

Estudio e implementación de combustibles alternativos a los tradicionales en el camino hacia la descarbonización del transporte marítimo

Trabajo Final de Grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Inés Castillo Aponte

Dirigido por:
Santiago Ordás Jiménez

Grado en Ingeniería en Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, junio 2022

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náutica

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a Santiago Ordás por toda la dedicación y la ayuda, tanto en el planteamiento y enfoque del proyecto, como en el seguimiento y revisión.

Agradecer también a mi familia, amigos y a Joan por el apoyo incondicional a lo largo de esta etapa y en mi vida.

Resumen

A lo largo de los últimos años los niveles de contaminación en la atmósfera han aumentado de manera notable. Esto se debe al continuo crecimiento de la actividad de diferentes sectores, como el del transporte marítimo, del que provienen gran parte de los gases contaminantes y de efecto invernadero. Para reducir dichas emisiones, es necesario llevar a cabo medidas que puedan proporcionar un crecimiento sostenible y que controlen e intenten reducir la emisión de gases contaminantes.

Actualmente en el sector marítimo se están llevando a cabo diferentes medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, entre las cuales se encuentra la implementación de combustibles alternativos. Este proyecto estudia algunos de estos combustibles y evalúa su viabilidad para aplicaciones en el sector naval, así como el impacto medioambiental que tienen.

Abstract

Over the last years, pollution levels in the atmosphere have increased dramatically. This is due to the continuous growth of activity in different sectors, such as maritime transport, from which a large part of the polluting and greenhouse gases originate. In order to reduce these emissions, it is necessary to implement measures that provide sustainable growth and that control and aim to reduce the emission of polluting gases.

Currently in the maritime sector different measures such as alternative fuels are being carried out to mitigate the impact of greenhouse gases. This project studies some of these fuels and evaluates their feasibility for applications in the marine sector, as well as the environmental impact that they have.

Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
TABLA DE CONTENIDOS	4
LISTADO DE FIGURAS	7
LISTADO DE TABLAS.....	10
LISTADO DE ECUACIONES.....	13
<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
MOTIVACIÓN	1
OBJETIVOS.....	1
ESTRUCTURA.....	2
MATERIAL Y MÉTODOS.....	2
<u>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO</u>	4
1.1. CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR EL TRANSPORTE MARÍTIMO	4
1.2. CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN	6
1.2.1. EL EFECTO INVERNADERO Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL	6
1.2.2. EMISIONES DE GEI EN ESPAÑA	10
1.3. NORMATIVA Y REGULACIONES	11
1.3.1. MEDIDAS IMPLEMENTADAS POR LA OMI.....	12
1.3.1.1. CONVENIO MARPOL	14
1.3.1.2. LA AGENDA 2030	27
1.3.2. MEDIDAS IMPLEMENTADAS POR LA COMISIÓN EUROPEA	28
1.3.2.1. PACTO VERDE EUROPEO.....	28
<u>CAPÍTULO 2. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS.....</u>	30
2.1. AMONIACO	30

2.1.1.	PROPIEDADES Y GENERALIDADES	31
2.1.2.	ESTUDIOS Y APLICACIÓN DEL AMONIACO EN EL SECTOR NAVAL HASTA LA FECHA	37
2.1.3.	OPCIONES PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE AMONIACO	39
2.1.4.	APLICACIONES DEL AMONIACO EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO	44
2.1.5.	SEGURIDAD Y RIESGOS.....	48
2.2.	HIDRÓGENO	49
2.2.1.	PROPIEDADES Y GENERALIDADES	49
2.2.2.	APLICACIONES DEL HIDRÓGENO EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO.....	53
2.3.	METANOL	59
2.3.1.	PROPIEDADES Y GENERALIDADES	59
2.3.2.	APLICACIONES DEL METANOL EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO	62
2.4.	BIOCOMBUSTIBLES.....	64
2.4.1.	ÉSTER METÍLICO DE ÁCIDO GRASO (FAME) O BIODIÉSEL.....	67
2.4.2.	ACEITE VEGETAL HIDROTRATADO (HVO) O BIODIÉSEL RENOVABLE	67
2.4.3.	BIOMETANO O BIOGÁS NATURAL LICUADO (BIO GNL).....	68
<u>CAPÍTULO 3. COMPARACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS Y TRADICIONALES.....</u>		<u>70</u>
3.1.	COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS	70
3.1.1.	COMPATIBILIDAD DE LAS TECNOLOGÍAS Y LOS COMBUSTIBLES.....	75
3.1.2.	SELECCIÓN DE LAS OPCIONES ESTUDIADAS	76
3.2.	COMPARACIÓN CON LOS COMBUSTIBLES TRADICIONALES	78
<u>CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS.....</u>		<u>82</u>
4.1.	ESCENARIO I	83
4.2.	ESCENARIO II	88
4.3.	ESCENARIO III	88
4.4.	COMPARACIÓN ENTRE LOS ESCENARIOS.....	90
4.4.1.	COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE EMISIONES.....	90
4.4.2.	COMPARACIÓN A PARTIR DEL ÍNDICE DE INTENSIDAD DE CARBONO.....	91
<u>CONCLUSIONES</u>		<u>96</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</u>		<u>99</u>

ANEXO 1. COSTE DEL PROYECTO	107
A1.1. CRONOGRAMA DEL PROYECTO	107
A1.2. COSTE DEL PROYECTO	108
ANEXO 2. LISTADO DE ABREVIACIONES	109
ANEXO 3. PROCESO DE HABER-BOSCH	111
ANEXO 4. ESPECIFICACIONES DE LOS MOTORES	113
A4.1. WÄRTSILÄ 32	113
A4.2. DESARROLLO MOTOR MAN	116

Listado de figuras

Figura 1. Contaminación de un buque. Fuente: ingenieromarino.com	5
Figura 2. Emisiones GEI mundiales y su origen. Fuente: Informe sobre la brecha en las emisiones de 2020 de la ONU.	6
Figura 3. El efecto invernadero. Fuente: Iberdrola	7
Figura 4. Evolución emisiones CO ₂ . Fuente: elpais.com.....	8
Figura 5. Evolución de las emisiones de GEI en España. Fuente: Propia basada en el inventario nacional de emisiones a la atmósfera.....	10
Figura 6. Línea de tiempo de acciones de la OMI para la reducción de emisiones de GEI. Fuente: imo.org	13
Figura 7. Opciones de soluciones para descarbonizar el transporte marítimo. Fuente: imo.org....	13
Figura 8. Vía de reducción de los GEI para alcanzar los objetivos de la OMI en 2050. Fuente: imo.org	14
Figura 9. Emisiones límite de NOx según el anexo VI del convenio MARPOL. Fuente: Convenio MARPOL	18
Figura 10. Zonas ECA. Fuente: künhe-nagel.com.....	20
Figura 11. Fases del EEDI. Fuente: <i>IMO the Trainer Course on Energy Efficient Ship Operation – Module 2</i>	24
Figura 12. Objetivos de desarrollo sostenible. Fuente: un.org	27
Figura 13. Esquema Pacto Verde Europeo. Fuente: EUR-Lex	29
Figura 14. Ciclo cero emisiones de amoniaco. Fuente: man-es.com	30
Figura 15. Buque propulsado con amoniaco. Fuente: naucher.com	32
Figura 16. Procesos de producción del amoniaco. Fuente: <i>DNV-GL: ammonia as marine fuel</i>	35
Figura 17. Proceso de obtención de brown ammonia. Fuente: <i>A Critical Assessment of Green Ammonia Production and Ammonia Production Technologies</i>	36
Figura 18. Proceso de obtención de blue ammonia. Fuente: <i>A Critical Assessment of Green Ammonia Production and Ammonia Production Technologies</i>	36

Figura 19. Proceso de obtención de <i>green ammonia</i> . Fuente: <i>A Critical Assessment of Green Ammonia Production and Ammonia Production Technologies</i>	37
Figura 20. Motor Wärtsilä cuatro tiempos. Fuente: Wärtsilä	38
Figura 21. Programa de desarrollo de motor de NH ₃ de dos tiempos. Fuente: <i>MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia</i>	38
Figura 22. Petrolero Kriti Future. Fuente: vesselfinder.com.....	39
Figura 23. Proyecto de turbina de gas alimentada con NH ₃ . Fuente: Mitsubishi Power	41
Figura 24. Funcionamiento pila SOFC. Fuente: wikipedia.org	43
Figura 25. Funcionamiento pila PEM. Fuente: Hidrógeno. Pilas de combustible tipo PEM	43
Figura 26. Esquema del suministro de NH ₃ del motor MAN B&W. Fuente: <i>Man B&W: two-stroke engine operating on ammonia</i>	45
Figura 27. Esquema del funcionamiento de SCR. Fuente: Boletín. Fluido para sistemas de escape a diésel	46
Figura 28. Pila SOFC alimentada con NH ₃ . Fuente: researchgate.net.....	48
Figura 29. Métodos y fuentes de producción de hidrógeno. Fuente: petrofac.com.....	52
Figura 30. Esquema buque portacontenedores alimentado con pilas de H ₂ . Fuente: Riviera Maritime Media	54
Figura 31. Funcionamiento pila PEM con H ₂ . Fuente: hidrogeno18wixsite.com	56
Figura 32. Motor combustión dual hidrógeno y diésel. Fuente: <i>Hydrogen co-combustion in ICE</i> ..	57
Figura 33. Motor de encendido por chispa con H ₂ . Fuente: <i>Hydrogen co-combustion in ICE</i>	57
Figura 34. Producción de metanol a partir de gas natural. Fuente: <i>ABS Sustainability Whitepaper</i>	59
Figura 35. Ciclo de vida del metanol. Fuente: <i>ABS Sustainability Whitepaper: Methanol as marine fuel</i>	59
Figura 36. Configuración sistema motor Wärtsilä 32 alimentado con metanol. Fuente: Wärtsilä .	63
Figura 37. Pilas de metanol del buque <i>MS Innogy</i> . Fuente: sectormaritimo.es	64
Figura 38. Ciclo de vida de los biocombustibles. Fuente: <i>ABS Sustainability Whitepaper: Biofuels as marine fuel</i>	66
Figura 39. Producción del biometano. Fuente: ingenieromarino.com	68
Figura 40. Predicción del uso de combustibles en 2050. Fuente: <i>ABS Setting the Course to Low Carbon Shipping</i>	80

Figura 41. Evolución del número de buques activos del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS.....	85
Figura 42. Evolución del consumo y de las emisiones de CO ₂ en la flota de graneleros del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS.....	86
Figura 43. Evolución del consumo y de las emisiones de CO ₂ en la flota de portacontenedores del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS.....	86
Figura 44. Evolución del consumo y de las emisiones de CO ₂ en la flota de graneleros del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS.....	87
Figura 45. Comparación de las emisiones de CO ₂ en los escenarios I, II y III. Fuente: propia basada en MRV THETIS.....	90
Figura 46. Determinación de la clasificación de la eficiencia energética del buque. Fuente: ClassNK.....	94
Figura 47. Diagrama de Gantt del proyecto. Fuente: propia.....	107
Figura 48. Proceso de Haber-Bosch. Fuente: miteco.gob.es.....	112
Figura 49. Motor Wärtsilä 32. Fuente: Wärtsilä.....	113
Figura 50. Plano motores Wärtsilä 32. Fuente: <i>Wärtsilä 32 methanol</i>	115
Figura 51. Sistemas auxiliares motor MAN. Fuente: <i>MAN B&W Ammonia fueled engine development status</i>	116
Figura 52. Sistema de inyección LGI. Fuente: <i>MAN B&W Ammonia fueled engine development status</i>	116
Figura 53. Principio de combustión LGI. Fuente: <i>MAN B&W Ammonia fueled engine development status</i>	117
Figura 54. Tubería de doble pared motor MAN. Fuente: <i>MAN B&W Ammonia fueled engine development status</i>	117

Listado de Tablas

Tabla 1. Emisiones totales brutas de gases de efecto invernadero. Fuente: Inventario nacional de emisiones a la atmósfera	11
Tabla 2. Estructura del anexo VI del convenio MARPOL. Fuente: propia basada en el convenio MARPOL	15
Tabla 3. Niveles de control de emisiones de NOx. Fuente: imo.org	17
Tabla 4. Límite de azufre dentro y fuera de zonas ECA. Fuente: imo.org.....	18
Tabla 5. Zonas ECA de acuerdo con el anexo VI del convenio MARPOL. Fuente: imo.org	19
Tabla 6. Buques a los que se les aplica el EEDI. Fuente: Convenio MARPOL.....	21
Tabla 7. Valores parámetro línea de referencia para el cálculo del EEDI. Fuente: imo.org.....	23
Tabla 8. Reducción de emisiones contaminantes en comparación con HFO. Fuente: <i>MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia</i>	31
Tabla 9. Propiedades del NH ₃ . Fuente: <i>Sustainability Whitepaper ABS: Ammonia as marine fuel</i> .	33
Tabla 10. Resumen de las características del amoníaco. Fuente: [13]	34
Tabla 11. Comparación de volumen requerido por energía en base al calor específico inferior. Fuente: <i>DNV-GL: ammonia as marine fuel</i>	35
Tabla 12. Aplicaciones tecnológicas del amoníaco. Fuente: Propia basada en <i>Transport and Environment 2018 y Comparison of Alternative Marine Fuels DNV-GL</i>	44
Tabla 13. Propiedades del hidrógeno. Fuente: relaq.mx.....	50
Tabla 14. Aplicaciones tecnológicas del hidrógeno. Fuente: Propia basada en <i>Transport and Environment 2018 y Comparison of Alternative Marine Fuels DNV-GL</i>	53
Tabla 15. Comparación SOFC, PEMFC Y HT-PEMFC. Fuente: EMSA DNV-GL.....	55
Tabla 16. Embarcaciones propulsadas con hidrógeno. Fuente: propia	58
Tabla 17. Comparación del contenido en carbono del metanol. Fuente: <i>Methanol as a marine fuel report</i>	60
Tabla 18. Propiedades del metanol. Fuente: <i>ABS Sustainability Whitepaper: methanol as marine fuel</i>	61

Tabla 19. Propiedades y opciones de tecnologías para la aplicación del metanol. Fuente: <i>Comparison of Alternative Marine Fuels DNV-GL</i>	62
Tabla 20. Propiedades y opciones de tecnologías para la aplicación de biocombustibles. Fuente: <i>Comparison of Alternative Marine Fuels DNV-GL</i>	66
Tabla 21. Características HVO. Fuente: <i>Master Plan for CO₂ reduction in the Dutch shipping sector</i>	69
Tabla 22. Ventajas y desventajas del NH ₃ . Fuente: propia	71
Tabla 23. Beneficios y retos del H ₂ . Fuente: propia	72
Tabla 24. Ventajas y desventajas del CH ₃ OH. Fuente: propia	73
Tabla 25. Ventajas y desventajas de los biocombustibles. Fuente: propia	74
Tabla 26. Compatibilidad de combustibles y tecnologías. Fuente: propia	75
Tabla 27. Propiedades pilas DMFC. Fuente: EMSA DNV-GL	76
Tabla 28. Comparación de combustibles alternativos y convencionales. Fuente: propia basada en <i>an industrial view of ammonia as marine fuel</i>	79
Tabla 29. Datos de consumo y emisiones totales de CO ₂ de la flota de graneleros del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS	83
Tabla 30. Datos de consumo y emisiones totales de CO ₂ de la flota de portacontenedores del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS	84
Tabla 31. Datos de consumo y emisiones totales de CO ₂ de la flota de metaneros del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS	84
Tabla 32. Datos del escenario II. Fuente: propia basada en MRV THETIS	88
Tabla 33. Datos del escenario III. Fuente: propia basada en MRV THETIS	89
Tabla 34. Especificaciones buque portacontenedores MSC ROBERTA. Fuente: propia basada en MRV THETIS y vesselfinder.com	91
Tabla 35. Valores de los coeficientes a y c para los diferentes tipos de buque. Fuente: ClassNK ...	92
Tabla 36. Factor de reducción para el cálculo del CII. Fuente: ClassNK	93
Tabla 37. Valores para la determinación del intervalo <i>d</i> en cálculo del CII. Fuente: ClassNK	93
Tabla 38. Tareas del proyecto. Fuente: propia	107
Tabla 39. Gases de efecto invernadero del proceso de Haber-Bosch. Fuente: miteco.gob.es	111
Tabla 40. Contaminantes atmosféricos del proceso de Haber-Bosch. Fuente: miteco.gob.es	112
Tabla 41. Datos técnicos motores Wärtsilä 32. Fuente: <i>Wärtsilä 32 methanol</i>	113
Tabla 42. Potencia nominal motores Wärtsilä 32. Fuente: <i>Wärtsilä 32 methanol</i>	114

Tabla 43. Dimensiones y pesos motores Wärtsilä 32. Fuente: *Wärtsilä 32 methanol* 115

Listado de ecuaciones

- (1) Cálculo básico EEDI
- (2) Cálculo completo EEDI
- (3) Cálculo EEDI requerido
- (4) Valor línea de referencia
- (5) Combustión del NH₃
- (6) Reacción del ánodo en pila tipo PEM con H₂
- (7) Reacción del cátodo en pila tipo PEM con H₂
- (8) Cálculo general CII Required
- (9) Cálculo general CII Attained
- (10) Cálculo general CII Reference
- (11) Cálculo general CII Required
- (12) Cálculo valor d (CII)
- (13) Cálculo CII Attained para el buque MSC ROBERTA escenario I
- (14) Cálculo CII Reference para el buque MSC ROBERTA escenario I
- (15) Cálculo CII Required para el buque MSC ROBERTA escenario I
- (16) Cálculo valor d para el buque MSC ROBERTA escenario I
- (17) Cálculo CII Attained para el buque MSC ROBERTA escenario II
- (18) Cálculo CII Reference para el buque MSC ROBERTA escenario II
- (19) Cálculo CII Required para el buque MSC ROBERTA escenario II
- (20) Cálculo valor d para el buque MSC ROBERTA escenario II
- (21) Cálculo CII Attained para el buque MSC ROBERTA escenario III

- (22) Cálculo CII Reference para el buque MSC ROBERTA escenario III
- (23) Cálculo CII Required para el buque MSC ROBERTA escenario III
- (24) Cálculo valor d para el buque MSC ROBERTA escenario III
- (25) Proceso de Haber-Bosch

Introducción

Motivación

La motivación para realizar este trabajo nace de la necesidad existente de implementar medidas que permitan reducir las emisiones de gases contaminantes que provienen del transporte marítimo. Una de las alternativas que permitirá descarbonizar el transporte marítimo es la implementación de combustibles alternativos.

El transporte marítimo es la vía principal de comercio a nivel internacional. Como en muchos otros sectores, la actividad del transporte marítimo ha aumentado notablemente en los últimos años y, en consecuencia, también lo han hecho las emisiones de gases contaminantes causadas por los buques. Por ello, es urgente el desarrollo y la implementación de medidas que garanticen un transporte limpio y sostenible.

Objetivos

Los principales objetivos de este proyecto son conocer el estado y desarrollo actual de diferentes combustibles alternativos, estudiar la viabilidad, el rendimiento y las posibles aplicaciones que tienen dichos combustibles e identificar las limitaciones y fortalezas de cada uno de ellos.

Por otro lado, tras realizar el estudio de cada una de las opciones, se pretende hacer una comparación que permita identificar las tecnologías y los combustibles óptimos para la descarbonización del transporte marítimo en el corto y en el largo plazo, así como las fortalezas y las debilidades de estas opciones.

Por último, otro de los objetivos es plantear escenarios comparando la aplicación de tecnologías basadas en combustibles alternativos y combustibles tradicionales para adquirir una idea del impacto que supone la implementación de combustibles alternativos.

Estructura

El proyecto que se presenta a continuación está dividido en cinco capítulos, contando el capítulo presente (capítulo 0).

El primer capítulo es el marco teórico del proyecto y está dividido en dos partes. En la primera parte se expone la problemática de las emisiones de gases contaminantes, así como su crecimiento durante los últimos años y su efecto en el medioambiente. Por otro lado, se exponen las medidas implementadas hasta la fecha por organismos internacionales.

El segundo capítulo consiste en el análisis y el estudio de algunos combustibles candidatos a sustituir a los tradicionales, con especial énfasis en el amoniaco, ya que, a priori, cuenta con mayor número de aplicaciones y menor número de restricciones. También se analizan el hidrógeno, el metanol y los biocombustibles.

Posteriormente, en el tercer capítulo, se realiza una comparación de los combustibles expuestos en el capítulo 2 teniendo en cuenta sus propiedades, la aplicación en diferentes tecnologías, el transporte y almacenamiento y el impacto medioambiental. Además, se comparan estas alternativas con los combustibles tradicionales para identificar las ventajas y desventajas de su uso.

Por último, basado en la comparación del capítulo 3, se plantean tres escenarios para adquirir una ligera idea del impacto medioambiental de implementar tecnologías con diferentes combustibles alternativos.

Material y métodos

Diseño

Se ha realizado una revisión sistemática de documentos de sociedades de clasificación, organismos internacionales y sociedades científico-técnicas dedicadas a la investigación de combustibles alternativos. También se han consultado revisiones sistemáticas y estudios científicos sobre el tema a tratar.

Estrategia de búsqueda

En primer lugar, se llevó a cabo una búsqueda en *ScienceDirect* de documentos, artículos y revisiones sistemáticas publicadas. La búsqueda se hizo en inglés y se acotó temporalmente entre

los años 2012 a 2022, ya que en los últimos 10 años ha habido un gran impulso en la investigación de combustibles alternativos que ayudan a la descarbonización del transporte marítimo. Se analizaron además las referencias bibliográficas de los artículos seleccionados con el fin de rescatar otros estudios potencialmente incluibles para la revisión. Dichos artículos fueron localizados a través de Mendeley, Discovery UPC y Google Académico.

Por último, se revisaron y analizaron guías y documentos de las Sociedades de Clasificación *American Bureau of Shipping* y *DNV*, así como artículos y ponencias de *International Maritime Organisation*, *European Maritime Safety Agency* y Naciones Unidas.

Criterios de inclusión y exclusión

No se definieron a priori criterios de inclusión y exclusión para la búsqueda bibliográfica excepto los referentes a los años de publicación (entre 2012 y 2022).

Las palabras clave utilizadas fueron: *alternative fuels*, *ammonia as marine fuel*, *hydrogen as marine fuel*, *decarbonising maritime transport*, *biofuels in marine sector*, *methanol as marine fuel* y *green fuels*.

Extracción de datos

Tras la búsqueda inicial se localizaron 85 artículos, pero se descartaron todos aquellos que no se consideraron relevantes para los objetivos de este trabajo. Se seleccionaron artículos de revistas científicas, estudios originales, tesis doctorales, proyectos y patentes de diferentes empresas como *MAN Energy Solutions* y *Wärtsilä* y estudios de sociedades de clasificación.

Para el último capítulo, se obtuvieron los datos de la página de la Agencia Europea de Seguridad Marítima para evaluar la evolución de las emisiones de CO₂ y realizar una comparación entre el uso de combustibles tradicionales y alternativos.

Análisis de datos

Para proceder a la selección se revisaron los *abstracts* y, en caso necesario, los artículos completos con el fin de decidir si la información que contenían estaba o no relacionada con los objetivos del trabajo.

