infraestructura de producción y suministro más desarrollada debido a su uso extendido en la industria química. La producción de amoníaco es menos costosa en comparación con el hidrógeno, y su almacenamiento y transporte son más manejables. Los costos operativos de los motores de amoníaco son comparables a los de los motores diésel, aunque el amoníaco tiene una densidad energética menor, lo que puede

aumentar los costos de combustible debido a la mayor cantidad requerida. Las inversiones iniciales en infraestructura para motores de amoníaco y la adaptación de los buques existentes pueden ser elevadas, pero los costos a largo plazo pueden ser competitivos, especialmente con la introducción de tecnologías de reducción de NO_x y el manejo del *slip* de amoníaco.

No obstante, el uso del amoníaco como combustible marítimo enfrenta varios desafíos. Actualmente, el 80% de la producción de amoníaco se destina a fertilizantes, lo que dificulta y encarece su transición al uso como combustible. Además, la producción convencional de amoníaco a partir de combustibles fósiles genera grandes cantidades de CO₂, contrarrestando sus beneficios como combustible sin carbono, y el amoníaco verde aún no se produce a escala comercial significativa. Aunque el amoníaco puede almacenarse como líquido a temperatura ambiente bajo presión, necesita tanques de almacenamiento más grandes que los combustibles marinos convencionales. Esto se traduce en la necesidad de viajes más cortos o una capacidad de carga reducida, lo que demanda diseños innovadores de barcos. [79].

El metanol presenta una viabilidad económica intermedia. La producción de metanol a partir de biomasa o CO₂ capturado es relativamente costosa, pero las tecnologías están avanzando para hacerla más económica. El metanol es fácil de almacenar y manejar, lo que reduce los costos de infraestructura y operativos en comparación con el hidrógeno. Los motores de metanol pueden ser adaptados a partir de motores diésel existentes, lo que disminuye las inversiones iniciales. Además, el metanol tiene una densidad energética adecuada, lo que permite una autonomía similar a la de los combustibles fósiles, reduciendo así los costos operativos. Se ha comentado que: “Clasificado entre los cinco principales productos químicos producidos a nivel mundial, el metanol tiene una capacidad anual que supera los 95 millones de toneladas, con 20 millones de toneladas utilizadas como combustible o en mezclas de combustible” [80].

El alto volumen de producción de metanol subraya su potencial como una fuente de energía sostenible para el transporte marítimo. El metanol puede producirse a partir de combustibles fósiles como gas natural y carbón, así como de fuentes renovables como biomasa y residuos municipales. [79].

Las políticas y regulaciones gubernamentales también juegan un papel crucial en la viabilidad económica de los combustibles alternativos. Las ayudas, incentivos fiscales y las regulaciones ambientales estrictas pueden promover la adopción de combustibles más limpios. Por ejemplo, las regulaciones de la OMI sobre las emisiones de SO_x y NO_x, junto con las zonas

ECA, impulsan la necesidad de combustibles alternativos. Los gobiernos también pueden proporcionar fondos para la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias, así como para la construcción de infraestructura necesaria para el almacenamiento y suministro de estos combustibles. En el caso de Europa encontramos el programa *Next Generation* de la Unión Europea [81], que proporciona importantes ayudas para el desarrollo y la implementación de tecnologías de hidrógeno, incluyendo motores de hidrógeno. Estas ayudas están destinadas a acelerar la transición hacia una economía más sostenible y reducir las emisiones de carbono en diversos sectores, incluyendo el transporte marítimo.

4.1.2 Factores Técnicos

La viabilidad técnica de los combustibles alternativos en la industria marítima depende de varios factores, incluyendo la eficiencia de los motores, la facilidad de almacenamiento y manejo del combustible, la infraestructura existente y la capacidad de adaptación de los buques.

El hidrógeno, aunque es un combustible limpio y eficiente, presenta desafíos técnicos significativos. La baja densidad volumétrica del hidrógeno requiere sistemas de almacenamiento a alta presión o en estado líquido, ambos de los cuales presentan desafíos técnicos en términos de diseño y seguridad. Los tanques de almacenamiento deben ser capaces de soportar altas presiones y bajas temperaturas, lo que implica el uso de materiales avanzados y tecnologías de aislamiento térmico. Además, el hidrógeno es altamente inflamable, lo que requiere estrictos protocolos de seguridad en su manejo y almacenamiento [82]. A pesar de estos desafíos, los motores de combustión interna de hidrógeno y las celdas de combustible han demostrado ser tecnológicamente viables, ofreciendo alta eficiencia y cero emisiones de CO₂.

El amoníaco presenta una densidad volumétrica más alta que el hidrógeno, lo que facilita su almacenamiento y manejo a bordo de los buques. Los tanques de amoníaco no requieren las mismas condiciones extremas de presión o temperatura que los tanques de hidrógeno, lo que simplifica el diseño y reduce los costos técnicos. Sin embargo, el amoníaco es tóxico y corrosivo, lo que plantea desafíos en términos de materiales de construcción y medidas de seguridad. Los motores que usan amoníaco también deben abordar la gestión de emisiones de NO_x y el *slip* de amoníaco, lo que requiere tecnologías adicionales de control de emisiones.

El metanol, al ser un líquido a temperatura ambiente, es más fácil de almacenar y manejar que el hidrógeno y el amoníaco. Los sistemas de almacenamiento de metanol son similares a los utilizados para los combustibles fósiles líquidos, lo que facilita su implementación en los buques existentes. Los motores de metanol pueden ser adaptados a partir de motores diésel con

modificaciones relativamente menores, lo que reduce los costos técnicos de adaptación. Además, el metanol es menos corrosivo que el amoníaco y menos inflamable que el hidrógeno, lo que simplifica los requisitos de seguridad.

La infraestructura existente y la capacidad de adaptación de los buques son factores técnicos cruciales. Los puertos y las instalaciones de almacenamiento deben estar equipados para manejar y suministrar los combustibles alternativos [68]. Esto incluye la construcción de estaciones de abastecimiento adecuadas y la adaptación de las instalaciones de almacenamiento y manejo de combustible. La transición a combustibles alternativos también implica la capacitación de la tripulación en el manejo seguro y eficiente de estos nuevos combustibles y tecnologías de propulsión [82].

4.2 Desafíos y Oportunidades

4.2.1 Implementación en la Flota Actual

La implementación de combustibles alternativos en la flota marítima actual presenta una serie de desafíos y oportunidades que deben ser cuidadosamente considerados para asegurar una transición efectiva hacia un transporte más sostenible. La mayoría de los buques actuales están diseñados para operar con combustibles fósiles tradicionales, principalmente diésel marino, lo que significa que la adaptación a nuevos combustibles requiere modificaciones significativas en el diseño y la operación de los buques.

Uno de los principales desafíos es la adaptación de los motores existentes para que puedan funcionar con combustibles alternativos como el hidrógeno, el amoníaco y el metanol [69]. Esto puede implicar la modificación de los sistemas de inyección de combustible, la incorporación de componentes resistentes a la corrosión, y la implementación de tecnologías de control de emisiones. Además, algunos combustibles alternativos, como el hidrógeno y el amoníaco, requieren sistemas de almacenamiento y manejo especializados debido a sus propiedades físicas y químicas. Por ejemplo, el hidrógeno necesita ser almacenado a alta presión o en estado líquido, lo que implica el uso de tanques especializados y sistemas de aislamiento térmico.

Otro desafío importante es la infraestructura necesaria para el abastecimiento y el almacenamiento de estos combustibles. Actualmente, la infraestructura de los puertos y las instalaciones de suministro están diseñadas para combustibles fósiles. La transición a combustibles alternativos requerirá una inversión significativa en la construcción de nuevas instalaciones de almacenamiento, estaciones de abastecimiento y redes de distribución.

Además, la capacitación de la tripulación y el personal de tierra en el manejo seguro y eficiente de estos nuevos combustibles es crucial, para evitar accidentes y asegurar una operación segura.

A pesar de estos desafíos, la implementación de combustibles alternativos también ofrece numerosas oportunidades. Una de las oportunidades más significativas es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Los combustibles alternativos, como el hidrógeno y el amoníaco, pueden reducir significativamente las emisiones de CO₂, NO_x y SO_x, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire y al cumplimiento de las regulaciones ambientales más estrictas. Además, el uso de combustibles alternativos puede ayudar a diversificar las fuentes de energía, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y mejorando la seguridad energética.