Capítulo 1. Marco teórico

El presente capítulo está dividido en dos partes. La primera parte explica la problemática de la contaminación a causa del transporte marítimo, así como las consecuencias de las emisiones de gases de efecto invernadero y datos nacionales de la evolución de dichas emisiones. En la segunda parte del capítulo, se exponen las normativas y regulaciones implementadas a nivel internacional y europeo para regular la emisión de dichos gases y paliar sus efectos en el medio ambiente.

1.1. Contaminación producida por el transporte marítimo

Según la Organización Marítima Internacional, el transporte marítimo emite alrededor de **940 millones de toneladas de CO₂ al año** y es el responsable de aproximadamente **el 2,5% de las emisiones de gases de efecto invernadero**. Además, el transporte marítimo produce un 15% del sulfuro y un 13% del nitrógeno que se liberan a la atmósfera [1]. Se prevé que las emisiones podrían aumentar en un 50% en los próximos 30 años. Por tanto, la OMI implementa medidas obligatorias a fin de reducir un 70% las emisiones de buques para el 2050. Dichas medidas se detallan en el capítulo 2 del proyecto.

Como muchos otros medios de transporte, los buques utilizan combustibles fósiles para la propulsión, emitiendo dióxido de carbono y otros gases contaminantes cuando son quemados. Tradicionalmente, los buques emplean *fueloils* para la propulsión, que tienen un contenido en azufre de hasta un 3,5%.

Sin embargo, se han ido empleando otros combustibles que permitiesen reducir, en cierta medida, las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero, como es el caso del Gas Natural Licuado. El GNL es gas natural que se encuentra en fase líquida gracias a un proceso de licuefacción que lleva su temperatura a -160°C, consiguiendo reducir su volumen en 600 veces.

Esta reducción en su volumen permite transportar gran cantidad de GNL en buques metaneros. Las ventajas del gas natural licuado frente a otros combustibles, es que genera menos emisiones de partículas, no genera emisiones de óxidos de azufre (SO_x) y reduce las emisiones de NO_x, pero sigue emitiendo tantas emisiones que no permiten cumplir con los objetivos de la Organización Marítima Internacional.

El transporte marítimo es el principal medio de transporte de mercancías, transportando aproximadamente un 80% de los bienes del planeta. También es uno de los medios de transporte más contaminantes y, ya que su actividad es tan elevada, también lo son las sustancias contaminantes que se vierten a los océanos y que se liberan a la atmósfera. Las causas de que el transporte marítimo contamine tanto no son sólo las emisiones de gases contaminantes, sino también los hidrocarburos que se vierten, las aguas sucias y de lastre, las sustancias nocivas transportadas a granel y los residuos.

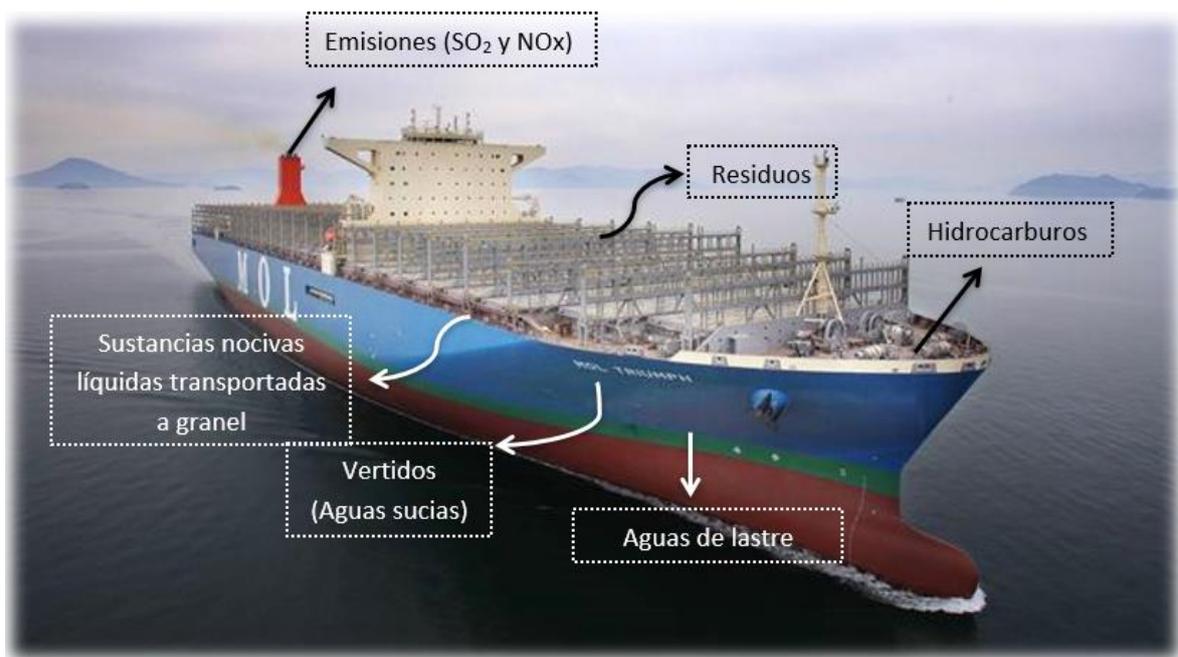


Figura 1. Contaminación de un buque. Fuente: ingenieromarino.com

No obstante, existen otras fuentes de contaminación que contribuyen al calentamiento global y que tienen un impacto directo en la atmósfera y en la salud. La Figura 2 muestra las emisiones de GEI mundiales y el origen que tienen, y también evidencia, una vez más, que el origen de la mayoría de las emisiones de gases de efecto invernadero **es el dióxido de carbono (CO₂) de origen fósil**, es decir, los combustibles fósiles empleados para la propulsión.

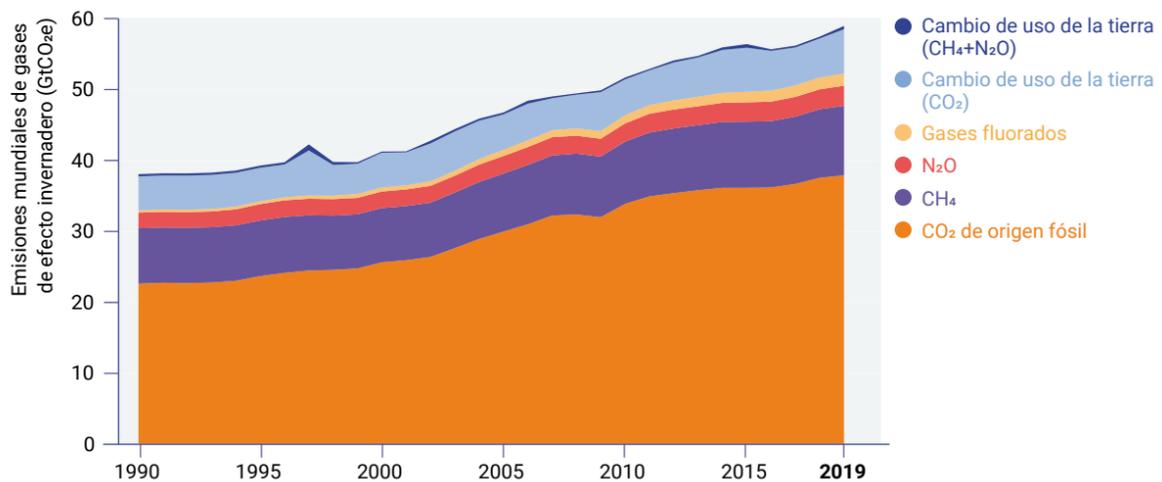


Figura 2. Emisiones GEI mundiales y su origen. Fuente: Informe sobre la brecha en las emisiones de 2020 de la ONU.

1.2. Consecuencias de la contaminación

La contaminación a causa del transporte marítimo tiene consecuencias en el medio marino, en la atmósfera e incluso en la salud de las personas. En el siguiente apartado se explica el impacto medio ambiental que tiene la liberación de gases contaminantes, así como los principales gases que provocan el efecto invernadero y el calentamiento global. Por último, se muestran estadísticas de Inventario Nacional para mostrar los niveles de estos gases contaminantes en España.

1.2.1. El efecto invernadero y el calentamiento global

El constante aumento de emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero a lo largo de los años tiene consecuencias negativas e irreversibles en nuestro planeta. Una de estas consecuencias es el efecto invernadero, que provoca que la temperatura global de la Tierra aumente debido a la retención de la radiación térmica, dando lugar al calentamiento global.

El efecto invernadero es un fenómeno natural que mantiene la temperatura del planeta a un nivel adecuado para el desarrollo de la vida. Gracias a los gases presentes en la atmósfera, parte de la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra, tras ser calentada por el sol, es retenida. Esta absorción de radiación infrarroja es importante en el balance energético de la atmósfera. Sin embargo, la acción del ser humano ha aumentado la presencia de estos gases

provocando una mayor retención del calor y, en consecuencia, aumentando la temperatura del planeta, que es lo que se conoce como **calentamiento global**.

Los gases en la atmósfera que absorben la radiación infrarroja procedente de la Tierra o radiación saliente son los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y entre ellos se encuentran el dióxido de carbono (CO₂), el vapor de agua (H₂O), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄), y el ozono (O₃).

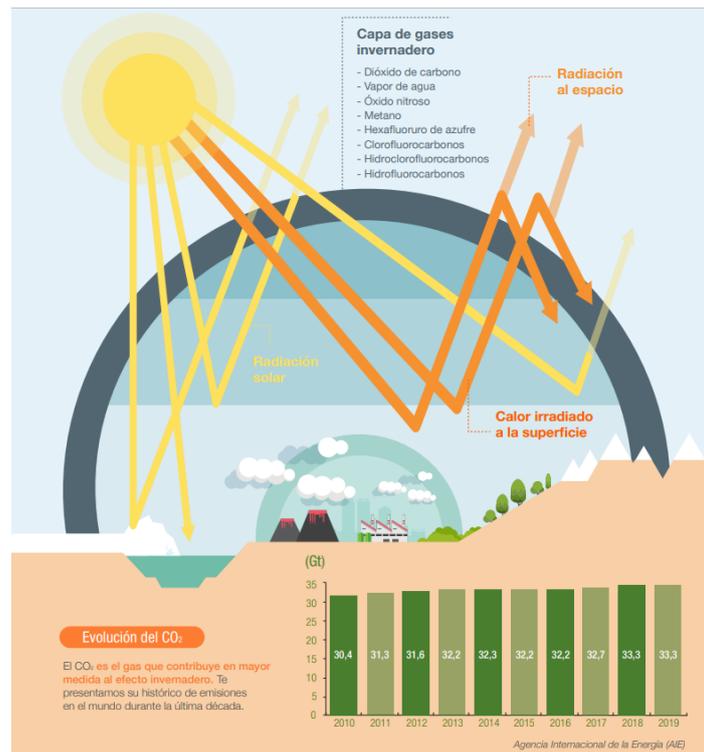


Figura 3. El efecto invernadero. Fuente: Iberdrola

Los gases de efecto invernadero son componentes gaseosos presentes en la atmósfera y responsables del efecto invernadero, cuya función es absorber y reemitir la radiación infrarroja. Algunos de estos gases son de **origen natural**, como el dióxido de carbono, el vapor de agua, el metano, el óxido nitroso, o el ozono, pero el aumento de su presencia durante los últimos años ha estado influenciado por la actividad humana. Por otro lado, existen los GEI de **origen antropogénico**, como los halocarbonos¹, que comenzaron a fabricarse a partir de los años cuarenta, y son producidos única y exclusivamente por la actividad humana. En este grupo se

¹ Compuestos de carbono que contienen flúor, cloro, bromo o yodo.

encuentran los hidrofluorocarburos (HFC), los hidroclorofluorocarburos (HCFC) los perfluorocarburos (PFC), el hexafluoruro de azufre (SF₆) y el trifluoruro de nitrógeno (NF₃).

Todos los gases mencionados contribuyen al efecto invernadero y, en consecuencia, al calentamiento global. Sin embargo, los que se explicarán más detalladamente son el **dióxido de carbono, las partículas en suspensión, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x)**, ya que son los que emite el transporte marítimo y los que se tratan de reducir mediante su regulación a través de normativas internacionales.

Dióxido de carbono

El dióxido de carbono es un gas natural que está presente en la atmósfera a consecuencia de los procesos vitales de los seres vivos, pero su presencia en la atmósfera se ve alterada debido a la actividad humana, ya que gran parte de esta actividad emite emisiones de CO₂. Un gran productor de emisiones de dióxido de carbono es la quema de combustibles fósiles, y es aquí donde el transporte marítimo juega un papel protagonista.

Las concentraciones de CO₂ en la atmósfera siempre han existido, ya que también es un gas de origen natural. Sin embargo, en los últimos 800.000 años, estas concentraciones nunca habían alcanzado las 300 partes por millón hasta el año 1950 y, desde entonces, no ha parado de incrementar exponencialmente [2].

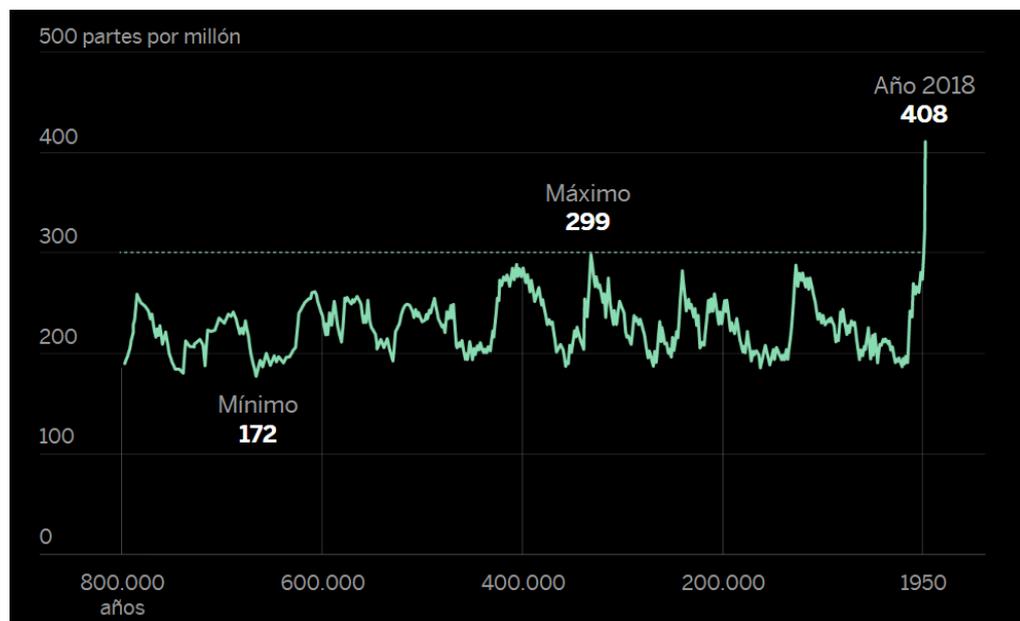


Figura 4. Evolución emisiones CO₂. Fuente: elpais.com

Partículas en suspensión

Las partículas en suspensión pueden ser de origen natural, al provenir de la fragmentación de corpúsculos mayores (polvo procedente de la descomposición de las rocas, polen, actividad volcánica, etc.) y de origen antropogénico. Las partículas en suspensión de origen natural no son nocivas ni contribuyen al cambio climático, mientras que las de origen antropogénico sí suponen un problema para la contaminación del planeta y son originadas por las combustiones incompletas de los motores térmicos. También hay otras fuentes de producción de partículas en suspensión, como la actividad industrial, la minería, la ganadería y agricultura intensiva y el transporte marítimo.

Estas partículas viajan por el aire y pueden depositarse en ríos o lagos, provocando que estos se vuelvan ácidos. La presencia de estas partículas también tiene consecuencias en la salud humana, ya que afectan al sistema respiratorio.

Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son mezclas de gases compuestos de nitrógeno y oxígeno liberados al aire desde el escape de vehículos a motor, de la combustión de combustibles fósiles y durante procesos industriales como la soldadura de arco o la detonación de dinamita. Al provenir de la quema de combustibles fósiles, el transporte marítimo es un gran emisor de estos gases contaminantes. Existen varios óxidos de nitrógeno, pero los más nocivos debido a su toxicidad son el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2).

Estos gases suponen un problema cuando reaccionan con otros elementos como agua, luz solar o el suelo. Cuando el dióxido de nitrógeno reacciona con sustancias químicas provenientes de la luz solar se forma **ozono** (O_3), niebla contaminante (*smog*) y **ácido nítrico** (HNO_3), causando lluvia ácida. Al reaccionar con agua o liberarse al suelo, los óxidos de nitrógeno forman ácido nítrico.

Óxidos de azufre

Los óxidos de azufre son gases compuestos por trióxido de azufre (SO_3) y dióxido de azufre (SO_2). Más de la mitad de la emisión de estos gases es a causa de la actividad humana, concretamente a causa de la combustión del carbón y el petróleo, y de la industria metalúrgica. Dentro de este grupo de óxidos, el más común es el dióxido de azufre (SO_2) y es muy tóxico, ya que afecta a las vías respiratorias. Cuando el SO_2 se combina con partículas o con la humedad del aire, se forma **ácido sulfúrico** (H_2SO_4), provocando lluvia ácida.

1.2.2. Emisiones de GEI en España

El Sistema Español de Inventario y Proyecciones de Emisiones a la Atmósfera elabora anualmente el **Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero** por fuentes antropogénicas y su absorción por sumideros, según lo previsto en la Convención Marco sobre el Cambio Climático (UNFCCC) y su Protocolo de Kioto, y los subsiguientes Acuerdos de París, y en el Reglamento (UE) 2018/1999 sobre la Gobernanza de la Unión de la Energía y de la Acción por el Clima [3]. Los GEI que se muestran en el inventario son el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso, los hidrofluorocarburos, los perfluorocarburos y el hexafluoruro de azufre.

En este inventario se puede observar que, a pesar de que las emisiones producidas por España son elevadas, han disminuido con respecto al año 1990. A continuación, se expone una gráfica que muestra la evolución de las emisiones brutas de gases de efecto invernadero.

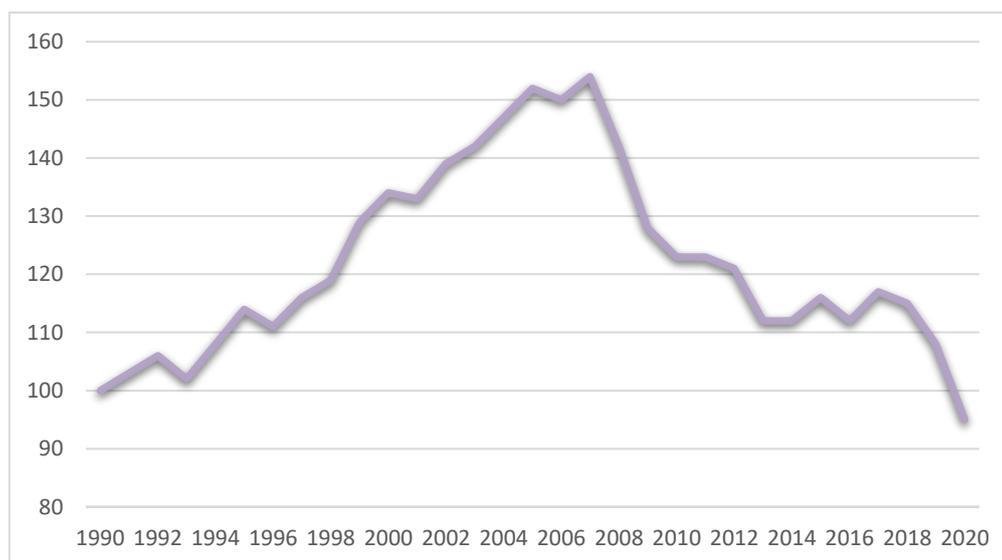


Figura 5. Evolución de las emisiones de GEI en España. Fuente: Propia basada en el inventario nacional de emisiones a la atmósfera.

La gráfica de la Figura 5 muestra, en el eje de ordenadas, el porcentaje de emisiones de gases de efecto invernadero respecto al año 1990, siendo las emisiones de este año el 100%. En el eje de abscisas, se encuentran los años hasta el 2020. Como se puede observar, del año 1990 al 2005, las emisiones aumentaron en un 52,5% y, posterior a este año, fueron decreciendo de forma irregular hasta un -5,3% en comparación al año 1990, y un -37,9% en comparación al 2005.

A continuación, se muestra la tabla de las emisiones totales brutas de efecto invernadero para observar cómo aumentaron en el período de 1990-2005 y su posterior disminución en el período

2005-2020, teniendo en cuenta que en 2020 las emisiones de GEI disminuyeron también a causa de los efectos de la pandemia de la COVID-19, y así, el porcentaje de emisiones respecto al 1990 es nulo por primera vez en ese año.

Tabla 1. Emisiones totales brutas de gases de efecto invernadero. Fuente: Inventario nacional de emisiones a la atmósfera

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2017	2018	2019	2020
Emisiones										
GEI (kt CO2-eq²)	290.104	330.045	388.091	442.321	358.157	337.416	338.845	333.251	313.828	274.743
Variación respecto a 1990		+13,8%	+33,8%	+52,5%	+23,5%	+16,3%	+16,8%	+14,9%	+8,2%	-5,3%
Variación respecto a 2005					-19,0%	-23,7%	-23,4%	-24,7%	-29,0%	-37,9%

1.3. Normativa y regulaciones

La actividad del transporte marítimo **se regula a nivel mundial mediante el marco normativo de la Organización Marítima Internacional**, que es un organismo de las Naciones Unidas. Sin embargo, **las medidas implementadas por la OMI se pueden complementar con Convenios Internacionales**, como las directivas de la Unión Europea.

Como se ha descrito anteriormente, las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes han ido creciendo a lo largo de los años hasta llegar a niveles alarmantes. Para frenar el aumento de estos gases y paliar los efectos de su liberación, se han implementado diferentes medidas. Este apartado expone las medidas que se han implementado a nivel internacional por parte de la Organización Marítima Internacional, así como las medidas implementadas por la Comisión Europea.

² Kilotoneladas de CO₂ equivalentes

1.3.1. Medidas implementadas por la OMI

La Organización Marítima Internacional es la autoridad que se encarga de establecer normas para la seguridad, la protección y el comportamiento ambiental que ha de llevarse a cabo en el transporte marítimo. Desde su fundación, la OMI ha adoptado más de 50 tratados internacionales regulando el transporte marítimo, de los cuales 21 están directamente relacionados con el medio ambiente. En 2018 la OMI adoptó la **Estrategia inicial de la OMI para mostrar el compromiso que tiene la organización de reducir las emisiones de gases contaminantes al menos un 50% en 2050, en comparación con los niveles de 2008, y de eliminarlas lo antes posible**. De acuerdo con la OMI, *“esta estrategia actúa como un marco de trabajo para los Estados Miembros, defendiendo la futura visión para el transporte marítimo internacional, los niveles de ambición para reducir las emisiones de efecto invernadero y los principios rectores. También incluye una lista de posibles medidas adicionales a corto, medio y largo plazo, con los plazos posibles y sus repercusiones para los Estados. La estrategia también identifica barreras y medidas de apoyo como la creación de la capacidad, la cooperación técnica y la investigación y desarrollo”*. [4]

A lo largo de los últimos años, desde la OMI se han ido implementando diferentes medidas con el objetivo de llegar a cero emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte marítimo. En 2012, la OMI estimó que aproximadamente un 2,2% de las emisiones antropogénicas de CO₂ provenían del transporte marítimo internacional. Como respuesta, **el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) introdujo en 2013 dos medidas obligatorias, en virtud del convenio MARPOL, que hoy en día siguen estando vigentes y son de vital importancia para la reducción de GEI. Estas medidas son el índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI) y el plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP)**.