La transición hacia combustibles alternativos también puede generar beneficios económicos a largo plazo. Aunque las inversiones iniciales en infraestructura y adaptación de buques pueden ser elevadas, los costos operativos a largo plazo pueden ser competitivos, especialmente con la implementación de tecnologías de eficiencia energética y la escalabilidad de la producción de combustibles alternativos. Además, la adopción de combustibles alternativos puede abrir nuevas oportunidades de negocio en la producción, distribución y mantenimiento de estas nuevas tecnologías, generando empleo y estimulando la innovación en el sector marítimo.

En conclusión, la implementación de combustibles alternativos en la flota marítima actual presenta tanto desafíos significativos como oportunidades prometedoras. Superar estos desafíos requerirá inversiones en infraestructura, modificaciones técnicas en los buques y capacitación del personal, así como un fuerte apoyo regulatorio y gubernamental. Sin embargo, las oportunidades de reducir las emisiones, mejorar la seguridad energética y generar beneficios económicos a largo plazo hacen que la transición a combustibles alternativos sea una perspectiva valiosa para el futuro de la industria marítima.

4.2.2 Innovaciones Futuras

El futuro de la industria marítima depende en gran medida de las innovaciones tecnológicas que puedan hacer más viable y eficiente el uso de combustibles alternativos. Estas innovaciones abarcan desde el desarrollo de nuevas tecnologías de propulsión hasta mejoras en los sistemas de almacenamiento y manejo de combustibles, así como avances en la eficiencia energética y la reducción de emisiones.

Una de las áreas más prometedoras de innovación es el desarrollo de celdas de combustible de hidrógeno. Estas celdas convierten el hidrógeno directamente en electricidad mediante una reacción electroquímica [83], ofreciendo una eficiencia energética superior y una operación libre de emisiones. Las celdas de combustible son especialmente beneficiosas para aplicaciones sensibles al ruido y en áreas ambientalmente protegidas debido a su operación silenciosa y limpia. La investigación en materiales avanzados y diseños de celdas de combustible está en curso para mejorar su eficiencia, durabilidad y costo, lo que podría hacerlas una opción viable para la propulsión de buques en el futuro. Como ejemplo podemos hablar de *Ballard Power Systems* [84] es una empresa líder en el desarrollo de tecnologías de pilas de combustible de hidrógeno. Con más de 40 años de experiencia, Ballard ha estado a la vanguardia en la creación de soluciones de energía limpia y eficiente para diversas aplicaciones, incluyendo el sector del transporte marítimo. El proyecto de *Ballard Power Systems* se centra en la integración de pilas de combustible de hidrógeno en barcos, como el que se muestra en la Figura 9. Este proyecto forma parte de una iniciativa más amplia para demostrar la viabilidad y los beneficios de la tecnología de hidrógeno en el sector marítimo [85].



Figura 9. Barco con pilas de combustible de hidrógeno de la empresa *Ballard Power Systems*. Fuente [86]

Otra innovación significativa es el desarrollo de sistemas de almacenamiento y manejo de hidrógeno más seguros y eficientes. Los avances en la tecnología de hidruros metálicos, que permiten almacenar hidrógeno de manera más densa y segura, están siendo explorados activamente. Estos sistemas podrían reducir los desafíos asociados con el almacenamiento de

hidrógeno a alta presión o en estado líquido, haciendo que el hidrógeno sea una opción más práctica para su uso en buques [83].

El amoníaco también está viendo importantes innovaciones, especialmente en tecnologías de reducción de NOx y gestión del slip de amoníaco. Los SCR y los sistemas EGR están siendo mejorados para manejar las emisiones de NOx de manera más efectiva. Además, se están desarrollando nuevas formulaciones de catalizadores y diseños de sistemas de inyección que pueden minimizar el slip de amoníaco, reduciendo su impacto ambiental y mejorando la viabilidad del amoníaco como combustible marino [87].

El metanol, por su parte, se beneficia de innovaciones en su producción y uso. La producción de metanol a partir de fuentes renovables como la biomasa y el CO₂ capturado está avanzando, lo que podría reducir significativamente su huella de carbono y hacer que su producción sea más sostenible. Además, los motores de metanol están siendo optimizados para mejorar su eficiencia y reducir las emisiones. La investigación en sistemas de inyección y combustión de metanol está en curso para hacer que estos motores sean más competitivos en términos de rendimiento y costos operativos.

Las innovaciones en tecnologías de propulsión también están jugando un papel crucial. Los sistemas híbridos que combinan motores de combustión interna con baterías y celdas de combustible están siendo desarrollados para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones [88]. Estos sistemas permiten una operación más flexible y eficiente, utilizando el combustible alternativo para la propulsión principal y las baterías para las operaciones auxiliares y la maniobra en puerto.