Además, para acelerar el cumplimiento de los objetivos establecidos por la OMI, el MEPC ha **implementado nuevas medidas que entran en vigor el 1 de enero de 2013. Estas medidas son el índice de eficiencia energética de proyecto para buques existentes (EEXI), y el indicador de intensidad de carbono (CII)**.



Figura 6. Línea de tiempo de acciones de la OMI para la reducción de emisiones de GEI. Fuente: imo.org

En la Figura 6 se puede observar la línea temporal de las diferentes medidas implementadas por la OMI, que dio comienzo en el año 1997 con la resolución de las emisiones de CO₂ de los buques, estableciendo un control de las emisiones de gases de efecto invernadero. La línea se extiende a lo largo de los años mostrando otras medidas, o evolución de algunas ya existentes hasta llegar al final de la línea de tiempo y al objetivo de la OMI, cero emisiones de gases de efecto invernadero.

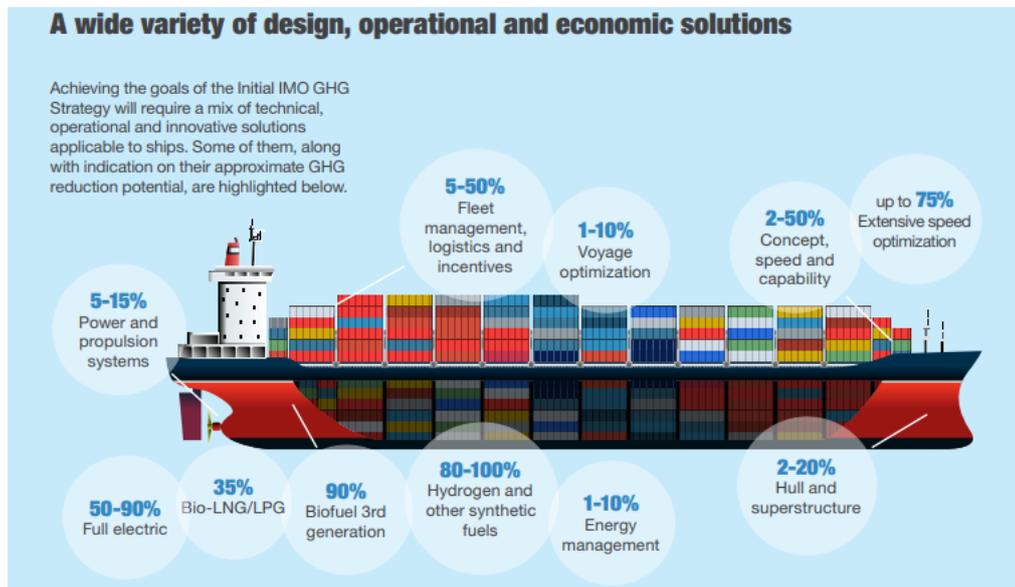


Figura 7. Opciones de soluciones para descarbonizar el transporte marítimo. Fuente: imo.org

Las medidas implementadas por la OMI tienen como objetivo la reducción de los gases de efecto invernadero por parte de los buques y, tal y como se ha expuesto anteriormente, trabaja con objetivos a corto, medio y largo plazo, ofreciendo una amplia lista de posibilidades, entre las que se encuentran, la mejora del EEDI y del SEEMP, planes de acción nacionales, mejora de la

cooperación técnica, actividades portuarias, investigación y desarrollo, mecanismos de reducción de emisiones y la adopción efectiva de combustibles alternativos bajos o neutros en carbono.

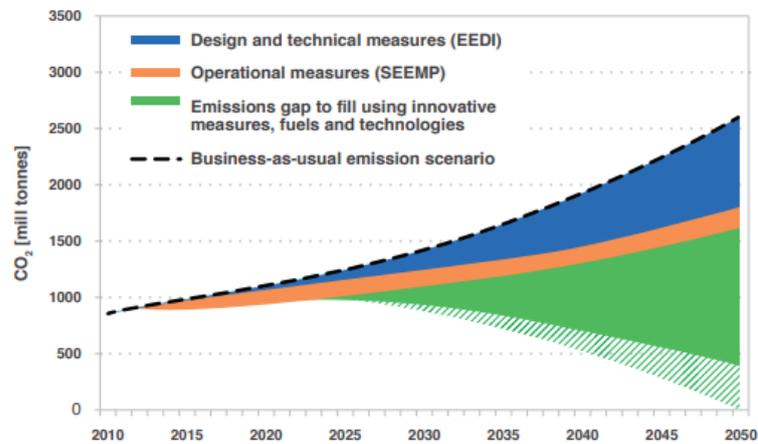


Figura 8. Vía de reducción de los GEI para alcanzar los objetivos de la OMI en 2050. Fuente: imo.org

En la Figura 8 se puede observar la vía general de reducción de gases de efecto invernadero de la OMI para reducir las emisiones de GEI, que tiene como objetivo llegar a niveles mínimos en el año 2050. Se puede observar que, gracias a la implementación del EEDI y del SEEMP, las emisiones de CO2 disminuirán significativamente y, además, gracias a la implementación de combustibles verdes y tecnologías óptimas, estas emisiones podrán llegar a niveles insignificantes.

1.3.1.1. Convenio MARPOL

Este convenio es el principal convenio internacional que trata la prevención de la contaminación del medio marino a causa del transporte marítimo. Se adoptó en 1973 y ha ido evolucionando y actualizándose a lo largo de los últimos años mediante la incorporación de nuevos protocolos y regulaciones, constanding hoy en día de dos protocolos y 6 anexos.

El anexo más relevante del convenio MARPOL para este trabajo es el **anexo VI**, formado por 5 capítulos y 25 reglas, que entró en vigor el 19 de mayo de 2005 y consiste en **reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques**, limitando las emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno de los escapes de los buques y prohibiendo las emisiones deliberadas que agotan el ozono [5]. A continuación, se muestra una tabla de la estructura del anexo VI del convenio MARPOL 73/78, resaltando los capítulos que más relevancia tienen en este trabajo. Posteriormente, se explicarán más detalladamente las medidas implementadas y especificadas en los capítulos 3 y 4 del anexo VI del convenio MARPOL.

Tabla 2. Estructura del anexo VI del convenio MARPOL. Fuente: propia basada en el convenio MARPOL

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	CAPÍTULO 2: RECONOCIMIENTO, CERTIFICACIÓN Y MEDIOS DE CONTROL	CAPÍTULO 3: PRESCRIPCIONES PARA EL CONTROL DE LAS EMISIONES DE LOS BUQUES	CAPÍTULO 4: REGLAS SOBRE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS BUQUES	CAPÍTULO 5: VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LAS DISPOSICIONES DEL ANEXO
Regla 1 – Ámbito de aplicación	Regla 5 - Reconocimientos	Regla 12 – Sustancias que agotan la capa de ozono	Regla 19 - Ámbito de aplicación	
Regla 2 – definiciones	Regla 6 – Expedición o refrendo de los certificados y declaraciones de cumplimiento sobre la notificación del consumo de <i>fueloil</i>	Regla 13 – Óxidos de nitrógeno (NO _x)	Regla 20 – Índice de eficiencia energética de proyecto obtenido (EEDI obtenido)	
Regla 3 – Excepciones y exenciones	Regla 7 – Expedición o refrendo del certificado por otra Parte	Regla 14 – Óxidos de azufre (SO _x) y materia particulada	Regla 21 – EEDI alcanzado (prescrito)	
Regla 4 - Equivalentes	Regla 8 – Modelos de los certificados y declaraciones de cumplimiento sobre la notificación del consumo de <i>fueloil</i>	Regla 15 – Compuestos orgánicos volátiles (COV)	Regla 22 – Plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP)	

	Regla 9 – Duración y validez de los certificados y declaraciones de cumplimiento sobre la notificación del consumo de <i>fueloil</i>	Regla 16 – Incineración a bordo	Regla 22 A – Recopilación t notificación de los datos sobre el consumo de <i>fueloil</i> del buque
	Regla 10 – Supervisión de las prescripciones operacionales por el Estado rector del puerto	Regla 17 – Instalaciones de recepción	Regla 23 – Fomento de la cooperación técnica y de la transferencia de tecnología relacionadas con la mejora de la eficiencia energética de los buques
	Regla 11 – Detección de transgresiones y cumplimiento	Regla 18 – Calidad y disponibilidad del <i>fueloil</i>	

Capítulo 3: Prescripciones para el control de las emisiones de los buques

Este capítulo está formado por 7 reglas que regulan las emisiones de gases contaminantes procedentes de los buques. Sin embargo, en este apartado sólo se explicarán las reglas 12, 13 y 14, dado que son las que regulan el control de las emisiones contaminantes que se estudian en este trabajo.

Regla 12: sustancias que agotan la capa de ozono

Esta regla establece la prohibición de todas las emisiones deliberadas de sustancias, o de instalaciones que contengan sustancias, que agoten la capa de ozono en buques. La causa principal del agotamiento de la capa de ozono son los **clorofluorocarbonos (CFC)**, que se encuentran en los sistemas más antiguos de refrigeración y conrainsendios, y los **halones**, hallados en los equipos portátiles. Está prohibida la instalación de sistemas que contengan CFC en

todos los buques construidos a partir del 19 de mayo de 2005, así como la instalación de estos sistemas en buques ya existentes a partir de esta fecha. También está prohibida la emisión de **hidroclorofluorocarbonos (HFCF)**, que se introdujeron como sustitutos de los clorofluorocarbonos ya que también son sustancias que agotan la capa de ozono.

Las unidades que se encuentren permanentemente selladas están exentas de la prohibición de contener las sustancias enumeradas previamente. En consecuencia, los buques con sistemas o equipos a bordo que contengan sustancias que agoten la capa de ozono y que deben tener un Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación Atmosférica (IAPP), deberán mantener una lista de estos equipos, así como de todas las operaciones de suministro, recarga, reparación, descarga y eliminación.

[Regla 13: óxidos de nitrógeno \(NO_x\)](#)

Esta regla tiene como objetivo controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno emitidas por los motores diésel marinos instalados de potencia de salida superior a 130 kW distintos de los utilizados exclusivamente para casos de emergencia, independientemente del arqueo del buque en el que se instalen estos motores [6]. Esta regla aplica diferentes niveles de control basados en la fecha de construcción del buque y en el régimen nominal del motor.

Tabla 3. Niveles de control de emisiones de NO_x. Fuente: imo.org

Nivel	Fecha de construcción del buque	Valor límite de emisión ponderada total del ciclo (g/kWh)		
		n = régimen nominal del motor (rpm)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1 de enero de 2000	17,0	$45 \cdot n^{(-0,2)}$	9,8
II	1 de enero de 2011	14,4	$44 \cdot n^{(-0,23)}$	7,7
III	1 de enero de 2016	3,4	$9 \cdot n^{(-0,2)}$	2,0

El nivel III sólo se aplica a buques específicos mientras navegan en las zonas ECA establecidas para limitar las emisiones de NO_x, fuera de estas zonas se aplican los controles de nivel II. No obstante, los motores diésel marinos instalados en buques construidos a partir del 1 de enero de 2016 y que naveguen en la zona ECA de Norteamérica y del mar Caribe deberá cumplir las normas de nivel III.

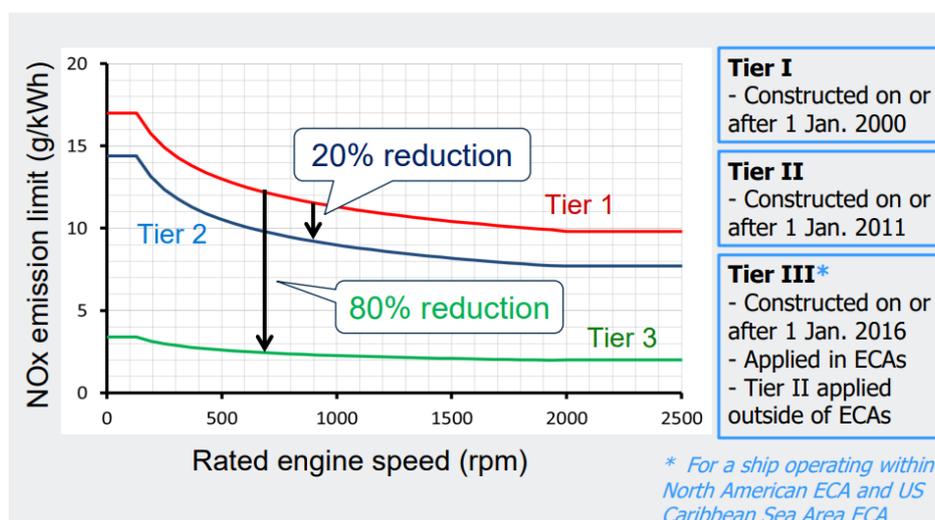


Figura 9. Emisiones límite de NO_x según el anexo VI del convenio MARPOL. Fuente: Convenio MARPOL

Regla 14: óxidos de azufre (SO_x) y materia particulada

Esta regla se aplica a todos los dispositivos de combustión a bordo que trabajen con cualquier tipo de *fueloil*, incluyendo motores principales y auxiliares, calderas y generadores de gas inerte. El control de las emisiones de SO_x y de materia particulada es diferente en las zonas especiales (ECA) y fuera de estas, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4. Límite de azufre dentro y fuera de zonas ECA. Fuente: imo.org

Fuera de una ECA establecida para limitar las emisiones de SO _x y de materia particulada	En una ECA establecida para limitar las emisiones de SO _x y de materia particulada
4,5% masa/masa antes del 1 de enero de 2012	1,5% masa/masa antes del 1 de julio de 2010
3,5% masa/masa a partir del 1 de enero de 2012	1,0% masa/masa antes del 1 de julio de 2010
0,5% masa/masa a partir del 1 de enero de 2020	0,10% masa/masa antes del 1 de julio de 2010

Zonas ECA

Las zonas ECA (*Emission Control Areas*) son aquellas zonas donde existe un control sobre los gases emitidos por los buques que contengan azufre, óxidos nitrosos o materia particulada. Por tanto, en estas zonas los buques deben cambiar el tipo de combustible empleado en la maquinaria principal y auxiliar por combustibles con un bajo contenido en azufre. Los cambios a combustibles con bajo contenido en azufre al entrar y salir de dichas zonas se debe registrar. Existen diferentes zonas ECA en virtud del convenio MARPOL según el anexo del que se trate.

Tabla 5. Zonas ECA de acuerdo con el anexo VI del convenio MARPOL. Fuente: imo.org

Zonas especiales	Emisiones	Adopción	Entrada en vigor	Con efecto desde
Mar Báltico	SO _x	26 de septiembre de 1997	19 de mayo de 2005	19 de mayo de 2006
Mar del Norte	SO _x	22 de julio de 2005	22 de noviembre de 2006	22 de noviembre de 2007
ECA de Norteamérica	SO _x y materia particulada	26 de marzo de 2010	1 de agosto de 2011	1 de agosto de 2012
	NO _x	26 de marzo de 2010	1 de agosto de 2011	*
ECA del mar del Caribe y de Estados Unidos	SO _x y materia particulada	26 de julio de 2011	1 de enero de 2013	1 de enero de 2014
	NO _x	26 de julio de 2011	1 de enero de 2013	*

*Los buques construidos el 1 de enero de 2016 o posterior que operen en estas zonas cumplirán las normas del nivel III de la regla 13 explicada previamente.

La Figura 10 muestra un mapa de las zonas ECA existentes en color azul y en verde las que son candidatas en ser zonas de bajas de emisiones.

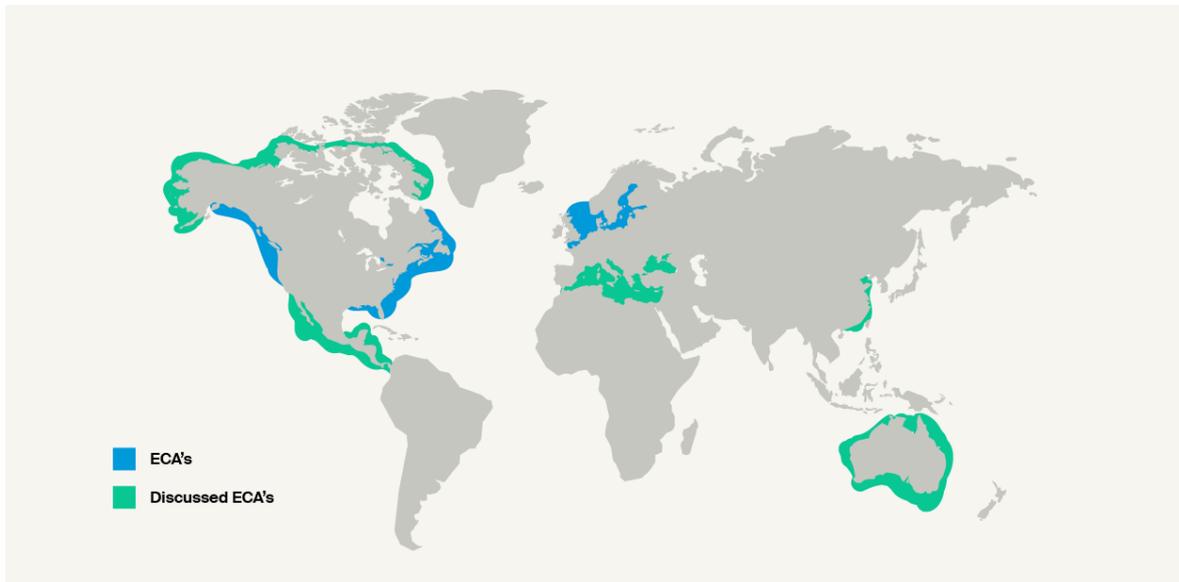


Figura 10. Zonas ECA. Fuente: künhe-nagel.com

Capítulo 4: Reglas sobre la eficiencia energética de los buques

Este capítulo del anexo VI, está compuesto de 5 reglas que permiten la mejora de la eficiencia energética de los buques. Las reglas que se expondrán a continuación son las reglas 20, 21 y 22 que hacen referencia al **índice de eficiencia energética del proyecto (EEDI)**, mediante la mejora del diseño, y al **plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP)**, mediante la mejora en las operaciones. Tal y como se ha descrito con anterioridad al principio del apartado, estas dos medidas son obligatorias para todas las embarcaciones que a continuación se detallan.

Reglas 20 y 21: Índice de eficiencia energética de proyecto alcanzado (EEDI alcanzado) y EEDI requerido.

Este índice la **medida técnica** más importante para los buques nuevos. Su principal objetivo es la reducción de gases contaminantes mediante la incentivación del uso de equipos y maquinaria de mayor eficiencia energética. El EEDI se puso en marcha el 1 de enero de 2013 y hace obligatorio el cumplimiento del nivel de eficiencia requerido, que se ajusta de manera gradual cada cinco años. Gracias a este ajuste gradual, se garantiza el desarrollo técnico de los componentes que afectan a la eficiencia del buque en función del consumo de combustible. Se elaboró para los buques más voluminosos de la flota mercante mundial como petroleros, graneleros, portacontenedores o

buques de carga general entre otros. Este índice exige un nivel de eficiencia mínimo por milla de capacidad para todos los nuevos proyectos de buque, dicho nivel variará de acuerdo con el tipo de buque.

Los constructores y proyectistas pueden implementar las soluciones que deseen para que los buques cumplan la normativa, ya que esta regla no restringe las tecnologías a emplear. Cada proyecto de buque posee un índice de eficiencia energética concreto y se expresa en gramos de dióxido de carbono por milla de capacidad del buque, así, **cuanto menor sea el EEDI, mayor es la eficiencia energética.**

Esta medida afecta a los buques construidos el 1 de enero de 2013 o posterior de más de 400 GT, y los tipos de buques a los que afecta se detallan a continuación.

Tabla 6. Buques a los que se les aplica el EEDI. Fuente: Convenio MARPOL.

Buques a los que se les aplica el EEDI	
Graneleros	Carga combinada
Transportistas de gas	Buques de carga Ro-Ro (transportadores de vehículos)
Petroleros	Buques de carga Ro-Ro
Buques mercantes	Buques de carga Ro-Ro (de pasaje)
Carga general	Buque metanero
Carga refrigerada	Cruceiros de pasajeros (propulsión no convencional)

El cálculo del **EEDI alcanzado** expresa la cantidad de CO₂ generado por un buque mientras se realiza una tonelada-milla de trabajo de transporte.

$$EEDI = \frac{\text{emisiones de CO}_2}{\text{trabajo de transporte}} \quad (1)$$

El cálculo más complejo del EEDI se consigue a través de la siguiente fórmula, que tiene en cuenta las características de cada tipo de buque y de los combustibles y tecnologías que emplea para su funcionamiento. Las unidades de este cálculo son gramos de CO₂/toneladas-milla.

$$\begin{aligned}
 EEDI = & \frac{(\prod_{f=1}^n f_j)(\sum_{f=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE(i)} \cdot C_{FAE(i)} \cdot SFC_{AE*(i)}) +}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Capacidad} \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \\
 & + \frac{((\prod_{f=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) -}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Capacidad} \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \\
 & - \frac{(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME**})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Capacidad} \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m}
 \end{aligned} \quad (2)$$

Sin embargo, tal y como indica la regla, también existe el **EEDI requerido**, que es el límite reglamentario y su cálculo implica el uso de líneas de referencias y factores de reducción (X). Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$EEDI \text{ alcanzado} \leq EEDI \text{ requerido} = \left(\frac{1-X}{100}\right) \cdot \text{valor del nivel de referencia} \quad (3)$$

En la ecuación (3), se pueden observar 2 parámetros:

- Factor de reducción (X). Restringe el valor del EEDI en las fases futuras y depende del tipo y tamaño de buque.
- Línea de referencia. Existe una línea de referencia para cada tipo de buque. Su valor se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Valor línea de referencia} = a \times b^{-c} \quad (4)$$

En la ecuación (4) se observan los parámetros a y c, que son valores que dependen del tipo de buque y están especificados en la tabla que se muestra a continuación, y b, que es el peso muerto del buque.

Tabla 7. Valores parámetro línea de referencia para el cálculo del EEDI. Fuente: imo.org

Tipo de buque	a	b	c
Granelero	961,79	TPM del buque	0,477
Metanero	1120,00	TPM del buque	0,456
Petrolero	1218,00	TPM del buque	0,488
Portacontenedores	174,22	TPM del buque	0,201
Buque de carga	107,48	TPM del buque	0,216
Frigorífico	227,01	TPM del buque	0,244
Transporte combinado	1219,00	TPM del buque	0,488
Ro-Ro (transporte de vehículos)	si $TPM/TRB < 0,3$ $(TPM/TRB)^{0,7} * 780,36$ si $TPM/TRB \geq 0,3$ 1812,63	TPM del buque	0,471
Ro-Ro	1405,15	TPM del buque	0,498
Ro-Ro (transporte de pasajeros)	752,16	TPM del buque	0,381
Transportador GNL	2253,7	TPM del buque	0,474
Cruceros de propulsión no convencional	170,84	TPM del buque	0,214

El EEDI tiene diferentes fases y, tal y como se ha especificado previamente, se va ajustando de manera gradual cada cinco años, consiguiendo que cada vez sea más estricto y, en consecuencia, se reduzcan cada vez más las emisiones de CO₂.

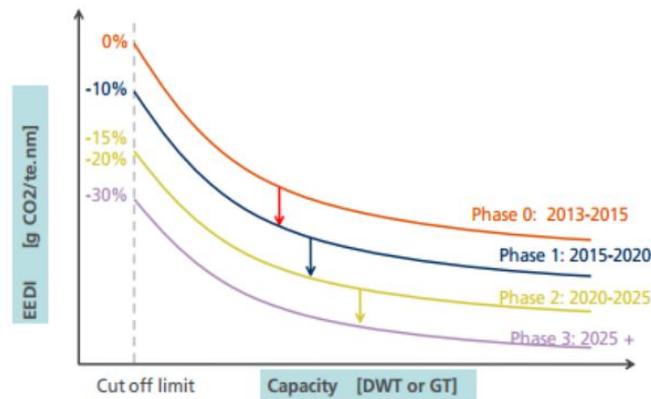


Figura 11. Fases del EEDI. Fuente: *IMO the Trainer Course on Energy Efficient Ship Operation – Module 2*

En la figura se puede apreciar que el EEDI es más estricto cuanto mayor capacidad tiene el buque y que, conforme pasa el tiempo el EEDI se va restringiendo cada vez más, consiguiendo así que las emisiones de CO₂ disminuyan.

Regla 22: Plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP)

El Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque es una **medida operativa** que establece un mecanismo para mejorar la eficiencia energética del buque de una manera eficaz y económica durante su operación. Este plan también proporciona un enfoque para las navieras con el objetivo de mejorar la gestión y controlar la eficiencia de las flotas y los buques mediante herramientas de monitoreo, como por ejemplo el **Indicador Operacional de la Eficiencia Energética (EEOI)**, que es un instrumento voluntario que permite a los armadores medir el consumo eficiente de combustible de un buque en servicio y calibrar el efecto de cualquier cambio que se produzca en el funcionamiento del buque [7].

Es de obligada realización para todos aquellos buques de más de 400 GT construidos a partir del 1 de enero de 2013 y que operen a nivel internacional, y sustituye un plan que previamente estaba implementado por las empresas en valor de la ISO 14001. Debe desarrollarse teniendo en cuenta las directrices pertinentes de la OMI. Una vez se confirma que el buque cuenta con un SEEMP a bordo, se le otorga un certificado IEE (*International Energy Efficiency*)³. Es muy importante destacar que el SEEMP es específico para cada buque, ya que tiene en cuenta diversos factores del tipo de embarcación.

El SEEMP se implementa como parte del sistema de gestión de calidad y busca seguir un ciclo de mejora continua PDCA, siglas que en representan planificación, implementación, supervisión y autoevaluación.

- Planificación. Durante esta fase se examinan tanto el nivel actual de eficiencia energética, como las posibles mejoras que se podrían implementar para un resultado óptimo y eficaz. Se han de documentar una serie de Medidas de Eficiencia Energética o EEM (*Energy-Efficiency Measures*) que son cruciales para el desarrollo del SEEMP. Es una fase esencial para el desarrollo de este plan.
- Implementación. Para llevar a cabo la implementación del SEEMP, se deben tener en cuenta dos procedimientos:
 - **Establecimiento de un sistema de implementación que asegure la puesta en marcha de los EEM seleccionados.** También es importante indicar la fecha de inicio y finalización del sistema para así poder completar la etapa de implementación.
 - **Mantenimiento de registros**, que es beneficioso para la mejora continua y la autoevaluación de los EEM.
- Supervisión. Los aspectos de esta fase deben haber sido aclarados, previamente, en la fase de planificación. Para conseguir un resultado óptimo en la revisión del plan es imprescindible el sistema de supervisión, incluyendo procedimientos para la recopilación de datos y la asignación de personal.

³ expedido a cualquier buque de 400 toneladas brutas o más antes de que pueda realizar travesías a otros puertos o terminales en alta mar bajo la jurisdicción de otras partes.

- **Autoevaluación.** El objetivo de la autoevaluación es asegurarse que la efectividad de las medidas es positiva y poder mejorar cualquier desperfecto para un resultado óptimo. En esta fase se utilizan los datos recopilados en la fase de supervisión. Es importante realizar autoevaluaciones de manera periódica.

Por otro lado, el SEEMP debe incluir obligatoriamente 5 puntos esenciales, que son:

- Detalles de identificación del buque
- Medidas de eficiencia energética y cómo implementarlas, personas responsables y línea de tiempo
- Aspectos de supervisión
- Objetivos
- Aspectos de evaluación

Índice de eficiencia energética de proyecto para buques existentes (EEXI)

Como ya se ha expuesto, es el EEXI es el EEDI para buques existentes y está previsto que entre en vigor el 1 de enero de 2023. Este índice utiliza la misma metodología que el EEDI y determina la relación de las emisiones de CO₂ con la potencia nominal del motor instalado, la capacidad de transporte y la velocidad del buque. El EEXI está dirigido a los buques de más de 400 GT que se encuentran en el anexo VI del convenio MARPOL.

La implementación del EEXI es una consecuencia de la actualización de las directrices de la OMI ya existentes cuyo objetivo es reforzar las medidas que permitan disminuir la liberación de GEI para alcanzar cuanto antes los objetivos de reducción de emisiones contaminantes.

Indicador de intensidad de carbono (CII)

El CII, igual que el EEXI, está previsto que entre en vigor el 1 de enero de 2023. Se trata de un indicador obligatorio que relaciona las emisiones de GEI con la cantidad de carga transportada y la distancia recorrida. Este índice se aplicará a los buques de más de 5000 GT.

A partir de este indicador, los buques obtendrán la clasificación de eficiencia energética que los clasifica desde la letra A hasta la E, siendo A la mejor. Así, los buques designados con la clase A o B serán los más eficientes, mientras que aquellos que sean calificados con la letra D o E deberán presentar un plan de acción correctiva que les permita alcanzar las clases C o superiores.

En el capítulo 4 del presente proyecto se elabora el cálculo del CII en un caso real, donde se explica el valor de cada parámetro y cómo se determina.

1.3.1.2. La Agenda 2030

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible es un plan de acción aprobado por todos los Estados pertenecientes a la Organización de las Naciones Unidas en el año 2015 y consta de 17 objetivos, que son los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Estos objetivos se establecieron para hacer frente a los retos sociales, económicos y medioambientales de la globalización, poniendo en el centro a las personas, el planeta, la prosperidad y la paz, bajo el lema de “no dejar a nadie atrás” [8]. La OMI trabaja junto a la ONU por el cumplimiento de la Agenda 2030 y de sus ODS, ya que algunos de estos objetivos se lograrán gracias a un transporte marítimo más limpio y sostenible. Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, **la OMI ha implementado medidas para la reducción de la contaminación del transporte marítimo en apoyo al Objetivo Sostenible 13 de acción por el clima y al Objetivo Sostenible 14 de vida submarina.**



Figura 12. Objetivos de desarrollo sostenible. Fuente: un.org

1.3.2. Medidas implementadas por la Comisión Europea

El transporte marítimo es esencial para la economía, ya que supone un 77% del comercio externo de la Unión Europea y un 35% de todo el comercio intracomunitario, es decir, casi 4000 millones de toneladas de carga gestionadas por puertos de la UE [9], lo cual trae beneficios económicos y sociales. Sin embargo, la alta actividad del sector marítimo contribuye a la contaminación y al calentamiento global, así como a los ciudadanos de la UE y a los ecosistemas costeros y marinos. Para paliar los efectos de las emisiones de GEI, la Unión Europea ha implementado diferentes medidas y estrategias a lo largo de los años.

Desde finales de 1990, la Unión Europea ha ido implementando leyes aplicables a buques que operan en aguas europeas, así como a buques que llegan o zarpan de puertos pertenecientes a la UE. La mayoría de estas leyes están basadas en las leyes establecidas por la Organización Marítima Internacional y son coherentes con el marco internacional, pero van más allá en su ámbito de aplicación, ya que muchas de estas leyes se aplican también a trayectos nacionales. Asimismo, la Unión Europea establece leyes más claras y estrictas de obligado cumplimiento para contribuir de manera eficaz a la seguridad marítima y la protección del medioambiente.

La política ambiental de la UE está basada en los artículos 11 y 191-193 del **Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea**. Tanto los objetivos como los principios en los que se basa esta política son vinculantes para todos los estados miembros de la Unión Europea, e incorporan más de 200 leyes en categorías tales como calidad del aire, gestión de residuos, calidad del agua, protección de la naturaleza, control de la contaminación industrial, productos químicos o cambio climático. Dentro de esta política ambiental se encuentran las leyes para la prevención de la contaminación de todos los buques cuya bandera sea de un estado miembro de la UE, que naveguen hacia o desde puertos de la UE o que comercialicen a nivel nacional en aguas de la UE, así como leyes para la protección y conservación del medio marino.

1.3.2.1. Pacto Verde Europeo

El **Pacto Verde Europeo** es una estrategia de la Unión Europea para lograr la **neutralidad climática** de aquí a 2050, cumpliendo sus compromisos en el marco del Acuerdo de París. El paquete legislativo «Objetivo 55» permite cumplir esta ambición de la UE [10].

Se define como **una respuesta a los desafíos del clima y del medio ambiente**, y se trata de una estrategia de crecimiento destinada a transformar la UE en una sociedad equitativa y próspera, con una economía moderna, eficiente en el uso de los recursos y competitiva, en la que no habrá emisiones netas de gases de efecto invernadero en 2050 y el crecimiento económico estará disociado del uso de los recursos [11].

Este pacto incluye a la comunidad marítima en lo referente a la adopción de una estrategia de crecimiento que requiere un transporte marítimo moderno, sostenible, competitivo y eficiente en el uso de recursos, que permita reducir las emisiones de GEI para el año 2050 y la disociación del crecimiento económico del sector del uso de los recursos. Entre otros, el Pacto Verde Europeo, a través del Plan del Objetivo Climático para 2030, menciona la posible ampliación del Sistema de Comercio de Emisiones al sector marítimo, y **establece la ambición de aumentar la producción y la implementación de combustibles alternativos sostenibles, así como la necesidad de contar con un transporte marítimo más limpio**, a través del uso de energía eléctrica en los atracaderos y limitar parcialmente el acceso de los buques más contaminantes.

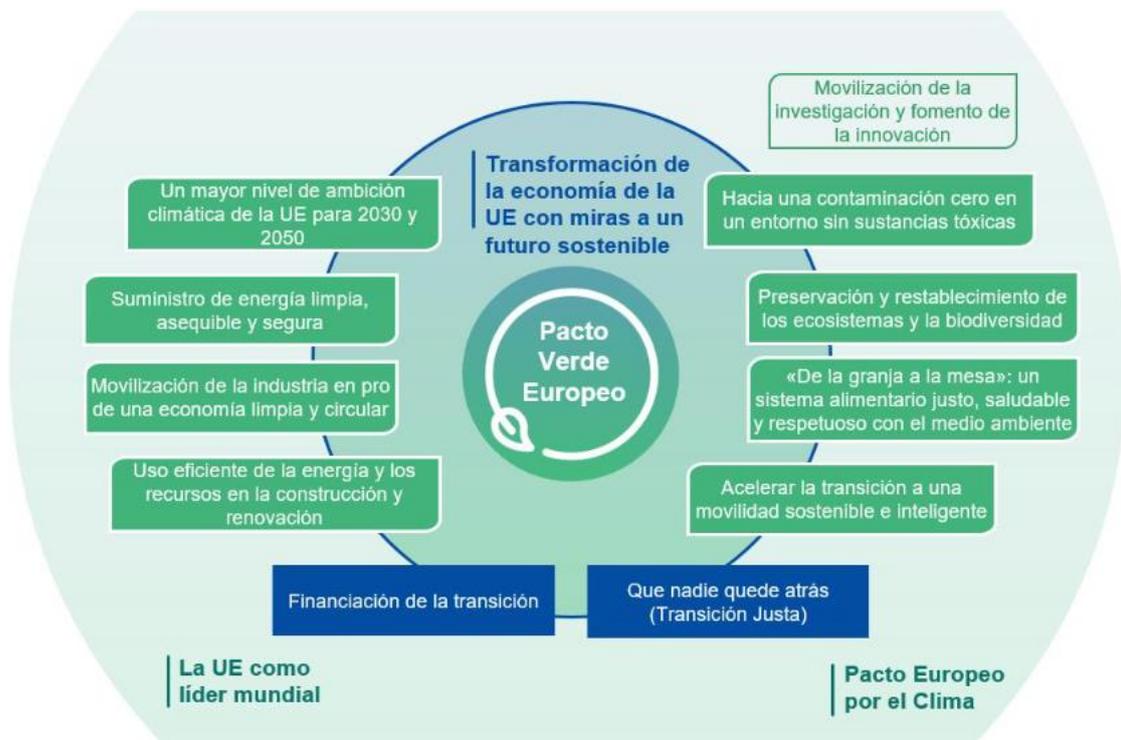


Figura 13. Esquema Pacto Verde Europeo. Fuente: EUR-Lex

Capítulo 2. Combustibles alternativos

2.1. Amoniac

El amoniaco (NH_3) es un compuesto químico que se ha adoptado para diferentes sectores y usos. Hoy en día, no sólo se encuentra en productos comerciales, sino que se ha vuelto esencial en algunas industrias y es el futuro de muchas otras, como la del transporte marítimo. Sin embargo, no existe regulación para su abastecimiento.

El principal objetivo de emplear el amoniaco como combustible alternativo es eliminar las emisiones de gases contaminantes que se liberan a la atmósfera, tanto en el proceso de fabricación del amoniaco, como en su combustión y uso como combustible en la industria del transporte marítimo.

Este apartado presenta las propiedades del amoniaco, su aplicación hasta la fecha en el sector naval, diferentes métodos de emplearlo para alimentar buques, y las ventajas y desventajas que presenta respecto a otros combustibles.

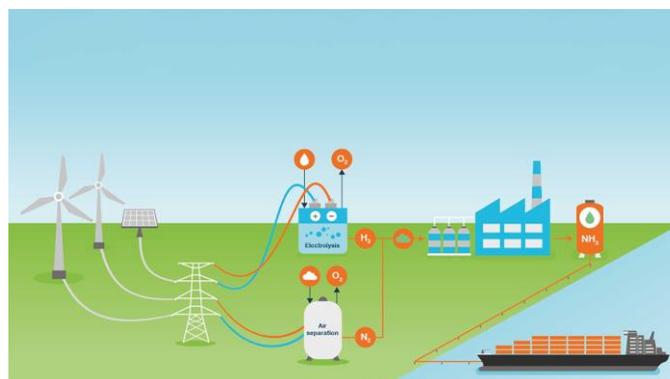


Figura 14. Ciclo cero emisiones de amoniaco. Fuente: man-es.com

2.1.1. Propiedades y generalidades

El amoníaco es un combustible libre en azufre y carbono, por lo que no produce emisiones de gases contaminantes (SO_x y CO_2). Se puede producir de forma natural por bacterias que se encuentran en el suelo, las cuales degradan materia orgánica que proviene de seres vivos. Sin embargo, dadas sus propiedades y su potencial, se comenzó a producir de manera industrial en el año 1910.

Es un compuesto muy prometedor para sustituir a los combustibles convencionales debido a las **escasas emisiones contaminantes que genera**. Como se ha expuesto en el capítulo anterior, la Organización Marítima Internacional regula de manera muy estricta la emisión de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, materia particulada y dióxido de carbono y, dado que el NH_3 no genera (o genera de manera insignificante) estos gases, es una opción muy atractiva en cuanto al cumplimiento de esta normativa.

Tabla 8. Reducción de emisiones contaminantes en comparación con HFO. Fuente: MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia

Reducción de emisiones en comparación con <i>fueloil</i> pesado				
Emisiones	SO_x	NO_x	CO_2	Materia particulada
Amoniaco (NH_3) (líquido, 33°C)	100%	Cumple con la normativa	≈90%	≈90%

A temperatura y presión atmosférica el NH_3 se encuentra en estado gaseoso, pero puede obtenerse en estado líquido si se somete a altas temperaturas [12]. Al someter el NH_3 a presiones más elevadas también se puede obtener en forma líquida, lo cual supone una ventaja porque en este estado es más fácil transportarlo y almacenarlo. **Su combustión genera altas emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de dióxido de nitrógeno (NO_2), pero gracias a las estrategias óptimas de combustión y a los sistemas de postratamiento, estas emisiones se pueden mitigar e incluso eliminar.** Se considera que el amoníaco es una solución adecuada y equilibrada en términos de densidad de energía y costo de producción sintética renovable, que es el gasto necesario para producir un bien o producto. También es una buena alternativa para transportar hidrógeno (H_2), que es otro candidato en la descarbonización del transporte marítimo.



Figura 15. Buque propulsado con amoníaco. Fuente: naucher.com

Usos industriales del amoníaco

La producción mundial de amoníaco es aproximadamente 180 millones de toneladas, de las cuales un 80% aproximadamente se convierte en materia prima para la **producción de fertilizantes**, dado que es abundante en nutrientes que enriquecen el suelo. También se emplea en la **agricultura**, porque no tiene un impacto negativo en el medio ambiente o en el suelo. En esta industria se puede aplicar directamente al suelo como nutriente vegetal, dado su alto contenido de nitrógeno, o a través de fertilizantes. La **industria textil** también emplea el amoníaco, en su forma líquida, para la producción de tintes en la coloración de textiles y en la industria del curtido, así como para la producción de tejidos sintéticos. En menor medida, la **industria armamentística** también usa el amoníaco para la producción de explosivos, dado que es un compuesto inflamable. Por último, la **industria cosmética** también se beneficia de las propiedades del NH_3 porque, en concentraciones muy específicas, se emplea en la producción de tintes para el cabello.

Además de estos usos industriales, el amoníaco comenzó a llamar la atención para emplearse como combustible gracias a sus propiedades físicas y termodinámicas, las cuales se enumeran en la siguiente tabla.

Tabla 9. Propiedades del NH₃. Fuente: Sustainability Whitepaper ABS: Ammonia as marine fuel

Propiedad	Valor
Densidad de energía por volumen [MJ/L]	12,7
Calor latente de vaporización [MJ/kg]	188
Calor de vaporización [kJ/kg]	1371
Temperatura de autoignición [°C]	651
Energía mínima de ignición [mJ]	680
Densidad líquida [kg/m ³]	600
Temperatura adiabática de llama a 1 bar [°C]	1800
Peso molecular [g/mol]	17,031
Punto de fusión [°C]	-77,7
Punto de ebullición a 1 bar [°C]	-33,6
Temperatura crítica [°C]	132,25
Presión crítica [bar]	113
Límites de inflamabilidad en aire [%]	15,15 – 27,35
Índice de cetano ⁴	0
Índice de octano ⁵	130

⁴ tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión

⁵ capacidad antidetonante del combustible cuando se comprime dentro del cilindro de un motor

En esta tabla se puede apreciar que el amoniaco tiene unos límites de inflamabilidad bastante limitados, y que además **es muy reactivo y tóxico**. La toxicidad del amoniaco es un importante punto para tener en cuenta a la hora de trabajar con él. Otra propiedad del NH_3 que hay que destacar es su índice de cetano que, tal y como se puede observar, es 0. El índice de cetano es una medida que sirve como referencia para determinar el grado de inflamabilidad de un compuesto y, si es demasiado bajo, tiene lugar una mala combustión y provoca irregularidades en el funcionamiento del motor. A pesar de que el amoniaco posea un índice de cetano nulo, existen alternativas para que se pueda emplear en motores de combustión interna y que la combustión tenga lugar, tal y como se explicará más adelante en este capítulo. Todas **estas propiedades afectan a la combustión del amoniaco y, en consecuencia, al rendimiento de los motores que lo empleen como combustible**, aunque existen alternativas para paliar dichos efectos.

Como se observa en la Tabla 9, el punto de ebullición del amoniaco es $-33,3^\circ\text{C}$ y, por tanto, si se aplica una presión moderada se puede obtener en estado líquido a temperatura ambiente. Si se somete presiones superiores a 8,6 bar a 20°C el amoniaco es líquido con una densidad de $0,61 \text{ t/m}^3$ (toneladas/ m^3). En su punto de ebullición, tiene una densidad de $0,68 \text{ t/m}^3$.

Tabla 10. Resumen de las características del amoniaco. Fuente: [13]

FISICOQUÍMICAS	INTERACCIONES	TERMODINÁMICAS
<ul style="list-style-type: none">• Gas incoloro• Soluble en agua• Menos denso que el aire• Fuerte olor punzante	<ul style="list-style-type: none">• Gas muy reactivo• Sustancia corrosiva• Compuesto peligroso para la salud• Reacciona violentamente con ácidos, oxidantes fuertes y halógenos	<ul style="list-style-type: none">• Dificultad para arder• Dificilmente inflamable (límites de inflamabilidad estrechos)• A $400\text{-}450^\circ\text{C}$ se descompone en N_2 y H_2

Tanto la densidad de energía por volumen, como el poder calorífico en base al valor calorífico inferior del NH_3 ($18,6 \text{ MJ/kg}$) son bajos en comparación con los combustibles fósiles como el HFO o el MGO. Por ejemplo, **el contenido energético del amoniaco en comparación con el MGO es menos de la mitad en base a la masa y alrededor del 30% en base al volumen en estado líquido**. Una consecuencia de que **la densidad de energía por volumen sea menor que la de los *fueloils*, es que requieren más volumen para ser almacenados** [14]. En la tabla que se muestra a

continuación, se observan algunas de las características del amoníaco en comparación con otros combustibles.

Tabla 11. Comparación de volumen requerido por energía en base al calor específico inferior. Fuente: DNV-GL: ammonia as marine fuel

Propiedad	Gasoil Marino (MGO)	Gas Licuado del Petróleo (GLP)	H ₂ a 350 bar	H ₂ líquido	Amoníaco
Densidad [t/m ³]	0,835	0,49	0,023	0,071	0,61
Poder calorífico inferior [GJ/t]	42,7	46	120	120	18,6
Densidad de energía por volumen [GJ/m ³]	35,7	22,6	2,80	8,52	11,4
Volumen [m ³ /GJ] normalizado	1	1,58	12,75	4,18	3,14

Otra gran ventaja del amoníaco es que ya se produce, transporta y almacena a niveles industriales. Actualmente se produce a través del proceso de Haber-Bosch, que combina gas de nitrógeno y de hidrógeno a temperaturas y presiones muy elevadas (**Anexo 2**). La obtención del hidrógeno para que tenga lugar este proceso puede variar, resultando en tres tipos diferentes de amoníaco: marrón, azul y verde, que se detallan a continuación.