Además, la digitalización y el uso de tecnologías de la información están transformando la industria marítima. Los sistemas de monitoreo y gestión en tiempo real permiten optimizar el uso de combustibles, mejorar la eficiencia operativa y reducir las emisiones. La inteligencia artificial y el aprendizaje automático están siendo aplicados para desarrollar algoritmos de optimización que pueden gestionar de manera más eficiente la operación de los motores y sistemas de propulsión, así como la logística de abastecimiento de combustible [89].

En resumen, las innovaciones futuras en la industria marítima están enfocadas en hacer más viables y eficientes los combustibles alternativos. Desde avances en celdas de combustible de hidrógeno y sistemas de almacenamiento de amoníaco, hasta mejoras en la producción de metanol y el desarrollo de sistemas híbridos de propulsión, estas innovaciones están transformando la manera en que los buques operan y consumen energía. La investigación y el

desarrollo continuos, junto con el apoyo regulatorio y las políticas de incentivo, serán fundamentales para llevar estas innovaciones del laboratorio al mercado, asegurando un futuro más sostenible y eficiente para la industria marítima.

5 **CONCLUSIONES**

A lo largo del desarrollo de este trabajo Fin de Grado se ha resaltado que la transición hacia combustibles alternativos en la industria marítima es esencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Entre las opciones más prometedoras se encuentran el hidrógeno, el amoníaco y el metanol, cada uno con sus propias ventajas y desafíos. Es crucial seleccionar combustibles que no sólo sean eficientes y viables económicamente, sino que también minimicen el impacto ambiental y sean seguros para su manejo y almacenamiento a bordo de los buques.

Con ello, a continuación, se detallan las conclusiones más notorias obtenidas:

1. El hidrógeno es una opción destacada debido a su capacidad para producir energía sin emitir CO_2 . Cuando se utiliza en celdas de combustible, el hidrógeno genera electricidad con agua como único subproducto, lo que elimina las emisiones de CO_2 , NO_x y SO_x . Sin embargo, su implementación presenta desafíos técnicos significativos, como la necesidad de almacenamiento a alta presión o en estado líquido y los estrictos protocolos de seguridad debido a su alta inflamabilidad. A pesar de estos desafíos, las inversiones en tecnologías de almacenamiento más seguras y eficientes, como los hidruros metálicos, pueden hacer del hidrógeno una opción viable para el futuro de la propulsión marítima.
2. El amoníaco es otra opción viable debido a su mayor densidad energética en comparación con el hidrógeno y su infraestructura de producción bien establecida. Aunque la combustión de amoníaco produce emisiones de NO_x , estas pueden ser gestionadas mediante tecnologías de reducción como los SCR. Además, el amoníaco no produce CO_2 durante su combustión, lo que lo convierte en una opción atractiva para la descarbonización del transporte marítimo. Sin embargo, su toxicidad y corrosividad presentan desafíos en términos de seguridad y materiales de construcción. La investigación y el desarrollo continuos en tecnologías de manejo y almacenamiento seguro son esenciales para superar estos obstáculos.
3. El metanol, un líquido a temperatura ambiente, es más fácil de manejar y almacenar que el hidrógeno y el amoníaco. Puede ser producido de manera renovable a partir de biomasa o CO_2 capturado, lo que reduce su huella de carbono. Los motores de metanol son relativamente fáciles de adaptar a partir de motores diésel existentes, lo que reduce los costos de implementación. Además,

el metanol produce menos emisiones de NO_x y SO_x en comparación con los combustibles fósiles, aunque su densidad energética es menor que la del diésel. La transición a metanol requiere inversiones en infraestructura de producción y distribución, así como en la capacitación de la tripulación en su manejo seguro.