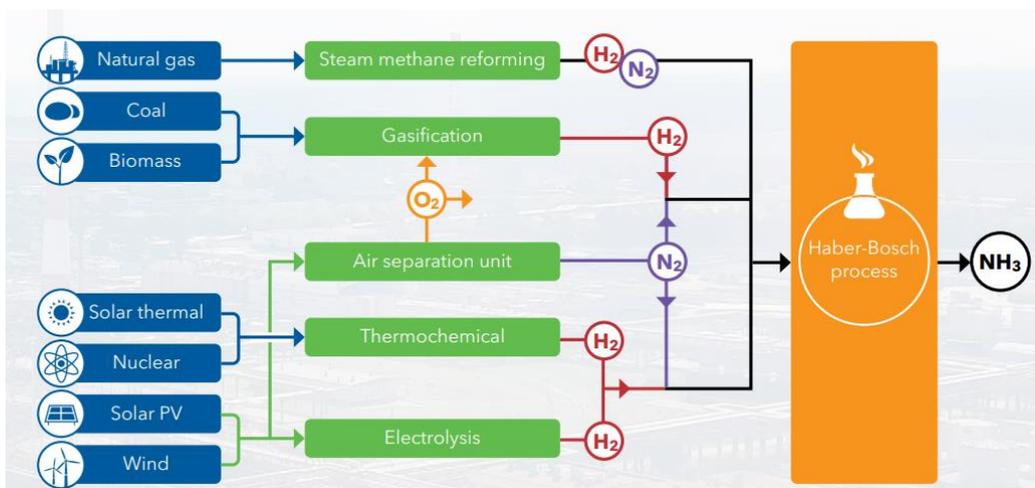


Figura 16. Procesos de producción del amoníaco. Fuente: DNV-GL: ammonia as marine fuel

Por último, se encuentra el **amoniaco verde (green ammonia)** que no genera emisiones de CO₂ en la producción del hidrógeno, sino que éste se obtiene de fuentes de energías renovables como el agua, la energía solar y el viento y es, por tanto, la opción óptima para producir amoniaco.

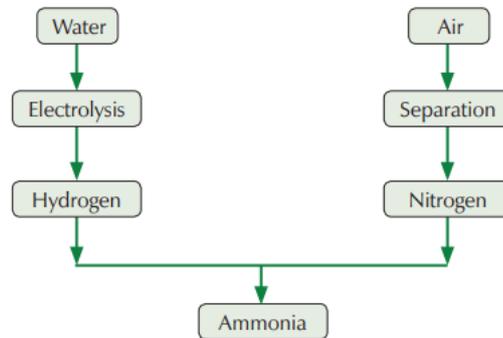


Figura 19. Proceso de obtención de *green ammonia*. Fuente: *A Critical Assessment of Green Ammonia Production and Ammonia Production Technologies*

Actualmente existen varios proyectos para la construcción de instalaciones de amoniaco verde a gran escala. La compañía noruega *Scatec* firmó en marzo de 2022 un acuerdo con el grupo ACME de la India para establecer una empresa que permita el diseño, desarrollo, construcción, posesión y operación de una instalación de amoniaco verde a gran escala en Omán [15].

Por otro lado, en marzo de 2021, Maersk respaldó la creación del mayor centro de producción europeo de amoniaco verde, cuya producción dará comienzo en marzo de 2026 y permitirá reducir las emisiones de CO₂ en 1,5 millones de toneladas [16].

2.1.2. Estudios y aplicación del amoniaco en el sector naval hasta la fecha

La empresa finlandesa *Wärtsilä*, junto con *Eidevisk Offshore*, firmó en octubre de 2021 un acuerdo de cooperación, cuyo objetivo es conseguir que un **buque de suministro de alta mar opere con un motor de combustión cuatro tiempos alimentado con amoniaco**. El buque en cuestión ya funciona con un motor de combustión dual alimentado principalmente con Gas Natural Licuado, y el objetivo es conseguir que el buque opere con un combustible de mezcla de amoniaco al 70%, y prevé el diseño de modelos que funcionen 100% con amoniaco para el año 2023.

Gracias a esta iniciativa, se está empezando a encargar a los astilleros la transformación de diferentes petroleros para que puedan operar con NH₃.



Figura 20. Motor Wärtsilä cuatro tiempos. Fuente: Wärtsilä

La empresa **MAN Energy Solutions** lleva a cabo un proyecto de implementación del amoniaco en un motor de combustión interna de dos tiempos, basado en su modelo de motor *ME-LGIP*. Esta empresa lleva años trabajando en este proyecto y a continuación, se muestra la evolución que ha tenido desde el año 2019 hasta la actualidad, así como las proyecciones para el año 2023 y 2024.

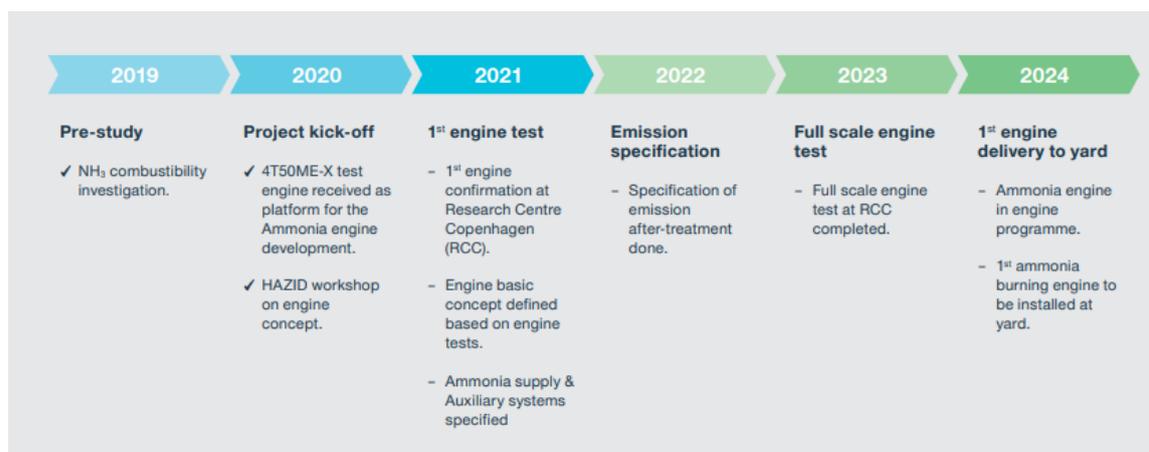


Figura 21. Programa de desarrollo de motor de NH₃ de dos tiempos. Fuente: *MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia*

Otro armador que ha empezado a implementar el amoniaco en sus buques es **Avin International SA**, un importante operador de buques tanque, que recientemente ha recibido el primer petrolero del mundo listo para operar con amoniaco. El buque en cuestión es un petrolero de 274 metros de eslora (ISO 9924326) construido por **New Times Shipbuilding** y clasificado por **American Bureau of Shipping (ABS)**, diseñado para operar con combustible convencional, pero que cumple los estándares de *American Bureau of Shipping (Ammonia Ready Level 1)* y, en

consecuencia, ya cuenta con la infraestructura, los sistemas de seguridad y los criterios de diseño para el amoniaco como combustible para la propulsión.



Figura 22. Petrolero Kri ti Future. Fuente: vesselfinder.com

En cuanto a la implementación del amoniaco en pilas de combustible, el instituto alemán **Fraunhofer** trabaja en el desarrollo de baterías de combustible de alta temperatura a base de amoniaco verde para implementarlas en el transporte marítimo. El plan del *proyecto Viking Energy* es que en el año 2023 un buque con celdas de combustible de NH_3 verde navegue.

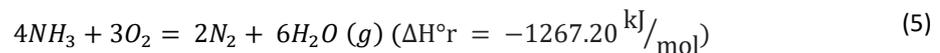
Además, para fomentar y apoyar la implementación del amoniaco como combustible marino, ABS publicó la guía ***Guide for ammonia fueled vessels*** con criterios de diseño para arreglos, construcción, instalación y reconocimiento de la maquinaria y los equipos y sistemas para embarcaciones, así como regulaciones para minimizar los riesgos para la embarcación, la tripulación y el medio ambiente.

2.1.3. Opciones para la obtención de energía a partir de amoniaco

Este apartado analiza algunos métodos de obtención de energía onshore a partir de amoniaco, como la obtención a través de la combustión del amoniaco, de turbinas de vapor y gas, de motores de combustión interna y de pilas de combustible.

Combustión

La principal ventaja de la combustión del amoníaco es que, al ser un gas libre de carbono y azufre, no genera emisiones de CO₂, SO_x o partículas. No obstante, la combustión pura del amoníaco tiene varios inconvenientes, como su alta temperatura de autoignición (651°C), su baja velocidad de llama y sus límites de inflamabilidad notablemente estrechos (15 – 27%). Además, puede producir emisiones de óxidos nitrosos. Estas características influyen en la utilización del NH₃ en motores.



Para mejorar estas características de combustión, el amoníaco se mezcla con otros combustibles que permiten complementar estas carencias termodinámicas.

Turbinas

Turbinas de vapor

Las turbinas de vapor convierten energía térmica del vapor presurizado en energía mecánica útil, a través de una transformación termodinámica de expansión. El vapor se obtiene gracias a que una caldera quema el combustible, provocando que su temperatura, presión y velocidad sean muy elevadas. Las toberas transportan el vapor generado en la caldera hasta la turbina, donde el vapor choca con unas paletas haciendo girar la turbina y el rotor de esta misma. Así, la energía química proveniente del combustible y empleada para calentar el agua de la caldera se transforma en energía cinética (del movimiento rotatorio del eje de la turbina). Para valorar la viabilidad de emplear el amoníaco en una turbina de vapor, **la combustión de dicho combustible debe ser capaz de generar suficiente calor como para formar vapor.**

Turbinas de gas

Las turbinas de gas transforman la energía almacenada en el combustible en energía mecánica útil (en forma de potencia de rotación). Estas máquinas emplean compresores para aumentar la presión del aire antes de que éste ingrese en la cámara de combustión, donde posteriormente se mezcla con combustible y se enciende, creando un gas caliente que se expande. Este gas impulsa la turbina de potencia, generando energía mecánica.

Estudios previos han demostrado que la combustión de amoníaco puro en una turbina de gas con inyección líquida es viable, pero presenta muchas limitaciones en comparación con combustibles de hidrocarburos [17], mientras que otros estudios concluyen que las propiedades de combustión pueden mejorar al emplearse mezclas de amoníaco e hidrógeno [18].

Las principales limitaciones de aplicar NH_3 puro en turbinas son:

- Baja velocidad de transmisión de llama
- Baja inflamabilidad
- Reacción lenta, causando un bajo caudal de aire y en consecuencia causando baja turbulencia, lo que resulta en una mala relación de mezcla con aire
- Combustión incompleta del amoníaco generando fugas de NH_3
- Altas emisiones de NO_x

Por tanto, tal y como indican otros estudios, la solución para poder aplicar NH_3 en turbinas de gas es emplear mezclas de amoníaco con otros combustibles y mejorar los diseños de los quemadores.

Existen proyectos de diseños de turbinas de gas alimentadas con NH_3 , como por ejemplo el de *Mitsubishi Power*, que está desarrollando el primer sistema de turbina de gas de 40MW alimentado con amoníaco y se prevé que su comercialización comenzará en el año 2025 [19].



Figura 23. Proyecto de turbina de gas alimentada con NH_3 . Fuente: Mitsubishi Power

Sin embargo, las turbinas tienen una densidad de potencia inferior a la de los motores de combustión interna y, como ya se ha mencionado anteriormente y de acuerdo con estudios

previos, **existe un gran número de limitaciones para la producción de energía con turbinas tanto de vapor como de gas a partir de amoníaco, por ello no es el método.** Por otro lado, es importante destacar que los motores de combustión interna son más eficientes que las turbinas y, por tanto, son una mejor alternativa para trabajar con combustibles de amoníaco.

Motores de combustión interna

En el caso de los motores de combustión interna, el combustible se quema con un oxidante en la cámara de combustión del motor y la expansión de los gases a temperaturas y presiones elevadas provocan una fuerza que mueve los pistones transformando energía química en energía mecánica útil.

Se han estudiado varios métodos de obtención de energía a través de motores de combustión interna, empleando como combustible mezclas de amoníaco y con dos tipos de motores: encendido por chispa y encendido por compresión. Los motores de combustión interna, igual que las turbinas de vapor, son capaces de obtener energía a partir de amoníaco puro, pero **trabajan mejor cuando se emplean mezclas de amoníaco** ya que, debido a las propiedades termodinámicas que posee el NH_3 , se generan problemas en la combustión que se detallan más adelante en el proyecto.

Pilas de combustible

Las pilas de combustibles son dispositivos electroquímicos que transforman energía química proveniente de un combustible en electricidad, a través de una reacción electroquímica de combustible con oxígeno u otro comburente. Para que esta reacción tenga lugar, es necesaria una fuente continua de combustible y oxígeno. Están compuestas por un ánodo y un cátodo donde se producen las reacciones, un electrolito que separa los gases y unas placas bipolares. Existen diferentes tipos de pilas de combustible clasificadas en función del electrolito que utilizan, ya que esto determina el tipo de reacciones que tienen lugar en la pila, los catalizadores que requieren, el rango de temperaturas y el combustible requerido. En función de estas características se determinan las aplicaciones las pilas de combustible

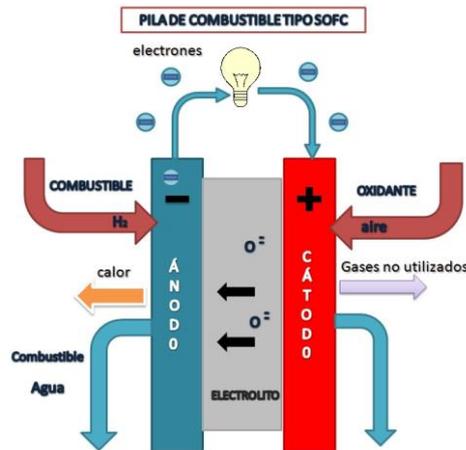


Figura 24. Funcionamiento pila SOFC. Fuente: wikipedia.org

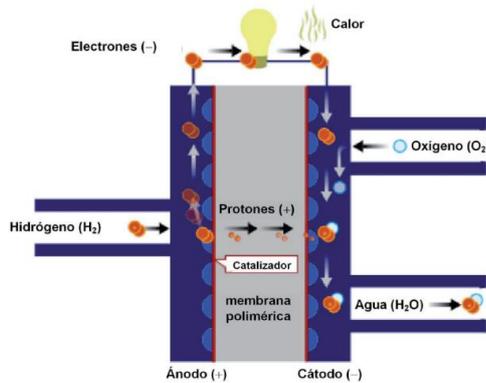


Figura 25. Funcionamiento pila PEM. Fuente: Hidrógeno. Pilas de combustible tipo PEM

De acuerdo con un estudio de aplicación de pilas marinas de combustible realizado por DNV-GL [20], las dos opciones más prometedoras son las **pilas de combustible con membrana de intercambio de protones (PEMFC o PEM)** (Figura 25) y las **pilas de combustible de óxido sólido (SOFC)** (Figura 24). Las SOFC son capaces de emplear amoníaco como combustible, mientras que las PEM solamente pueden emplear H_2 , por tanto, **para emplearlas es necesario el craqueo y la purificación del NH_3** , que consiste en una reacción endotérmica **que descompone la molécula de NH_3 en hidrógeno (H_2) y nitrógeno (N)**, para así poder emplear el H_2 en otras tecnologías que no son compatibles con el NH_3 . Este es el motivo por el que una de las aplicaciones del amoníaco es su uso como vector energético, aunque los métodos para realizarlo a bordo presentan todavía limitaciones y requieren optimizarse para reducir el consumo energético.

2.1.4. Aplicaciones del amoniaco en el transporte marítimo

A lo largo de los últimos años se han investigado las diferentes aplicaciones del amoniaco como fuente de alimentación para el transporte marítimo, llegando a la conclusión de que este compuesto **se puede implementar como combustible en motores de combustión interna**, en **pilas de combustible** o como **vector energético para transportar hidrógeno** que será empleado como combustible a posteriori.

Tabla 12. Aplicaciones tecnológicas del amoniaco. Fuente: Propia basada en *Transport and Environment 2018 y Comparison of Alternative Marine Fuels DNV-GL*

Tecnología	Componentes necesarios	Propulsión	Almacenamiento de energía	Transformación de energía
Amoniaco en motores de combustión interna	Motor, tanques de almacenamiento, sistemas de reducción de NO _x (EGR/SCR)	Motor de combustión interna	Amoniaco líquido	Combustión directa del amoniaco líquido en el motor de combustión interna
Pilas de combustible (PEM)	Pila de combustible, tanques de almacenamiento, reformador y batería	Motor eléctrico	Amoniaco líquido	Extracción del H ₂ a partir de NH ₃ mediante de reformadores a bordo y transformación electroquímica mediante pilas de combustible
Reto principal → Almacenamiento del combustible. Requiere más espacio que los combustibles tradicionales.				

En la tabla se puede observar que emplear el amoniaco en motores de combustión interna, permite la combustión directa del NH_3 , sin necesidad de someterlo al craqueo y purificación para obtener H_2 . Por otro lado, si se emplea en pilas de combustible tipo PEM, el NH_3 debe ser disgregado en gases de hidrógeno y nitrógeno.

Motor de combustión interna alimentado con amoniaco

Como se ha mencionado previamente, existen diferentes aplicaciones del amoniaco como fuente de alimentación al transporte marítimo, pero la opción más prometedora en el corto plazo son los motores de combustión interna [21], que es una tecnología que se lleva empleando muchos años en la industria del transporte marítimo y, realizando algunas modificaciones, podrían funcionar alimentados con mezclas de amoniaco.

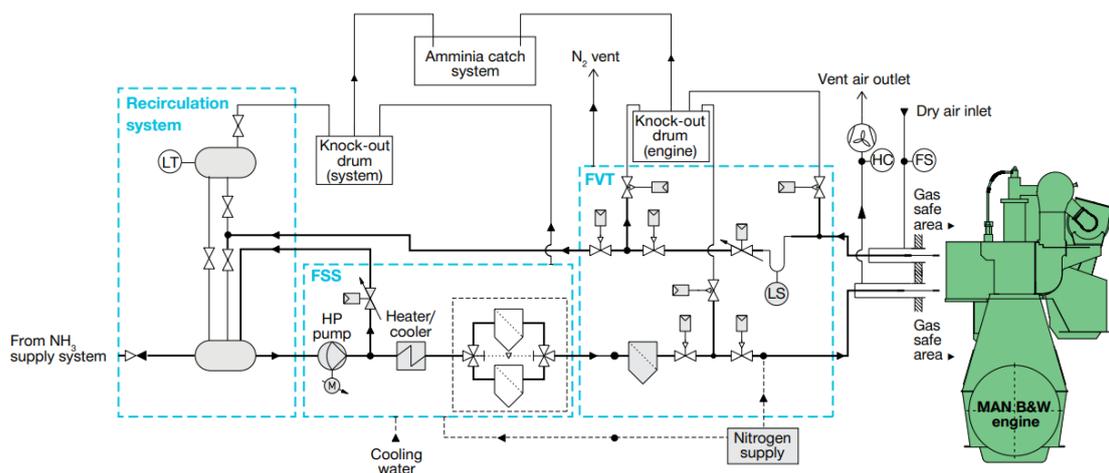


Figura 26. Esquema del suministro de NH_3 del motor MAN B&W. Fuente: *Man B&W: two-stroke engine operating on ammonia*

El principal inconveniente de utilizar este compuesto para alimentar un motor está relacionado con las propiedades termodinámicas del amoniaco, ya que tiene una elevada resistencia a la autoignición y unos márgenes de inflamabilidad muy estrechos (15-27%). Esto provoca que el NH_3 no sea capaz de encenderse por compresión y, en consecuencia, se tenga que **mezclar con otros combustibles que posean un índice de cetano elevado** (para así compensar ese bajo límite de inflamabilidad que posee el amoniaco) como el diésel marino, que posee un índice de cetano de 45.

Al emplear otros combustibles “no neutros” las emisiones de gases de efecto invernadero no desaparecen, sino que siguen existiendo en relación con la cantidad de combustible utilizado en la mezcla. Por otro lado, cabe destacar que **la combustión de las mezclas de amoníaco resulta en emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de materia particulada (hollín)**. Sin embargo, el efecto de la liberación de estas emisiones **se puede mitigar mediante procesos de postratamiento como la reducción catalítica selectiva (SCR)**, que permite que el NO_x forme otras sustancias menos nocivas a partir de un fluido catalizador, **en o un filtro de partículas diésel (DPF)**, que captura y quema las partículas de hollín.

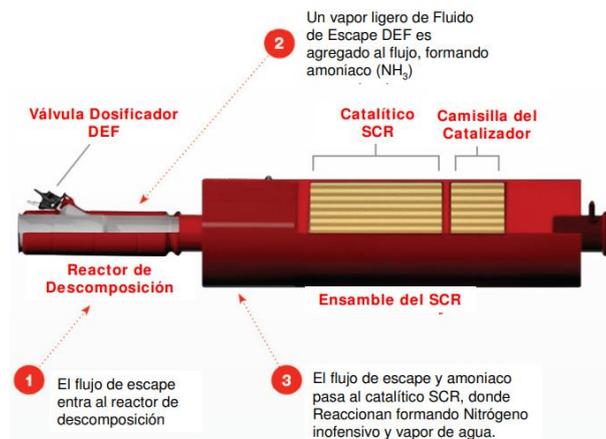


Figura 27. Esquema del funcionamiento de SCR. Fuente: Boletín. Fluido para sistemas de escape a diésel

En cuanto a los motores de encendido por chispa, los límites de inflamabilidad y la baja velocidad de llama que posee el amoníaco provocan la combustión incompleta del amoníaco y, para solucionar este inconveniente, el amoníaco se puede mezclar con hidrógeno o gasolina (esta última opción también daría lugar a emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente NO_x).

Actualmente, la posibilidad de trabajar con motores alimentados con amoníaco puro no es viable, debido a las propiedades termodinámicas que posee este compuesto, pero la posibilidad de emplearlo junto con otros combustibles es una buena alternativa para disminuir los niveles de emisiones contaminantes actuales. Asimismo, los sistemas postratamiento permiten mitigar las emisiones de NO_x y materia particulada.

Pilas de combustible

En primer lugar, es importante destacar que las pilas de combustible son más eficientes que un motor de combustión interna (excepto en el caso de cargas elevadas), la energía que generan es limpia sin emisiones contaminantes (NO_x) ni materia particulada, pero es una tecnología más cara y menos desarrollada.

Como ya se ha expuesto anteriormente, el NH_3 se encuentra en forma gaseosa cuando está a temperatura ambiente y presión atmosférica, pero se condensa dando lugar a amoníaco líquido si se somete a presiones por debajo de 10 bar y a 24°C , o bien a -33°C y a temperatura ambiente. La **ventaja de trabajar con NH_3 en estado líquido es que su densidad de energía por volumen es mayor que cuando se encuentra en estado gaseoso.**

Para emplear pilas tipo PEM, el amoníaco debe ser fragmentado a bordo mediante reformadores antes de que el H_2 liberado se suministre a las pilas de combustible. Sin embargo, tal y como se ha descrito anteriormente, los métodos para el craqueo del amoníaco a bordo presentan hoy en día algunas limitaciones y deben ser optimizados. La descomposición del NH_3 en gases de hidrógeno y nitrógeno supone un alto consumo energético e implica temperaturas muy elevadas de hasta 1000°C , lo cual dificulta que los materiales del reactor, incluyendo el catalizador, soporten la exposición a ese ambiente.