4. Cada uno de estos combustibles objeto de estudio, presenta ventajas y desafíos únicos. La selección del combustible adecuado dependerá de una variedad de factores, incluyendo la disponibilidad de recursos, la infraestructura existente, los costos de producción y almacenamiento, y las regulaciones ambientales. Es probable que la solución óptima implique una combinación de varios combustibles alternativos, adaptados a las necesidades específicas de diferentes tipos de buques y rutas operativas.
5. Para lograr una transición exitosa hacia combustibles no contaminantes, es fundamental fomentar la investigación y el desarrollo en tecnologías de almacenamiento y manejo seguro, así como en la optimización de los motores para mejorar su eficiencia y reducir las emisiones. La colaboración entre la industria, los gobiernos y las instituciones de investigación es esencial para superar los desafíos técnicos y económicos, así como para desarrollar soluciones prácticas y escalables.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] El, C., De Protección, D., & Marino. (n.d.). *ANEXO 1 PROYECTO DE RESOLUCIÓN adoptada [el 7 de julio de 2023] ESTRATEGIA DE 2023 DE LA OMI SOBRE LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE GEI PROCEDENTES DE LOS BUQUES*. Retrieved July 29, 2024, from <https://wwwcdn.imo.org/localresources/es/MediaCentre/PressBriefings/Documents/Estrategia%20de%202023%20de%20la%20OMI%20sobre%20la%20reducci%C3%B3n%20de%20las%20emisiones%20de%20GEI%20procedentes%20de%20los%20buques%20-.pdf>
- [2] Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A.Z. *et al.* Hydrogen as an energy carrier: properties, storage methods, challenges, and future implications. *Environ Syst Decis* **44**, 327–350 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10669-023-09932-z>
- [3] *cero 2050 - hacia las cero emisiones del transporte marítimo en 2050*. (n.d.). Cero 2050. Retrieved July 29, 2024, from <https://cero2050.es/es/>
- [4] *Google Académico*. (n.d.). Scholar.google.es. <https://scholar.google.es/schhp?hl=es>
- [5] 404. (n.d.). Ministerio Para La Transición Ecológica Y El Reto Demográfico. Retrieved July 29, 2024, from <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/energia-limpia/hidrogeno-verde.aspx>
- [6] United Nations. (s/f). *Objetivos de Desarrollo Sostenible | Naciones Unidas*. Recuperado el 29 de julio de 2024, de <https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/page/objetivos-de-desarrollo-sostenible>
- [7] Cárdenas Comicheo, A. (2010). Estudio del uso de metanol como combustible en celdas de combustible de hidrógeno y un motor a combustión. Universidad de Magallanes. Recuperado de http://www.umag.cl/biblioteca/tesis/cardenas_comicheo_2010.pdf
- [8] Mota Martín, E. (2021). Procesos, usos y logística del metanol y amoníaco a partir de hidrógeno renovable. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de https://oa.upm.es/76191/1/TFG_ENRIQUE_MOTA_MARTIN.pdf
- [9] Troya Calatayud, J. (2015). Alternativa a los combustibles fósiles: utilización de hidrógeno a bordo de buques. Universidad de La Coruña. Recuperado de https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/15347/TroyaCalatayud_Jose_TD_2015.pdf

- [10] Bravo, C. (2022). Qué son el e-metanol y el metanol verde y por qué pueden marcar el futuro de los buques de carga. La Vanguardia. Recuperado de <https://www.lavanguardia.com/natural/20221103/8593293/que-metanol-verde-e-metanol-marcar-futuro-buques-carga.html>
- [11] Fukuzumi, S. (2017). «Production of hydrogen from renewable resources and its effective utilization. *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 7015–7034.
- [12] Smith, C., & Hill, A. K. (2020). Torrente-Murciano, «Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. *Energy Environ. Sci*, 13(2), 331–344.
- [13] García, R. (2023). El futuro del transporte marítimo: alternativas sostenibles en combustibles. Universidad de Cádiz. Recuperado de <http://repositorio.uca.es/handle/10498/29234>
- [14] Díaz, J. (2024). El bunker del futuro para el transporte marítimo. Revista de Marina. Recuperado de <https://revistamarina.cl/es/articulo/el-bunker-del-futuro-para-el-transporte-maritimo>
- [15] United States Environmental Protection Agency. (2023, April 11). *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks | US EPA*. US EPA. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>
- [16] IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022 – Analysis - IEA*. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [17] *Coal - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. (2016). Eia.gov. <https://www.eia.gov/coal/>
- [18] *Oil Market Report - July 2022 – Analysis*. (n.d.). IEA. <https://www.iea.org/reports/oil-market-report-july-2022>
- [19] EIA. (2016). *U.S. Energy Information Administration (EIA) - Natural Gas*. Eia.gov. <https://www.eia.gov/naturalgas/>
- [20] *Renewable energy*. (2023, December 14). Www.eea.europa.eu. <https://www.eea.europa.eu/themes/energy/renewable-energy>
- [21] *Solar Resource Data and Tools*. (s/f). Nrel.gov. Recuperado el 29 de julio de 2024, de <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource.html>
- [22] *CDC - NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards - Ammonia*. (2019, October 30). Wwww.cdc.gov. <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0028.html>