Dado que para emplear pilas de combustible con membrana de intercambio de protones es necesario el craqueo y purificación del amoníaco, la alternativa son las pilas de óxido sólido, ya que éstas sí son capaces de funcionar con amoníaco sin necesidad de disgregarlo en hidrógeno y nitrógeno. Las **ventajas de utilizar amoníaco en pilas SOFC son la alta eficiencia eléctrica que poseen (60%) y que no se produce NO_x , pero este tipo de pilas están menos desarrolladas que las PEM.** Adicionalmente, las **SOFC trabajan a temperaturas muy elevadas, generando problemas en el diseño de materiales, restricciones de estabilidad química, conductividad y compatibilidad electroquímica.**

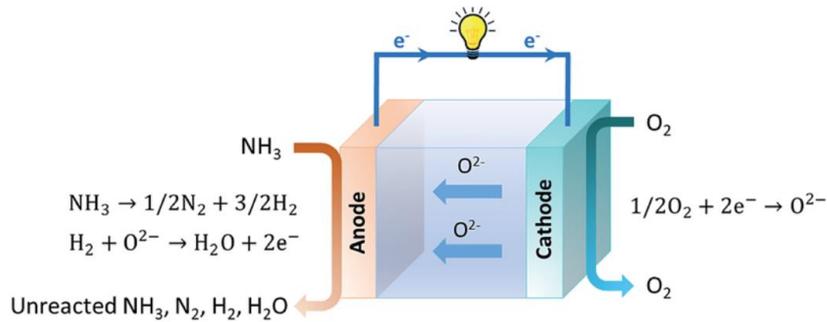


Figura 28. Pila SOFC alimentada con NH_3 . Fuente: researchgate.net

Vector energético: método de transporte de H_2

El hidrógeno es otro candidato para descarbonizar el transporte marítimo, y su implementación ya se lleva a cabo en algunos proyectos (ver Tabla 16). Sin embargo, tal y como se describe en el siguiente apartado, el H_2 presenta algunas desventajas de almacenamiento y transporte en comparación con el amoníaco. Por ello, la posibilidad de usar amoníaco como vector energético de transporte es una opción prometedora que permite fomentar el uso de ambos compuestos.

El NH_3 , como ya se ha mencionado con anterioridad, no contiene carbono en su molécula y, por tanto, su descomposición no genera emisiones contaminantes. Además, **gracias a que el amoníaco se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente y a presiones moderadas**, y a que **posee una densidad de energía por volumen (10,7 kg H_2 /100L) superior a la del hidrógeno**, su uso como molécula de almacén de H_2 es prometedora. Esta opción permite transportar y almacenar H_2 sin necesidad de emplear temperaturas criogénicas y también posibilita el transporte de mayores cantidades de hidrógeno, dado que **1 litro de NH_3 contiene aproximadamente un 50% más de H_2 que 1 litro de hidrógeno**. Además, el coste de transportar amoníaco es inferior al del hidrógeno.

2.1.5. Seguridad y riesgos

Las principales preocupaciones del uso de amoníaco están relacionadas con la seguridad y la toxicidad de este compuesto. Como ya se ha mencionado, el NH_3 es un gas tóxico y corrosivo difícilmente inflamable y posee un fuerte olor que es muy característico (umbral de olor del amoníaco es entre 5 y 50 partes por millón (ppm)). A pesar de su toxicidad, la exposición repetida al amoníaco no produce efectos crónicos en el cuerpo humano, aunque, incluso en pequeñas

concentraciones, puede causar irritación en los ojos, la garganta y las vías respiratorias. No obstante, su olor es muy intenso y permite percibir su presencia.

Por otro lado, en lo referente a normativa, para poder implementar el amoníaco a bordo se deben llevar a cabo modificaciones en el **Código internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel**, también conocido como código CIG. Este código establece una norma internacional para el buque, la tripulación y el medio ambiente y se aplica a todos los buques que se dediquen al transporte a granel de gases licuados con una presión absoluta superior a 0,28 MPa, a una temperatura de 37,8°C y otros productos entre los que se encuentra el amoníaco. Actualmente, este código prohíbe el uso de cargas identificadas como productos tóxicos como combustible para el buque, por tanto, **para poder emplear el NH₃ como combustible, el código CIG debería ser modificado.**

Otro código que debería ser parcialmente modificado es el **Código internacional de seguridad para los buques que utilicen gases u otros combustibles de bajo punto de inflamación**, también conocido como Código IGF. Este código establece una norma internacional para los buques que consumen combustibles con puntos de inflamación bajos, excepto aquellos regidos por el código CIG. El objetivo del código IGF es la reducción de riesgos para buque, tripulación y medioambiente mediante regulaciones en la disposición, instalación, control y vigilancia de maquinaria, equipo y sistemas que consumen combustibles de bajo punto de inflamación.

2.2. Hidrógeno

El hidrógeno (H₂) es otro de los candidatos en el futuro del transporte marítimo, ya que es una **fuerza inagotable de energía y su combustión únicamente produce vapor de agua**. Sin embargo, debido a que el hidrógeno no se encuentra en estado libre en la Tierra y que su producción tiene altos costos y no es neutra, es decir, se liberan emisiones contaminantes como subproductos, el hidrógeno tiene algunas barreras que deben superarse para poder aprovechar su potencial al máximo.

2.2.1. Propiedades y generalidades

El hidrógeno es el elemento químico más abundante del planeta y constituye aproximadamente un 75% de la materia del universo [22], aunque se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno (H₂O) o el carbono (compuestos orgánicos). Dado que no se encuentra de forma

aislada no puede obtenerse directamente de la naturaleza, sino que se debe “producir”. Actualmente el 95% de la obtención del hidrógeno proviene de energía de combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo o la biomasa derivada de la madera [23].

El H₂ se emplea en la síntesis del amoníaco, en operaciones de refinación de petróleo como el hidrocrackeo⁶, y en el tratamiento con hidrógeno para eliminar azufre. También se emplean grandes cantidades de este compuesto en **la hidrogenación catalítica** de aceites vegetales líquidos insaturados para la obtención de grasas sólidas y en la manufactura de productos químicos orgánicos. **El hidrógeno se utiliza como combustible en cohetes, combinado con flúor u oxígeno, y como propulsor de cohetes impulsados por energía nuclear.**

Tabla 13. Propiedades del hidrógeno. Fuente: relaq.mx

Propiedad	Valor
Densidad de energía por volumen [MJ/L]	8,5
Punto de ebullición [°C]	-252,7
Límites de inflamabilidad en el aire [%]	4 – 75
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	120
Punto de fusión [°C]	-259,2
Densidad	0,089 g/cm ³ (gas)
	0,0708 kg/l (líquido)
Temperatura crítica [°C]	-239,9
Temperatura de autoignición [°C]	580
Presión crítica [atm]	12,8

El **poder calorífico del hidrógeno es elevado** comparado con otros combustibles (ver Tabla 11), **lo cual permite la transferencia de una cantidad de calor mayor por unidad de tiempo.** Una

⁶ proceso de craqueo catalítico en el cual, mediante la adición de hidrógeno, las moléculas de hidrocarburos de cadena larga se rompen en moléculas más cortas.

limitación significativa del hidrógeno es que **su densidad de energía por volumen (8,5 MJ/L) es baja comparada con la de los combustibles fósiles, y es también inferior a la del amoníaco**, por tanto, para transportarlo y almacenarlo se requerirían tanques y buques de mayores dimensiones. Se han estudiado tanto tecnologías físicas como basadas en materiales para el almacenamiento del hidrógeno, pero los procesos físicos como la **licuación y compresión del H₂ consumen mucha energía**.

La licuación del hidrógeno es el proceso de pasarlo de forma gaseosa a líquida mediante la modificación de su temperatura y presión. Este proceso es posible gracias a una combinación de compresores, intercambiadores de calor y válvulas de expansión que permiten alcanzar el enfriamiento necesario. El principal problema de **este proceso** es que **provoca una pérdida de alrededor de un 40% del contenido energético del H₂**. Adicionalmente, **se necesitan recipientes bajo presión de 70 MPa y tanques bien aislados para almacenar el hidrógeno comprimido**, y durante **este proceso de compresión se pierde alrededor de un 12% del contenido energético del H₂**.

Por otro lado, el almacenamiento basado en materiales como las zeolitas o los hidruros metálicos (el hidrógeno está almacenado en estado gaseoso) proporciona una capacidad de almacenamiento del H₂ de hasta el 13% en peso, pero todavía está en una fase muy temprana de desarrollo. **Se obtienen mayores densidades energéticas con el almacenamiento de H₂ en forma de otros compuestos como el metanol (12,5% p/p) o el amoníaco (17,65% p/p)**.

Ya se ha observado que la combustión del hidrógeno no produce gases contaminantes, pero su producción no es neutra y ésta es una característica que el hidrógeno tiene en común con el amoníaco ya que, dependiendo de qué fuentes se empleen para producirlo, se clasifica de una manera u otra. Aparte de las fuentes para obtener el hidrógeno, existen diferentes métodos industriales para su producción, que son la transformación molecular, la gasificación del carbón y la electrólisis del agua. Así, se distinguen **varios tipos de hidrógeno en función de los métodos y de las fuentes que se utilicen para producirlo a niveles industriales**.

En primer lugar, se encuentra el **hidrógeno gris**, que se obtiene a partir de la reformación del metano por vapor a partir del gas natural. La producción de este tipo de H₂ emplea los combustibles fósiles como fuente de energía. Es el sistema más económico y empleado

actualmente, pero también es el menos limpio debido a la utilización de combustibles fósiles y a que la reformación del metano emite CO₂.

Por otro lado, se encuentra el **hidrógeno azul** que se obtiene a partir del mismo método que el hidrógeno gris, pero capturando el CO₂ que se libera durante el proceso con un sistema de captura y almacenamiento de carbono (CCUS), resultando en una alternativa más limpia pero todavía dependiente de los combustibles fósiles.

Por último, se encuentra el **hidrógeno verde**, que se obtiene a partir de la electrólisis del agua, generando durante este proceso únicamente hidrógeno y oxígeno, que se libera a la atmósfera sin suponer un impacto negativo en el medioambiente. Para alimentar este proceso de electrólisis se emplean fuentes de energía renovable como la solar o la eólica y, por tanto, es la opción más limpia para producirlo, pero también la más cara.

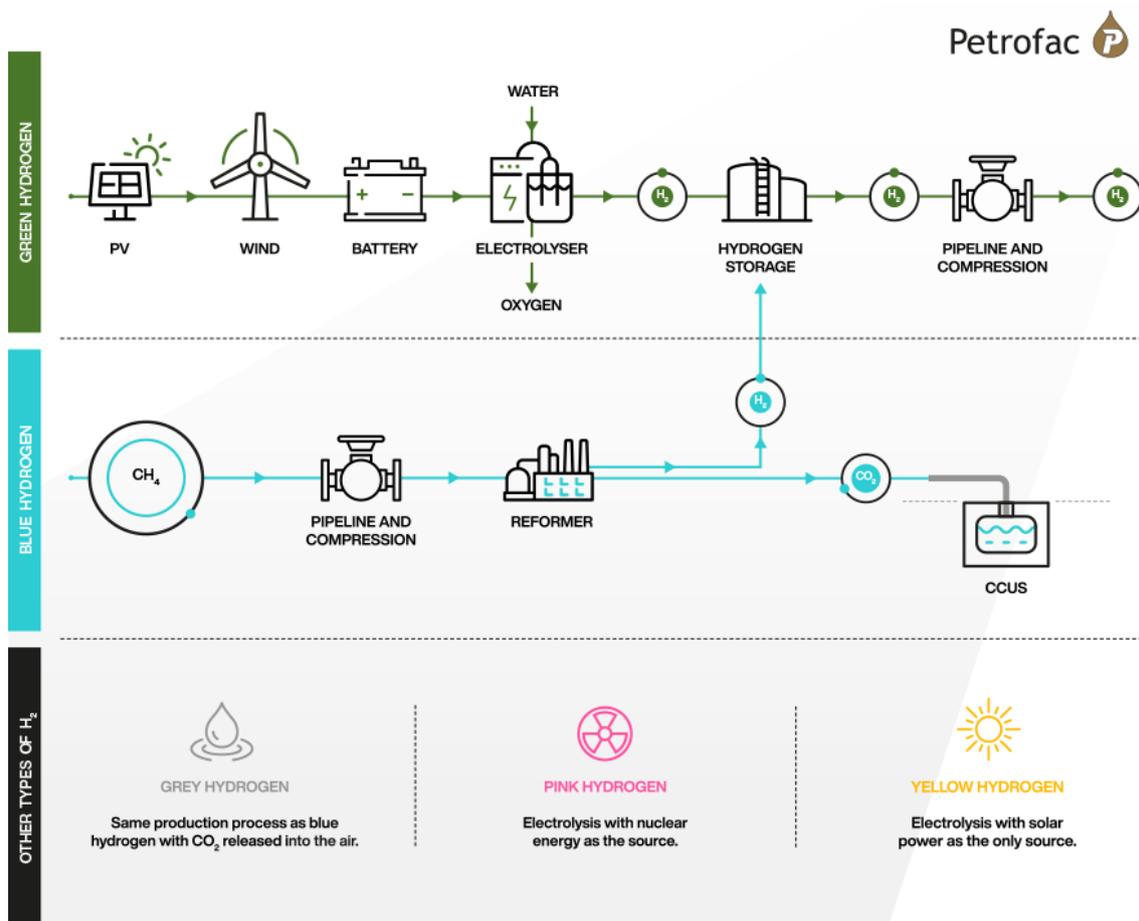


Figura 29. Métodos y fuentes de producción de hidrógeno. Fuente: petrofac.com

El problema del H₂ es que su potencial está limitado por la dificultad de almacenarlo y transportarlo en grandes cantidades de una manera económica y segura sin alcanzar presiones muy elevadas que resulten comprometidas. Además, las partículas de H₂ tienen un tamaño muy reducido y esto genera problemas de difusión y fugas en los sistemas de almacenamiento y transporte.

2.2.2. Aplicaciones del hidrógeno en el transporte marítimo

Como se ha expuesto al inicio de este apartado, para poder emplear el hidrógeno como combustible en el transporte marítimo se deben mejorar algunos aspectos que lo rodean. Para aprovechar plenamente el potencial del H₂, la industria y los gobiernos deben centrarse en cuatro áreas clave para escalar la economía del hidrógeno [24], que son seguridad, infraestructura adaptada para trabajarlo y transportarlo, producción de descarbonización potenciando el amoníaco azul y verde y, en último lugar, políticas y estrategias por parte de las empresas.

Tabla 14. Aplicaciones tecnológicas del hidrógeno. Fuente: Propia basada en *Transport and Environment 2018 y Comparison of Alternative Marine Fuels DNV-GL*

Tecnología	Componentes necesarios	Propulsión	Almacenamiento de energía	Transformación de energía
Hidrógeno en motores de combustión interna	Motor y tanques de almacenamiento	Motor de combustión interna	Hidrógeno líquido	Combustión directa del hidrógeno líquido en el motor de combustión interna
Pilas de combustible de hidrógeno	Pila de combustible, tanques de almacenamiento, reformador y baterías	Motor eléctrico	Hidrógeno líquido	Electroquímica mediante pilas de combustible
Reto principal → Almacenamiento del combustible. Requiere más espacio que los combustibles tradicionales y se necesitan materiales que soporten las temperaturas criogénicas de almacenamiento.				

Pilas de combustible

Las pilas de hidrógeno convierten la energía almacenada en el combustible, en este caso H₂ líquido, directamente en electricidad mediante procesos electroquímicos que tienen lugar en la pila de combustible, que a su vez alimentan un motor eléctrico. La ventaja de emplear esta tecnología es que los subproductos de las reacciones que tienen lugar en la pila son electricidad y agua y no generan ningún tipo de sustancia contaminante. Sin embargo, un gran inconveniente de este método de propulsión es la **escasa vida útil de las pilas de combustible alimentadas con H₂, lo cual restringe la autonomía de cualquier buque impulsado con esta tecnología.**



Figura 30. Esquema buque portacontenedores alimentado con pilas de H₂. Fuente: Riviera Maritime Media

Como ya se ha expuesto anteriormente, un estudio de DNV-GL y de la Agencia Europea de Seguridad Marítima (EMSA) determinó que las pilas más prometedoras para el transporte marítimo son las pilas de combustible con membrana de intercambio de protones (PEMFC o PEM) y las pilas de combustible de óxido sólido. **En el caso del H₂, la opción más prometedora es la pila PEM, ya que únicamente emplea hidrógeno como combustible,** aunque la pila de combustible de membrana de intercambio de protones de alta temperatura (HT-PMFC) y la SOFC también son opciones viables.

Tabla 15. Comparación SOFC, PEMFC Y HT-PEMFC. Fuente: EMSA DNV-GL

	SOFC	PEMFC	(HT-PEMFC)
Coste relativo	Alto	Bajo	Moderado
Potencia [kW]	20 – 60 kW	Hasta 120 kW	Hasta 30 kW
Vida útil	Moderada	Moderada	Desconocida
Combustible	GNL, metanol, diésel, amoníaco e hidrógeno	Hidrógeno	GNL, metanol, diésel e hidrógeno
Emisiones	CO ₂ y bajos niveles de NO _x si se emplea un combustible con carbono	No	CO ₂ y bajos niveles de NO _x si se emplea un combustible con carbono
Eficiencia	60% (eléctrica)	50 – 60% (eléctrica)	50 – 60 % (eléctrica)
“Experiencia” en el sector	Moderada	Alta	Baja

Teniendo en cuenta los aspectos enumerados en la tabla, la pila de combustible con membrana de intercambio de protones es la más viable para trabajar con hidrógeno. Este tipo de pilas tienen una **membrana polimérica**, que consiste en un conductor protónico, **que separa el ánodo y el cátodo de la celda y permite el paso de los iones H⁺ a través de él, siendo impermeable al resto de sustancias.**

El hidrógeno es introducido por el lado del ánodo y el oxígeno por el cátodo. En el ánodo tiene lugar la reacción de oxidación del H₂, separándolo en electrones (e⁻) y protones (H⁺). Mientras que los H⁺ son capaces de atravesar la membrana PEM y llegar al cátodo, los e⁻ no pueden atravesarla y, por tanto, circulan por un circuito externo que crea un flujo de electricidad. En el cátodo ocurre la reducción del O₂, donde reacciona con los protones que vienen del ánodo formando vapor de agua (H₂O).

Reacción del ánodo (oxidación del H₂)



Reacción del cátodo (reducción del O₂)



Reacción global

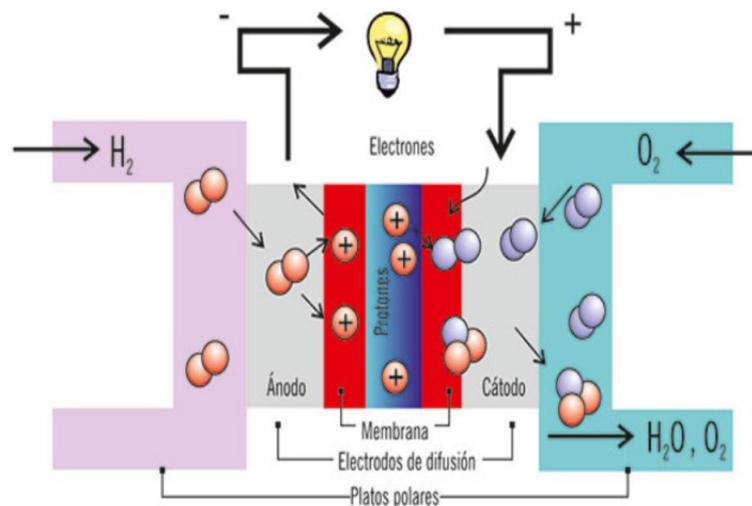


Figura 31. Funcionamiento pila PEM con H₂. Fuente: hidrogeno18wixsite.com

Motores de combustión interna alimentados con hidrógeno

Otra de las aplicaciones del hidrógeno son los motores de combustión interna. Cabe destacar que **el uso del H₂ en motores de combustión interna está menos desarrollado que su uso en pilas de combustible**. Sin embargo, **los motores de combustión interna permiten un mejor rendimiento con cargas elevadas que las pilas de combustible**. Actualmente existen dos opciones para operar motores de combustión interna con hidrógeno.

La primera opción es un **motor de combustión dual que opere con hidrógeno y diésel**. En este caso, el hidrógeno se inyecta en la fase de admisión y es mezclado con el diésel durante la compresión, creando una mezcla uniforme y homogénea. Posteriormente, se introduce una inyección piloto de diésel en la cámara de combustión antes de llegar al punto muerto superior. Debido a las elevadas presiones y temperaturas, se produce la autoinflamación y la combustión del diésel con el hidrógeno, provocando que el pistón baje y dando lugar a la fase de expansión.

Por último, tiene lugar la fase de escape, el cilindro se vacía y elimina los gases de escape, que tienen un bajo contenido en NO_x y CO_2 .

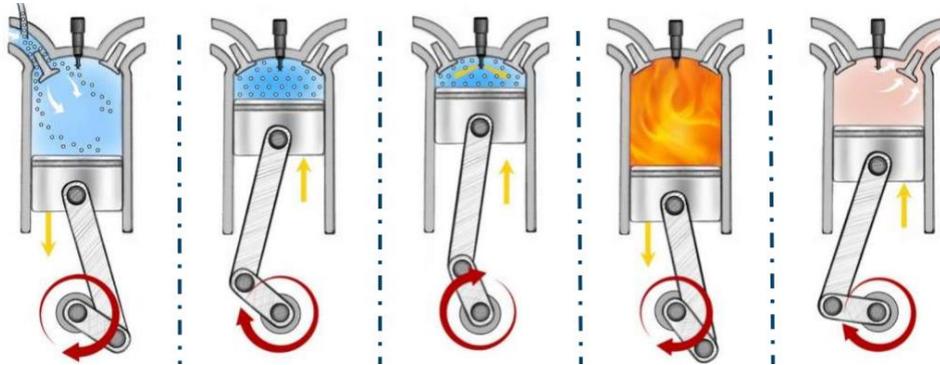


Figura 32. Motor combustión dual hidrógeno y diésel. Fuente: *Hydrogen co-combustion in ICE*

Por otro lado, existe la opción del **motor de encendido por chispa, que únicamente emplea hidrógeno para combustionar**. En este caso las emisiones son prácticamente inexistentes y la eficiencia del motor es alta, a pesar de que el factor λ del hidrógeno es elevado. Esto se debe a que **el H_2 tiene una gran volatilidad y una combustión más rápida que los hidrocarburos**, por tanto, el motor puede arrancar con mezclas pobres en combustible que tengan un factor de λ superior a 2 ($\lambda > 2$) [25].

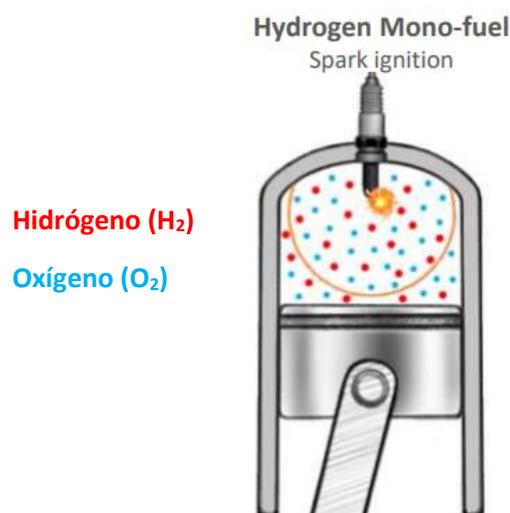


Figura 33. Motor de encendido por chispa con H_2 . Fuente: *Hydrogen co-combustion in ICE*

Con una amplia gama de inflamabilidad, los motores de hidrógeno pueden funcionar con proporciones de aire a combustible que van de 34:1 a 180:1 [26]. Los motores de hidrógeno, tanto monocombustibles como duales, pueden operar en un ciclo de combustión de mezcla pobre

y reducir las emisiones de NO_x. Sin embargo, **dependiendo de las relaciones aire/combustible que se usen, es posible que se requieran tecnologías de reducción de NO_x, como tecnologías de reducción catalítica selectiva o válvulas EGR (recirculación de gases de escape).**

Actualmente existen embarcaciones que son propulsadas con diferentes tecnologías que implementan el hidrógeno como fuente de alimentación, pero son embarcaciones que realizan travesías cortas y ninguna de ellas es un buque mercante sometido a cargas elevadas. A continuación, se enumeran algunas de estas embarcaciones junto con el sistema de propulsión que emplean.

Tabla 16. Embarcaciones propulsadas con hidrógeno. Fuente: propia

Buque	Sistema de propulsión	Imágenes
Catamarán <i>Hydroville</i>	Motor diésel modificado alimentado con hidrógeno. Cuenta con 12 tanques de hidrógeno y 2 tanques de diésel.	
<i>Nemo H₂</i>	Electricidad generada por dos pilas de combustible PEM de 30 kW cada una y una batería de 70 kWh.	
Catamarán <i>Energy Observer</i>	Pilas de combustible de 2 MW alimentadas por un motor eléctrico de 4 MW.	
<i>New York Hornblower Hybrid</i>	Pilas de combustible de 32 kW, paneles solares de 20 kW y 2 aerogeneradores de 5 kW.	

2.3. Metanol

El metanol o alcohol metílico (CH_3OH) es otra de las opciones que permite descarbonizar el transporte marítimo gracias a las bajas emisiones que genera.

2.3.1. Propiedades y generalidades

Actualmente el metanol cuenta con una gran disponibilidad y variedad de aplicaciones, por lo que ya existen métodos para almacenarlo y transportarlo. Generalmente se produce a escala comercial a partir de gas natural, aunque también se puede producir a partir de fuentes renovables como biomasa o electrólisis⁷.

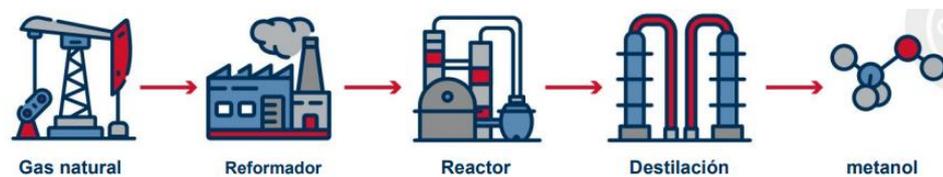


Figura 34. Producción de metanol a partir de gas natural. Fuente: *ABS Sustainability Whitepaper*

Al contrario que los combustibles convencionales, **el metanol tiene un impacto menor si se derrama o se filtra al medio ambiente, además, se disuelve fácilmente en agua, y únicamente tiene impactos negativos en el medio marino en concentraciones muy altas.** El metanol en el océano es común, producido naturalmente por el fitoplancton, y es fácilmente consumido por microbios bacterianos.

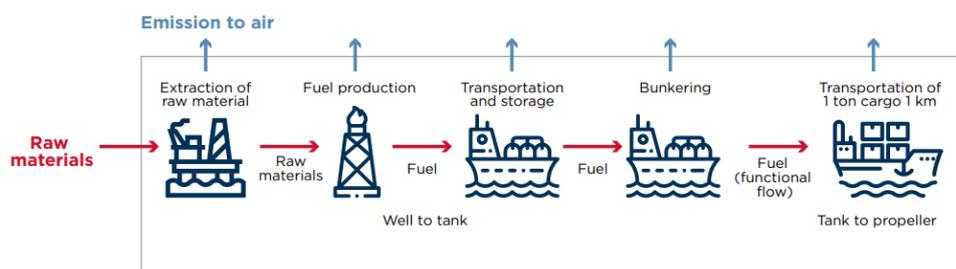


Figura 35. Ciclo de vida del metanol. Fuente: *ABS Sustainability Whitepaper: Methanol as marine fuel*

⁷ Alimentada con energía renovable y respaldada con tecnología de utilización de captura de carbono.

Como ya se ha descrito, el metanol se obtiene a partir de la síntesis del gas natural, gracias a la combinación de óxidos de carbono e hidrógeno y, tras ser sintetizado bajo presión en un proceso catalítico, el metanol crudo se purifica mediante la destilación. Sin embargo, también se puede producir a partir de la fermentación de material orgánico, principalmente materia vegetal con un elevado contenido en celulosa, es decir, a partir de **fuentes renovables, en cuyo caso recibe el nombre de biometanol.**

A diferencia del hidrógeno y el amoníaco, la molécula de metanol sí contiene carbono, por ello, al combustionar produce emisiones CO₂, aunque a niveles inferiores que otros compuestos como el GNL o el diésel. **Mediante el uso de metanol las emisiones de SO_x se reducen hasta un 99%, las de NO_x un 60%, las de partículas un 95% y las de CO₂ un 25% en comparación con los combustibles tradicionales [27].**

Tabla 17. Comparación del contenido en carbono del metanol. Fuente: *Methanol as a marine fuel report*

	Metanol	Metano	GNL	Diésel
Contenido en carbono (%p/p)	37,49	74,84	≈75	86,88

Tabla 18. Propiedades del metanol. Fuente: *ABS Sustainability Whitepaper: methanol as marine fuel*

Propiedad	Valor
Densidad de energía por volumen [MJ/L]	15,5
Calor de vaporización [kJ/kg]	1098
Temperatura de autoignición [°C]	450
Densidad líquida [kg/m ³]	798
Temperatura adiabática de llama a 1 bar [°C]	1980
Peso molecular [g/mol]	32,04
Punto de fusión [°C]	-97,8
Punto de ebullición a 1 bar [°C]	65
Temperatura crítica [°C]	239,4
Presión crítica [bar]	80,48
Límites de inflamabilidad en aire [%]	6 – 36,5
Índice de cetano	< 5
Índice de octano	109
Punto de inflamación [°C]	12
Volumen equivalente de HFO	2,54

Como se puede observar en la tabla, la **densidad de energía por volumen del metanol es de 15,5 MJ/L, es menor que la de los combustibles convencionales (MGO o HFO), pero mayor que la del amoníaco o el hidrógeno**. Los límites de inflamabilidad del metanol tienen un rango muy amplio, que puede generar un ambiente explosivo o inflamable. También cuenta con el inconveniente que posee un índice de cetano muy bajo que, en caso de emplearlo en motores de combustión interna, puede dar lugar a una mala combustión y provocar irregularidades en el funcionamiento del motor.

Es un compuesto tóxico que puede tener consecuencias negativas en la salud si se inhala y, dado que en estado gaseoso es más pesado que el aire, el riesgo de inhalación es aún mayor. A altas concentraciones de vapor, el metanol también puede causar asfixia.

En cuanto a su aplicación en el transporte marítimo, **se debe tener en cuenta la corrosividad del metanol con ciertos materiales, ya que puede afectar a los revestimientos de tanques, tuberías y accesorios de tuberías dentro del sistema de manejo de combustible.**

2.3.2. Aplicaciones del metanol en el transporte marítimo

Como ya se ha expuesto, el metanol es un producto ampliamente transportado y utilizado en una variedad de aplicaciones (sobre todo en la industria química), esto quiere decir que ya existen cadenas de distribución y que están bien posicionadas para suministrar de manera fiable metanol como combustible marino en muchos puertos del mundo.

Tabla 19. Propiedades y opciones de tecnologías para la aplicación del metanol. Fuente: *Comparison of Alternative Marine Fuels DNV-GL*

Aplicaciones del metanol			
Tecnología	Pilas de combustible	Motor de combustión interna 2 tiempos (combustión dual a alta presión)	Motor de combustión interna 4 tiempos
Componentes	Pila de combustible, tanques de almacenamiento, motor eléctrico, reformador y batería	Motor, tanques de almacenamiento, sistema de procesamiento, sistema de reducción de NO _x (EGR/SCR)	Motor, tanques de almacenamiento, sistema de procesamiento
Reto clave → Los tanques de almacenamiento deben ser de 2 a 3 veces más grandes que los que se emplean para almacenar combustibles tradicionales			

Dado que el metanol es un líquido a temperatura ambiente, **su almacenamiento y su contención son más fáciles que las de otros combustibles como el GNL y permite seguir utilizando el almacenamiento y abastecimiento de combustible convencional con pocas modificaciones.** Sin embargo, para implementarlo como combustible marino, es necesario tener en cuenta algunas consideraciones de seguridad que surgen debido a su bajo punto de inflamación.

El uso del metanol como combustible marino ya ha sido estudiado e implementado en algunos motores, diseñados y creados por las empresas *Wärtsilä* y *MAN Energy Solutions*, y también existe un buque alimentado con pilas de combustible de metanol.

Los motores diésel marinos (*Wärtsilä 32*) de *Wärtsilä* que funcionan con metanol impulsan el ferri *Stena Germanica* de *Stena Line* desde 2015. Son **motores de combustión dual que funcionan con metanol y diésel.** Para poder trabajar con este combustible se tuvieron que realizar algunos cambios en el buque mencionado, como la **conversión de algunos tanques de lastre para almacenar metanol, la adición de una sala de bombas de combustible de alta presión (600 bar) o la instalación de un sistema de tuberías de combustible de doble pared junto con sus respectivos sistemas de seguridad.** Por otro lado, en cuanto al motor, **se cambiaron las culatas y se añadieron inyectoros combinados de *fueloil* y metanol.**

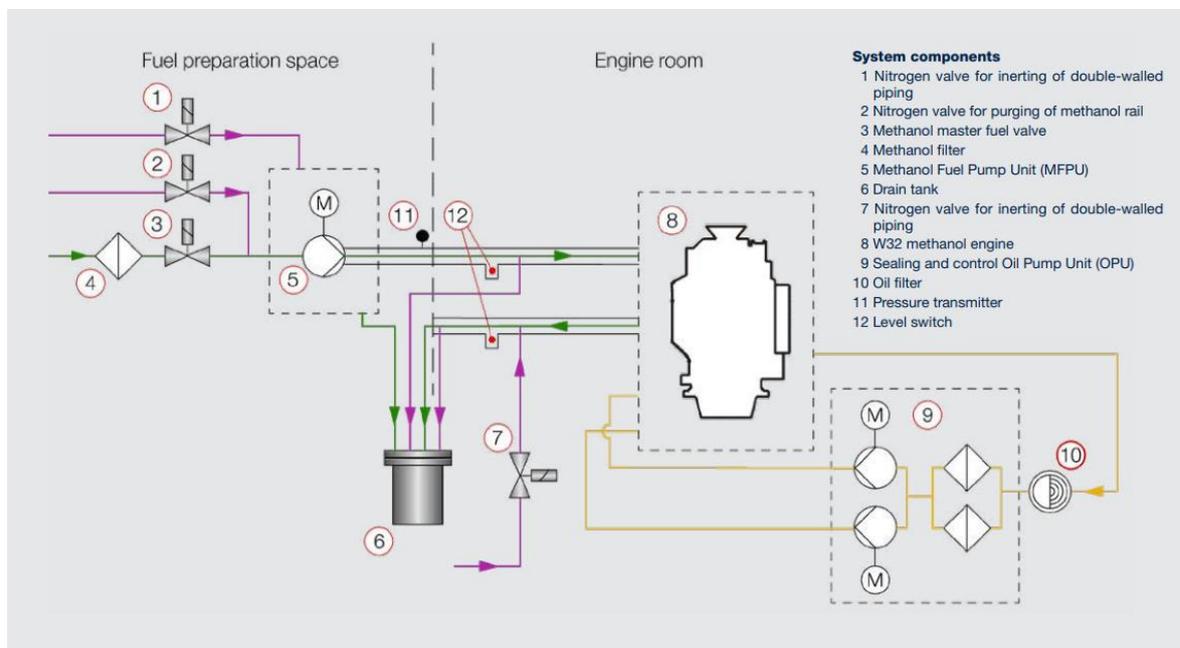


Figura 36. Configuración sistema motor Wärtsilä 32 alimentado con metanol. Fuente: Wärtsilä

El funcionamiento de este motor indicó una mejora en la eficiencia en comparación con el diésel, las emisiones de SO_x y de materia particulada fueron las esperadas y las emisiones de NO_x se redujeron en un 40-50%. Sin embargo, las reducciones de NO_x no cumplen con los límites del nivel III de la IMO (*IMO Tier III*), por tanto, se requiere un tratamiento posterior de los gases de escape.

Por otro lado, **MAN Energy Solutions basó el motor en el concepto de motor ME con sistema de inyección de gas, pero en lugar de inyectar gas, se inyectan combustibles líquidos a alta presión.** Este tipo de motor permite quemar combustibles convencionales, así como aquellos con un bajo punto de inflamación, como el metanol.

A pesar de que la implementación del metanol en pilas de combustible no es una opción tan prometedora como los motores de combustión interna, existe un buque que navega gracias a la tecnología de las pilas de metanol (DMFC). El buque *MS Innogy* navega desde 2017 por el lago Baldeneysee localizado en Essen, Alemania. Junto con la empresa *SerEnergy*, la compañía *Innogy* llevó a cabo la conversión del buque para que pudiese ser propulsado con pilas de metanol.



Figura 37. Pilas de metanol del buque *MS Innogy*. Fuente: sectormaritimo.es

2.4. Biocombustibles

Los biocombustibles son otra de las alternativas para descarbonizar el transporte marítimo, dado que tienen la capacidad para reducir emisiones contaminantes. Son **combustibles renovables obtenidos a través de recursos naturales y/o residuos orgánicos de origen animal o vegetal**

(biomasa). Los biocombustibles se clasifican en función del tipo de materia orgánica de la que provienen.

- Los **biocombustibles de primera generación son los que se producen a partir de aceites o azúcares comestibles y que provienen de plantas** como caña de azúcar o maíz, y su obtención depende de la planta de origen. Si se extraen de plantas con alto contenido en azúcares, son fermentados y transformados en alcoholes mientras que, si las plantas tienen alto contenido en grasas o aceites, se extraen a través de la transesterificación (combina estos aceites con un alcohol para generar ésteres grasos como el **biodiesel**).
- Los **biocombustibles de segunda generación se obtienen a partir de materias primas no aprovechables para la alimentación humana, como residuos forestales y agrícolas** (alto contenido en celulosa y lignina). Las principales vías de obtención de estos biocombustibles son la bioquímica, que emplea microorganismos para reducir a azúcares simples las cadenas químicas de las moléculas de celulosa y después transforma los azúcares en biocombustibles, y la termoquímica, que emplea temperaturas y presiones para pasar de la biomasa a combustibles.
- Los **biocombustibles de tercera generación provienen de organismos capaces de producir su propio alimento a partir de energía solar o CO₂**, como el caso de las algas, que tras cultivarlas se secan y se extrae el aceite de sus células para posteriormente transformarlo en biocombustible por alguno de los métodos ya mencionados anteriormente.
- Los **biocombustibles de cuarta generación se producen a partir de organismos genéticamente modificados capaces de captar mayores cantidades de CO₂ del ambiente**, por tanto, no solo provienen de una fuente alternativa de energía, sino que también son generados por procedimientos que disminuyen el contenido atmosférico de GEI.

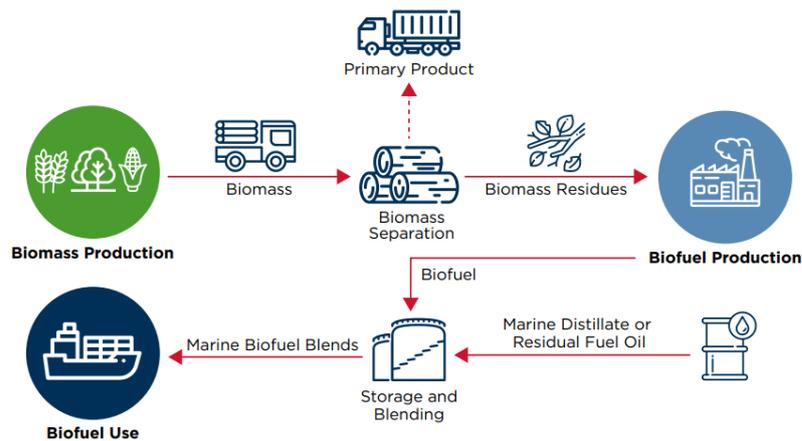


Figura 38. Ciclo de vida de los biocombustibles. Fuente: *ABS Sustainability Whitepaper: Biofuels as marine fuel*

En el transporte marítimo se emplean principalmente tres tipos de biocombustibles, que son el **biodiésel o éster metílico de ácido graso**, el **biodiésel renovable o aceite vegetal hidrotratado** y el **biometano o bio GNL**. Sin embargo, a pesar de que ayuden a reducir las emisiones de gases contaminantes y de que sean fuentes de energía eficientes y rentables, los biocombustibles no tienen un papel muy relevante en la descarbonización del transporte marítimo. Esto se debe principalmente a desafíos medioambientales y económicos.

Tabla 20. Propiedades y opciones de tecnologías para la aplicación de biocombustibles. Fuente: *Comparison of Alternative Marine Fuels DNV-GL*

Aplicaciones de los biocombustibles	
Tecnología	Motor de combustión interna
Componentes	Motor, tanques de almacenamiento, sistema de procesamiento, sistema de reducción de NO _x (EGR/SCR)
Retos clave → Disponibilidad actual limitada y alto coste económico	

Los desafíos medioambientales que presentan los biocombustibles, igual que las otras opciones de combustibles alternativos expuestos en este proyecto, están relacionados con su producción, ya que, aunque las emisiones sean escasas, siguen estando presentes a la hora de producir estos combustibles. Por otro lado, existen las barreras económicas, ya que **los biocombustibles tienen un alto coste en relación con los combustibles fósiles y el suministro de materias primas y la capacidad de producción de los biocombustibles están limitados**. Esto provoca que la demanda de biocombustibles por parte de diferentes sectores se vea frenada.

2.4.1. Éster metílico de ácido graso (FAME) o biodiésel

También conocido como biodiésel, se obtiene mediante aceites vegetales y residuos como grasa animal. La transformación de aceite vegetal a biodiésel ocurre gracias a la transesterificación con metanol o etanol. El FAME es una **buena opción para alimentar motores diésel**, ya que su punto de ebullición y su viscosidad permiten un buen rendimiento del motor. Además, **el punto de inflamación del biodiésel (>130°C) y su índice de cetano son más elevados que los del diésel convencional**, lo cual también mejora el rendimiento del motor. Sin embargo, **el punto de enturbiamiento del biodiésel es elevado y puede provocar la obstrucción de los filtros y un mal flujo del combustible**.

2.4.2. Aceite Vegetal Hidrotratado (HVO) o biodiésel renovable

El HVO o biodiésel renovable proviene de aceites vegetales y grasas animales que han sido sometidos a un proceso de hidrotratamiento. **Este proceso da lugar a un combustible que puede emplearse en motores que actualmente operan con HFO y MGO, así como en sus infraestructuras, lo cual es una gran ventaja**.

También es importante destacar que la producción de HVO ya se encuentra a escala comercial [28], que reduce notablemente las emisiones de GEI y que tiene un bajo contenido en azufre. El biodiésel renovable se puede mezclar con combustibles convencionales o emplearse puro sin ocasionar daños en el motor. **La ventaja de este biocombustible frente al FAME, es que el proceso de hidrogenación utilizado para producir HVO elimina el oxígeno presente en los**

aceites vegetales, permitiendo un mayor rendimiento del combustible y una vida útil más larga, ya que la posibilidad de que el combustible se oxide es mucho menor. Asimismo, la materia prima que se utiliza para producir HVO no necesita tener una calidad tan alta como la del FAME, y su índice de cetano y densidad de energía son mayores.

2.4.3. Biometano o biogás natural licuado (bio GNL)

El biometano también es conocido como **biogás natural licuado** (bio GNL) y es el equivalente al GNL, pero proveniente de residuos orgánicos que son transformados mediante procesos biológicos. El biogás es una mezcla de gases compuesta por metano (CH_4) y dióxido de carbono principalmente y se genera mediante la digestión anaerobia. **En la composición de este biogás se encuentra el biometano** (50 – 65% del volumen del biogás), por tanto, si se elimina el CO_2 , así como los componentes no deseados, se obtiene el biometano. El proceso que permite la eliminación del CO_2 se conoce como “*upgrading*”. En general, **el biometano debe purificarse hasta alcanzar un contenido en metano superior al 95%**.



Figura 39. Producción del biometano. Fuente: ingenieromarino.com

Los biocombustibles no son la solución definitiva para la descarbonización del transporte marítimo, pero sí que pueden verse como **una fuente complementaria de energía que permita reducir y/o mitigar las emisiones contaminantes**.

Dado que el biodiésel (o HVO) se puede emplear en motores ya existentes sin necesidad de realizar modificaciones y cuenta con mejores propiedades que el FAME o el biometano, es la opción más prometedora de las tres. Además, su disponibilidad y capacidad de producción están completamente desarrolladas, establecidas y su uso está extendido.

Tabla 21. Características HVO. Fuente: *Master Plan for CO₂ reduction in the Dutch shipping sector*

	Disponibilidad y capacidad de producción		Compatibilidad con los motores y buques actuales	
	En la actualidad	En 2030	En la actualidad	En 2030
Navegación interior	✓	✓	✓	✓
Navegación de corta distancia (<i>short-sea shipping</i>)	✓	✓	✓	✓
Navegación marítima (<i>deep-sea shipping</i>)	✓	✓	✓	✓

Capítulo 3. Comparación de combustibles alternativos y tradicionales

Tras haber evaluado diferentes opciones de combustibles alternativos, en este capítulo se realiza una comparación de todas ellas, teniendo en cuenta las propiedades de cada combustible, la viabilidad y el rendimiento, los costos y el impacto medioambiental. Además, también se comparan las tecnologías que se emplean con cada combustible. Gracias a esta comparación, se exponen los combustibles y las tecnologías más viables para lograr la transición a un transporte marítimo limpio y eficiente.

Por otro lado, se realiza una comparación de los combustibles alternativos con los combustibles tradicionales para mostrar los beneficios y los desafíos de los combustibles alterativos frente a los tradicionales.

3.1. Comparación de los diferentes combustibles alternativos

A continuación, se exponen cuatro tablas con las ventajas y desventajas de cada una de las opciones presentadas en el proyecto. Estas tablas son un resumen en el que se recopilan aspectos relacionados con la composición y rendimiento de los combustibles, los costos de producción y facilidad de almacenaje y transporte entre otros.