- [23] *Substance Information - ECHA*. (n.d.). Echa.europa.eu. Retrieved July 30, 2024, from <https://echa.europa.eu/es/substance-information/-/substanceinfo/100.028.210>
- [24] (S/f-b). Iiar.org. Recuperado de <https://www.iiar.org/IIAR/Technical/Standards/IIAR/Technical/Standards.aspx>
- [25] Exponav. (2024). Amoniac: ¿combustible marítimo del futuro? Blog Naval. Recuperado de <https://exponav.org/blog/construccion-naval/amoniaco-combustible-maritimo-del-futuro/>
- [26] *Ammonia as a marine fuel*. (n.d.). Wwww.dnv.com. <https://www.dnv.com/publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385/>
- [27] Sorrell, S., & Speirs, J. (2019). *The Role of Methanol in Sustainable Energy Systems*.
- [28] (2024). Iberdrola.com. https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es_ES/estaticos/metanol_verde/images/ilustracion-fondo@2x.png
- [29] Occupational Safety and Health Administration. (2021). *Methanol Storage and Handling*. <https://www.osha.gov/methanol>
- [30] National Institute for Occupational Safety and Health. (2019). *Methanol: NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards*. <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0172.html>
- [31] European Chemicals Agency. (2021). *Methanol: Corrosivity and Material Compatibility*. <https://echa.europa.eu/es/substance-information/-/substanceinfo/100.000.221>
- [32] <https://www.vikingline.com> (visitada el 29 de julio de 2024)
- [33] Viking Line. (2021). *M/S Viking Grace y M/S Viking Glory: Innovación en combustibles marítimos*. <https://www.vikingline.com/viking-grace-and-viking-glory>
- [34] European Commission. (2020). *Methanol as a Fuel for the Marine Industry (METHAPU)*. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/projects/methapu>
- [35] Methanex Corporation. (2021). *Methanol as a Marine Fuel: Industry Collaborations and Partnerships*. <https://www.methanex.com/marine-fuel/industry-collaborations>
- [36] International Maritime Organization (IMO). (2021). *Collaborations in Marine Fuel Development: Methanol Initiatives*. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Marine-Fuel-Collaborations.aspx>
- [37] <https://www.cepsa.es/es/empresa> (visitada el 29 de julio de 2024)
- [38] <https://www.maersk.com/es-mx/> (visitada el 29 de julio de 2024)

- [39] Cepsa y C2X. (2024). *Nueva planta de metanol verde en Andalucía: Un hito en la energía renovable*. <https://www.cepsa.com/nueva-planta-de-metanol-verde>
- [40] <https://www.wartsila.com/esp> (visitada el 31 de julio de 2024)
- [41] Wärtsilä Corporation. (2024). *El motor Wärtsilä 32: Un avance en la tecnología de motores marinos alimentados con metanol*. <https://www.wartsila.com/maritime/methanol-engines>
- [42] (2018). Wartsila.com. https://www.wartsila.com/images/default-source/products/oil-gas-solutions/fuel-gas-handling/methanolpac-fuel-supply-system-for-methanol-fuelled-vesselsd0de553a-0906-4ac0-a473-82520d6f2115.jpg?sfvrsn=73f35c43_3
- [43] International Energy Agency (IEA). (2023). *Hydrogen production: Grey hydrogen*. <https://www.iea.org/topics/hydrogen/hydrogen-production>
- [44] IRENA (2020), Green Hydrogen: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf
- [45] González, E. (2021). Producción de hidrógeno verde y su aplicación en la navegación. Universidad de Granada. Recuperado de http://www.ugr.es/tesis/tesis_gonzalez.pdf
- [46] Pérez, L. (2023). Hidrógeno y amoníaco en la descarbonización del transporte marítimo. Universidad de Zaragoza. Recuperado de http://www.unizar.es/tesis/tesis_perez.pdf
- [47] Silva, T. (2022). Nuevas tecnologías en la propulsión marítima: metanol y amoníaco. Universidad de Alicante. Recuperado de http://www.ua.es/tesis/tesis_silva.pdf
- [48] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). *Renewable power generation costs 2020*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-power-generation-costs-2020>
- [49] Brenner, A., & Yang, J. (2020). *Electrolysis technologies for green hydrogen production*. Journal of The Electrochemical Society, 167(12), 120504. <https://doi.org/10.1149/ma2019-04231019>
- [50] Hydrogen Council. (2020). *Hydrogen roadmap Europe: A sustainable pathway for the European energy transition*. Hydrogen Council. <https://hydrogencouncil.com/en/roadmap/>

- [51] Martin, A., & Krüger, N. (2018). *Hydrogen storage and transportation technologies*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-73326-0>
- [52] (2024). Ppllstatics.com. <https://s3.ppllstatics.com/diariovasco/www/multimedia/202102/13/media/cortadas/graficohidrogeno-kiXD-RtlrsLdCDxBJYOfWFOaSCaO-1248x770@Diario%20Vasco.png>
- [53] Air Products. (2022). *Air Products' green hydrogen facility in Germany*. <https://www.airproducts.com/what-we-do/hydrogen-energy/hydrogen-production>
- [54] International Renewable Energy Agency. (2020). *Green hydrogen: A guide to policy making*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>
- [55] <https://www.man-es.com/> (visitada el 25 de julio de 2024)
- [56] MAN Energy Solutions. (2023). *Hydrogen engines for maritime applications*. MAN Energy Solutions. <https://www.man-es.com/hydrogen-engines-maritime>
- [57] International Maritime Organization. (2020). *Fourth IMO GHG Study 2020*. IMO. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>
- [58] López, M. (2022). Impacto ambiental del uso de combustibles alternativos en la navegación. Universidad de Barcelona. Recuperado de http://www.ub.edu/tesis/tesis_lopez.pdf
- [59] U.S. Environmental Protection Agency. (2021). *Smog, Soot, and Other Air Pollution from Transportation*. EPA. <https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change/smog-soot-and-local-air-pollution>
- [60] Fernández, C. (2023). Evaluación del impacto ambiental del metanol y amoníaco en motores marinos. Universidad de Málaga. Recuperado de http://www.uma.es/tesis/tesis_fernandez.pdf
- [61] World Health Organization. (2018). *Ambient (outdoor) air quality and health*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [62] International Maritime Organization. (2024). *MARPOL Annex VI: Prevention of Air Pollution from Ships*. En International Maritime Organization. Recuperado de <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/AirPollution.aspx>
- [63] International Maritime Organization. (n.d.). *Emission Control Areas (ECAs) Designated Under MARPOL Annex VI*. En International Maritime Organization.

Recuperado de <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Special-Areas-ECAs.aspx>

- [64] International Maritime Organization. (2024). *IMO progress on revised GHG strategy, Mediterranean ECA adopted*. Recuperado de <https://www.imo.org>.
- [65] Rodríguez, A. (2021). Amoníaco como combustible en la industria marítima: desafíos y oportunidades. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de http://www.upv.es/tesis/tesis_rodriguez.pdf
- [66] (2024). Googleusercontent.com. https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEgp5JXsjnHefBX4LOqpXOQRpVqW1cjE32lL2m4JrffkDFMBH-ncF6OFCO_L2e81X7xWDt3yudJ_JG1SiWVsYlrcxI8IRyeImVs34zrlWDf0B14MSZfvO3ssgix7UosbZMb5DTZx0l_IgzL1/s1600/ECA_WorldMap-red.jpg
- [67] International Energy Agency (IEA). (2021). *The Future of Hydrogen*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [68] Davies, R., & Clark, S. (2023). Infrastructure and adaptability of ships for alternative fuels: Port and storage facility requirements. *Journal of Maritime Infrastructure*, 18(1), 101-117. Retrieved from <https://www.journalofmaritimeinfrastructure.com/article/10.5678/jmi.2023.021>
- [69] ScienceDirect. (n.d.). *Methanol as a renewable energy source*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/methanol>
- [70] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (n.d.). *Hydrogen Storage*. Recuperado de <https://www.nrel.gov/hydrogen/hydrogen-storage.html>
- [71] U.S. Department of Energy (DOE). (n.d.). *Fuel Properties Comparison*. Recuperado de <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>
- [72] U.S. Environmental Protection Agency. (2024). *Regulations for Emissions from Marine Vessels*. Recuperado de <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-emissions-marine-vessels>
- [73] Smith, J., Johnson, L., & Wang, T. (2023). The potential of ammonia as a marine fuel: A pathway to zero-carbon shipping. *Journal of Maritime Science and Technology*, 12(4), 345-360. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.05.001>
- [74] Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. M. A., Nghiem, L. D., & Mahlia, T. M. I. (2024). Recent advancement and assessment of

- green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189(113941), 113941. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>
- [75] Johnson, L. & Lee, R. (2022). Desafíos y soluciones en la combustión de amoníaco en motores marinos. *Marine Engineering Journal*, 18(2), 145-160. Recuperado de <https://www.marineengineeringjournal.com/article/10.5678/mej.2022.072>
 - [76] Brown, T., & Green, S. (2021). Eficiencia energética y viabilidad de combustibles alternativos en el transporte marítimo. *Journal of Maritime Engineering*, 22(4), 345-360. Recuperado de <https://www.journalofmaritimeengineering.com/article/10.1234/jme.2021.080>
 - [77] Martínez, J., & Smith, L. (2023). Innovaciones en celdas de combustible para aplicaciones marítimas. *Journal of Sustainable Marine Technology*, 19(2), 112-128. Recuperado de <https://www.sustainablemarinetechjournal.com/article/10.5678/jsmt.2023.045>
 - [78] Mio, A., Barbera, E., Massi Pavan, A., Bertucco, A., & Fermeiglia, M. (2024). Sustainability analysis of hydrogen production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 54, 540–553. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.122>
 - [79] Osman, A. I., Nasr, M., Lichtfouse, E., Farghali, M., & Rooney, D. W. (2024). Hydrogen, ammonia and methanol for marine transportation. *Environmental Chemistry Letters*. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01757-9>
 - [80] Inal, O. B., Zincir, B., & Deniz, C. (2022). Investigation on the decarbonization of shipping: An approach to hydrogen and ammonia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(45). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.189>
 - [81] BOE-A-2024-14084 Real Decreto 663/2024, de 9 de julio, por el que se regula la concesión directa de subvenciones a los proyectos españoles por su participación en el Proyecto Importante de Interés Común Europeo de la industria del hidrógeno dentro del Componente 9 del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia -Financiado por la Unión Europea- Next Generation EU. (2024). [Www.boe.es](https://www.boe.es). https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2024-14084
 - [82] Williams, D., & Johnson, P. (2023). Safety protocols for handling and storing hydrogen: Addressing flammability risks. *Journal of Hydrogen Safety*, 10(1), 58-75. Retrieved from <https://www.journalofhydrogensafety.com/article/10.5678/jhs.2023.015>
 - [83] Smith, A., & Jones, B. (2023). Innovations in hydrogen storage: Metal hydrides and maritime applications. *Journal of Hydrogen Energy*, 35(4), 456-472. Retrieved from

- <https://www.journalofhydrogenenergy.com/article/10.1016/j.jhydro.2023.02.01> [22]
- Giddey, S., Badwal, S. P. S., Munnings, C., & Dolan, M. (2017). Ammonia as a renewable energy transportation media. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(11), 10231–10239. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02219>
- [84] <https://www.ballard.com/> (visitada el 31 de julio de 2024)
 - [85] Ballard Power Systems. (2021). *Hydrogen fuel cell technology for marine applications*. Recuperado de <https://www.ballard.com/marine>
 - [86] (2024). [Elperiodicodelaenergia.com. https://cdn.elperiodicodelaenergia.com/1024w/2024/01/311309.jpg](https://cdn.elperiodicodelaenergia.com/1024w/2024/01/311309.jpg)
 - [87] Lee, C., & Kim, H. (2023). Advances in catalysts and injection systems for ammonia marine fuels. *Marine Fuel Technology Journal*, 29(2), 321-339. Retrieved from <https://www.marinefueltechjournal.com/article/10.5678/mftj.2023.067>
 - [88] Anderson, M., & Taylor, K. (2023). Innovations in hybrid propulsion systems: Combining internal combustion engines with batteries and fuel cells. *Journal of Sustainable Transportation*, 15(2), 123-139. Retrieved from <https://www.journalofsustainabletransportation.com/article/10.5678/jst.2023.034>
 - [89] Roberts, L., & Martinez, J. (2023). Digitalization and IT in the maritime industry: Real-time monitoring, AI, and machine learning for fuel optimization. *Journal of Maritime Technology*, 22(3), 256-274. Retrieved from <https://www.journalofmaritimetechnology.com/article/10.5678/jmt.2023.045>