Tras la enumeración de las ventajas y desventajas de los diferentes combustibles, se realiza una conclusión de cuáles son los más viables y por qué, así como las tecnologías más eficientes para implementarlos en el transporte marítimo.

Amoniaco

Tabla 22. Ventajas y desventajas del NH₃. Fuente: propia

Ventajas	Desventajas
Neutro en carbono y azufre → combustión limpia sin emisiones de CO ₂ y SO _x .	Densidad de energía volumétrica (12,7 MJ/L) inferior a la del gasoil marino (35 MJ/L)
Emisiones de NO _x controlables con tecnologías ya existentes y disponibles.	Para el mismo contenido energético de NH ₃ que de gasoil marino, se requeriría un volumen 2,8 veces mayor.
Existencia de redes de comercialización establecidas a nivel mundial.	
Cuenta con infraestructuras para su producción y se ha demostrado que es viable producirlo en cantidades industriales.	La combustión de amoniaco puede resultar en emisiones de NO _x y N ₂ O.
	Altamente tóxico y corrosivo → requiere mucha seguridad para trabajarlo.
Más económico y sencillo de transportar y almacenar (NH ₃ líquido) en comparación con otros combustibles que necesitan ser almacenados a temperaturas criogénicas.	Uso de tanques de almacenamiento independientes de la estructura del buque, (como en el caso del GPL y del GNL).
Riesgo bajo de ignición	La producción actual de amoniaco mediante el método de Haber-Bosch (amoniaco marrón) genera emisiones de gases contaminantes.
Se metaboliza en el medioambiente sin bioacumularse, salvo aplicaciones en exceso sobre cultivos (eutrofización o producción de NO ₂).	
Aplicable en motores de combustión dual, pilas tipo SOFC y como vector energético del hidrógeno.	

Hidrógeno

Tabla 23. Beneficios y retos del H₂. Fuente: propia

Beneficios	Retos
Poder calorífico elevado → transferencia de una cantidad de calor mayor por unidad de tiempo.	La licuación y compresión del H ₂ consumen mucha energía.
Neutro en carbono y azufre → combustión limpia sin emisiones de CO ₂ y SO _x .	Densidad de energía volumétrica (8,5 MJ/L) inferior a la del gasoil marino (35 MJ/L).
Puede producirse a través de energías renovables y procesos bio-renovables.	Para el mismo contenido energético de H ₂ que de gasoil marino, se requeriría un volumen 4,18 veces mayor.
	Falta de experiencia en el transporte marítimo.
Puede almacenarse y transportarse como líquido o gas.	Costo de combustible elevado.
No es tóxico ni corrosivo.	Baja disponibilidad de H ₂ renovable.
Poder calorífico elevado (3 veces superior a la mayoría de los combustibles de origen fósil).	Alto riesgo de explosión en espacios reducidos.
Aplicable en motores de combustión dual y en pilas tipo PEM.	Almacenamiento a temperaturas criogénicas.
	Fácilmente inflamable y volátil.

Metanol

Tabla 24. Ventajas y desventajas del CH₃OH. Fuente: propia

Ventajas	Desventajas
Reducción de las emisiones de SO _x hasta un 99%	Densidad de energía volumétrica (15,5 MJ/L) inferior a la del gasoil marino (35 MJ/L).
Reducción de las emisiones de NO _x hasta un 60%	Bajo punto de inflamación → se puede vaporizar y mezclar con el aire formando una mezcla inflamable a temperaturas relativamente bajas.
Reducción de las emisiones partículas un 95%	
Reducción de las emisiones de CO ₂ un 25%	
Cadenas de distribución y transporte ya existentes y bien posicionadas.	Es muy tóxico y una exposición prolongada es peligrosa → su manejo requiere más precaución y medidas de seguridad.
Líquido a temperatura y presión ambiente → permite seguir utilizando el almacenamiento y el abastecimiento de combustible convencional con unas pocas modificaciones → transición al metanol sea relativamente más fácil y asequible	Es corrosivo → puede afectar a los revestimientos de tanques, tuberías y accesorios de tuberías dentro del sistema de manejo de combustible.
Posibilidad de producirlo a partir de fuentes renovables.	Puede tener impactos medioambientales negativos en concentraciones muy altas.
Su implementación ya está en marcha en pilas y motores.	Contiene carbono → su combustión no elimina las emisiones de CO ₂ .
	Límites de inflamabilidad en el aire muy amplios → necesaria la implementación de requisitos de seguridad más estrictos.

Biocombustibles

Tabla 25. Ventajas y desventajas de los biocombustibles. Fuente: propia

Ventajas	Desventajas
Las materias primas que los componen tienen un bajo contenido en azufre → no genera emisiones de SO _x .	Costos de producción muy elevados en comparación con los combustibles fósiles (50 – 150%)
Las materias primas que los componen son abundantes.	Problemas para el almacenamiento y la estabilidad de oxidación del combustible.
No requieren un refinado intensivo para emplearse como combustibles.	La producción comercial de biocombustibles tendría que ser muy voluminosa para cumplir con la demanda del sector naval.
No requieren cambios importantes en la infraestructura de abastecimiento.	Adaptación muy compleja de los buques para emplear biocombustibles.
	Preocupación por riesgos de sostenibilidad asociados al uso de biocombustibles, como el cambio de uso de la tierra.
El HVO se puede emplear en motores que trabajan con HFO y MGO.	Degradación del biodiésel → formación de depósitos en las tuberías que afectan al rendimiento del motor
	Punto de enturbiamiento del biodiésel mayor que el del diésel → propiedades de flujo deficientes

3.1.1. Compatibilidad de las tecnologías y los combustibles

En el capítulo anterior del proyecto se han expuesto diferentes opciones para implementar cada uno de los combustibles alternativos, explicando también cuáles eran las limitaciones y los beneficios de utilizar diferentes tecnologías. En la siguiente tabla, se presenta un resumen de cada combustible y de las tecnologías con las que es compatible.

Tabla 26. Compatibilidad de combustibles y tecnologías. Fuente: propia

	Motores		Pilas de combustible	
	Sin modificaciones	Con modificaciones	SOFC	PEM
Amoniaco	X	✓	✓	X
Hidrógeno	X	✓	✓	✓
Metanol	✓	-	X	X
HVO	✓	-	X	X

Por un lado, se puede observar que para el amoniaco y el hidrógeno los motores diésel marinos convencionales no son una opción, pero sí es viable utilizar estos combustibles realizando modificaciones en los motores de combustión dual o de encendido por chispa. Sin embargo, el biodiésel (o HVO) sí es capaz de alimentar motores diésel marinos sin necesidad de realizar modificaciones. Asimismo, los motores diésel también pueden ser alimentados con metanol si se realizan ligeras modificaciones, tal y como se muestra en el apartado de aplicaciones del CH₃OH en el transporte marítimo.

Por otro lado, las únicas opciones de trabajar con pilas SOFC y PEM son el hidrógeno y el amoniaco. A pesar de que el metanol puede alimentar pilas de combustible de metanol directo (DMFC), no se tiene en cuenta esta opción dado que, según el documento de DNV-GL [29], este tipo de pilas no están preparadas para implementarse en el sector naval.

Tabla 27. Propiedades pilas DMFC. Fuente: EMSA DNV-GL

Coste relativo	Potencia	Vida útil	Combustible	Emisiones	Eficiencia	“Experiencia” en el sector
Moderado	Hasta 5 kW	Moderada	Metanol	CO ₂	20% (eléctrica)	En desarrollo

3.1.2. Selección de las opciones estudiadas

A partir de la comparación de las propiedades y aplicaciones de los diferentes combustibles, se puede afirmar que **los más prometedores para descarbonizar el transporte marítimo son el amoníaco y el hidrógeno**. Esto se debe a que son aplicables tanto a motores de combustión interna como a pilas PEM y de óxido sólido, que son a su vez las opciones más prometedoras en cuanto a pilas de combustible. Como se ha expuesto a lo largo del trabajo, existen actualmente diversos estudios y proyectos de implementación de estas tecnologías para propulsar buques mercantes y que, por tanto, avalan la viabilidad de implementar dichas tecnologías.

A parte de contar con más aplicaciones, el NH₃ y el H₂ son **combustibles sostenibles y se pueden producir en cantidades suficientes** que permiten descarbonizar la industria del transporte marítimo. Dado **que su composición no contiene carbono ni azufre, las emisiones de CO₂ y SO_x son inexistentes como productos o subproductos de su combustión**.

Por otra parte, la opción de los biocombustibles queda descartada como opción óptima para descarbonizar el transporte marítimo, ya que su producción no es suficiente para cumplir con la demanda del transporte marítimo y sus costes de producción son muy elevados. Asimismo, aunque bajos, los biocombustibles generan emisiones de CO₂ y SO_x y además el biodiésel (HVO) puede degradarse con el tiempo formando contaminantes de polímeros y otros compuestos insolubles, lo cual afectaría negativamente al funcionamiento y rendimiento del motor.

El metanol, aunque permite reducir las emisiones de CO₂, tiene contenido en carbono y es muy tóxico y corrosivo. Además, al contrario que el amoníaco, tiene unos límites de inflamabilidad muy amplios y, en consecuencia, se deben implementar sistemas de seguridad muy estrictos. Su implementación en motores ha demostrado ser eficiente, pero no es un combustible

completamente limpio y neutro en emisiones y, dado que tampoco se puede implementar en pilas PEM y de óxido sólido, es una opción menos atractiva que el NH_3 y el H_2 .

En lo referente a las tecnologías aplicables al NH_3 y el H_2 , existen varios parámetros que se deben tener en cuenta para determinar la tecnología óptima, como la eficiencia, el coste, el desarrollo de dicha tecnología y los niveles de emisiones que genera.

En primer lugar, y tal y como se ha expuesto con anterioridad, la tecnología más limpia son las pilas de combustible, pero se enfrentan a barreras económicas y de desarrollo que dificultan el cumplimiento con la demanda del transporte marítimo. Esto se debe a que los **costes de producción de esta tecnología son muy elevados**, normalmente asociados al catalizador que emplea (en el caso de las PEM es platino) y a que **las pilas de combustible todavía no cuentan con los avances necesarios que les permitan propulsar buques de grandes dimensiones y con cargas elevadas**. Otra desventaja de esta tecnología es que el tamaño de las baterías necesarias para almacenar la energía generada por las pilas sería de dimensiones muy elevadas y serían muy pesadas para ser transportadas. No obstante, las pilas PEM son una tecnología que ya se aplica a algunas embarcaciones (ver Tabla 16) y tienen buenas proyecciones de futuro.

La ventaja que ofrecen los motores de combustión interna frente a las pilas de combustible es que son una tecnología más desarrollada y con años de experiencia en el sector naval. Asimismo, los motores son más eficientes que las pilas de combustible cuando trabajan con cargas elevadas. El principal problema de los motores es que todavía no están desarrollados para trabajar con amoníaco o hidrógeno puro, y se deben mezclar con diésel o gasolina para que la combustión sea posible. A pesar de esto, **las emisiones contaminantes son inversamente proporcionales al aumento del uso del amoníaco en la mezcla**, es decir, **si se emplea una mezcla de un 70% de NH_3 o H_2 , las emisiones contaminantes se reducen en un 70% en comparación al uso de gasolina o diésel puro**. Además, para poder reducir estas emisiones todavía más, se pueden emplear procesos de postratamiento.

Finalmente, aunque ambos combustibles son los más prometedores para garantizar un transporte limpio y sostenible y cumplir así con los objetivos de la OMI, **el amoníaco cuenta con algunas ventajas**. Es **más sencillo de transportar y almacenar**, ya cuenta con redes de distribución bien establecidas a nivel mundial, **su producción es abundante y también es capaz de funcionar como vector energético para el transporte de hidrógeno**. Por otro lado, se debe destacar que su

densidad de energía por volumen es más elevada que la del hidrógeno, lo cual también lo convierte en una opción más eficiente.

3.2. Comparación con los combustibles tradicionales

Esta sección tiene la finalidad de mostrar la comparación de los combustibles expuestos en el apartado anterior con los que se utilizan hoy en día para la propulsión de buques mercantes.

En primer lugar, y el motivo de mayor relevancia para implementar combustibles alternativos, es la reducción de gases contaminantes que implica su uso. A lo largo del proyecto ya se han expuesto las ventajas medioambientales de utilizar dichos combustibles y es que, mediante su implementación, se pueden reducir las emisiones y cumplir con los objetivos de la OMI.

Por otro lado, **el uso de combustibles alternativos también debe incluir la obtención de éstos a través de fuentes de energía renovables** tales como la solar o la eólica, **consiguiendo así eliminar la dependencia de los combustibles fósiles** como el petróleo. Tanto el HFO como el MGO, se obtienen de la destilación del petróleo crudo, que es 100% de origen fósil. Asimismo, el GNL y el GLP, que son alternativas actuales a los combustibles tradicionales, también se obtienen a partir de fuentes fósiles. En este caso, **una alternativa posible son los biocombustibles** tales como el biometano o el biodiésel que, **a pesar de generar emisiones de gases contaminantes al combustionar, se obtienen a partir de recursos naturales y residuos orgánicos.**

A pesar de que los combustibles alternativos ofrezcan mejoras para el transporte marítimo en lo referente a contaminación, e incluso eficiencia, también cuentan con algunas desventajas frente a los combustibles convencionales. **Estas desventajas están directamente relacionadas con la composición del amoníaco y el hidrógeno, ya que son combustibles con una densidad de energía por volumen menor que la del HFO, el MGO o incluso el GNL y el GLP.** También, otra propiedad de la que carecen el hidrógeno y el amoníaco es el índice de cetano, que determina el grado de inflamabilidad de un compuesto.

En el análisis comparativo no se han incluido aspectos económicos relacionados con la producción, distribución y almacenamiento de los combustibles alternativos al no ser objeto del presente trabajo. No obstante, a grandes rasgos, la producción y obtención de los combustibles de origen fósil es más barata debido a su amplia disponibilidad y su fácil obtención.

Tabla 28. Comparación de combustibles alternativos y convencionales. Fuente: propia basada en *an industrial view of ammonia as marine fuel*

Combustible	Emisiones de SO _x	Emisiones de NO _x	CO ₂ por combustión [kg CO ₂ /GJ]	Poder calorífico inferior [MJ/kg]	Densidad de energía [MJ/L]
HFO	Sí	Sí	80	40,5	35
Gas natural licuado (GNL)	No	Sí (80% menos que el HFO)	56	50	22,5
Gas licuado del petróleo (LPG)	Sí	Sí (95% menos que el HFO)	60	46	25,5
Amoniaco	No	Bajas (si se usan sistemas de postratamiento)	0	18,6	12,7
Metanol	Bajas	Bajas	70	19,9	15,5
Hidrógeno	No	Bajas	0	120	8,5

A pesar de los retos con los que cuentan los combustibles alternativos, su proyección de futuro es muy prometedora y ya hay muchos proyectos en marcha que están llevando a cabo su implementación para emplearlos como sustitutos a los combustibles convencionales lo antes posible.

De acuerdo con la OMI y con algunas sociedades de clasificación como ABS o DNV, el uso de combustibles alternativos es fundamental para lograr un transporte marítimo limpio y sostenible, y los combustibles que más potencial tienen para conseguirlo son el NH₃ y el H₂, tal y como se muestra en la siguiente gráfica.

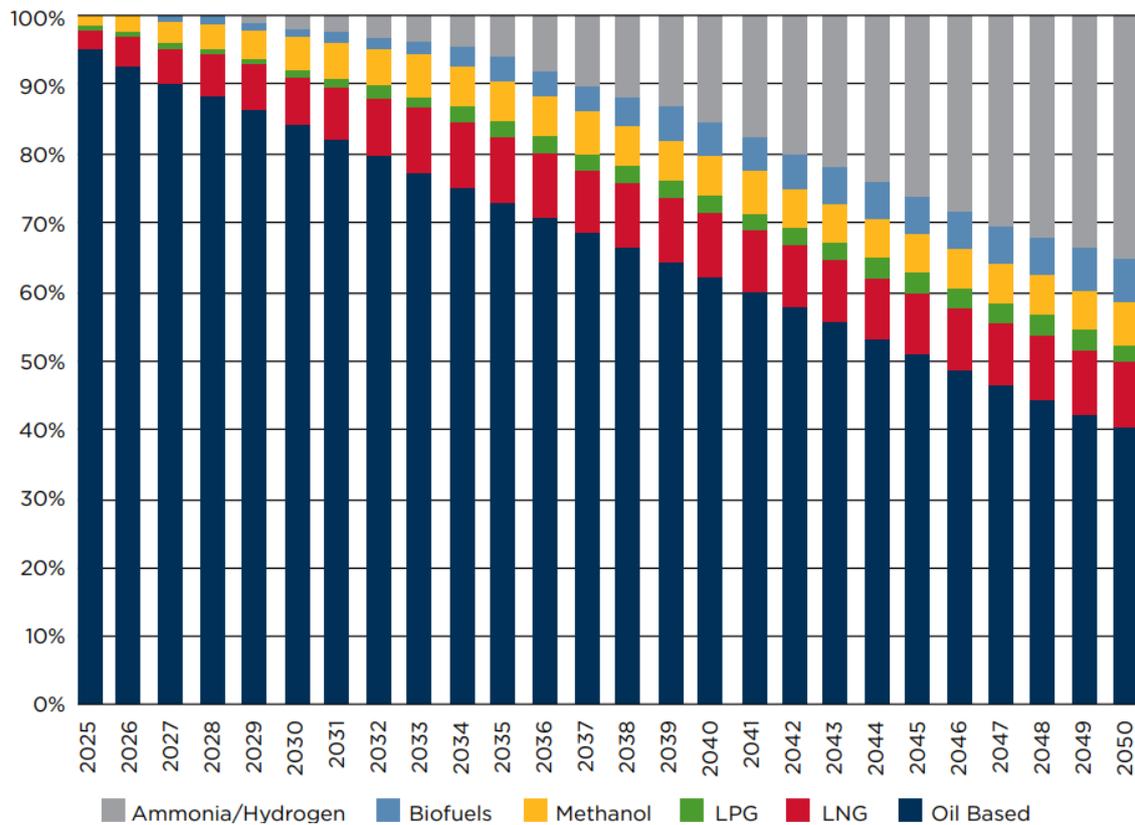


Figura 40. Predicción del uso de combustibles en 2050. Fuente: *ABS Setting the Course to Low Carbon Shipping*

Como se puede observar, el amoníaco y el hidrógeno son los combustibles con mayor potencial para reducir la huella de carbono del transporte marítimo y cumplir con los objetivos de la OMI para 2050. Esto se debe, principalmente, a que son combustibles neutros en carbono. Aun así, estos combustibles se enfrentan a algunas barreras como el contenido de energía en comparación con los combustibles tradicionales, pero son los que mayor potencial tienen en el largo plazo. El incremento del uso del metanol y los biocombustibles prevé ser menor a lo largo del tiempo, dado que ninguna de las opciones tiene tanto potencial como el hidrógeno y el amoníaco. **El metanol y los biocombustibles ayudan a la descarbonización del transporte marítimo, pero no tienen la capacidad de cumplir con la demanda del transporte marítimo de la misma manera que lo harían el NH₃ o el H₂.**

Según el documento de *American Bureau of Shipping*, donde se evalúa el amoníaco como combustible marino [30], **se espera que el uso del NH₃ como combustible aumente en mayor medida debido al contenido de carbono cero, la distribución, el almacenamiento y**

abastecimiento más sencillos en comparación con el hidrógeno, y su idoneidad con las tecnologías existentes y emergentes para la propulsión y la generación de energía.

También se puede observar que, a medida que pase el tiempo y aumente el uso del H₂ y NH₃, también disminuirá el uso de combustibles de origen fósil. Por otro lado, la gráfica muestra cómo el uso de GNL y GLP no prevé un aumento tan significativo como el del amoníaco y el hidrógeno.

Capítulo 4. Implementación de combustibles alternativos

Tras realizar un análisis de los diferentes combustibles alternativos y sus tecnologías, incluyendo la comparación que permitiese identificar los beneficios y las limitaciones de cada uno de ellos, en este capítulo se presenta la implementación de los combustibles en una flota real. Para ello, se recopilan datos de las emisiones de CO₂ de diferentes flotas en los años 2018, 2019 y 2020 y se comparan estos niveles de emisiones con escenarios hipotéticos en los que se implementan combustibles alternativos. **Se evalúa el factor de emisión “tank-to-wake”, que es un promedio de las emisiones desde que el combustible se encuentra en el tanque hasta que es quemado.**

Para la realización de este capítulo se han consultado los datos de MRV THETIS [31] para obtener las estadísticas de consumo de combustible y emisiones totales de CO₂ de tres flotas: portacontenedores (*containerships*), graneleros (*bulk carriers*) y metaneros (*oil tankers*). Se han seleccionado estos tres tipos de buques ya que son los más contaminantes.

La realización del apartado se ha llevado a cabo de la siguiente manera:

1. Consulta de las estadísticas de todos los **buques de más de 5000 toneladas de arqueo bruto que lleguen o salgan de puertos de un Estado Miembro.**
2. Selección de tres flotas: graneleros, portacontenedores y metaneros.
3. Elaboración en Excel de tablas y gráficas para los años 2018, 2019 y 2020, teniendo en cuenta los parámetros de consumo de combustible y emisiones totales de CO₂.
4. Selección de las tecnologías y combustibles alternativos para cada escenario:
 - a. Escenario I: evolución de las emisiones entre 2018 y 2020
 - b. Escenario II: las tres flotas propulsadas por motores de combustión interna alimentados con mezcla de amoníaco y diésel (70% de NH₃).

- c. Escenario III: las tres flotas propulsadas por motores de combustión interna alimentados con metanol.
5. Para el escenario II se asume que la obtención del amoníaco se hace a partir de fuentes renovables, por tanto, el combustible que se emplea es NH₃ verde.
6. Las unidades para el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ son toneladas (t).

4.1. Escenario I

El primer escenario es el escenario real, y muestra las emisiones de los buques portacontenedores, metaneros y graneleros en 2018, 2019 y 2020. Este escenario tiene la finalidad de mostrar la evolución de las emisiones contaminantes entre los años 2018 y 2020 con el fin de determinar si éstas se han reducido.

Durante el período de tiempo del escenario I, no ha habido implementación de ninguno de los combustibles expuestos en el proyecto.

Para realizar el análisis comparativo se han considerado los buques activos, es decir, aquellos buques que consumieron combustible durante el período 2018-2020, y descartando aquellos que tienen un consumo de combustible nulo.

Tabla 29. Datos de consumo y emisiones totales de CO₂ de la flota de graneleros del año 2018 al 2020.
Fuente: propia basada en MRV THETIS

GRANELEROS					
Año	Buques activos	Consumo de combustible (t)	Consumo medio/buque (t)	Emisiones CO ₂ (t)	Media de emisiones CO ₂ /buque (t)
2018	3.472	5,91E+06	1,70E+03	1,86E+07	5,35E+03
2019	3.426	5,45E+06	1,59E+03	1,71E+07	5,00E+03
2020	3.281	4,66E+06	1,42E+03	1,47E+07	4,47E+03

Tabla 30. Datos de consumo y emisiones totales de CO₂ de la flota de portacontenedores del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS

PORTACONTENEDORES					
Año	Buques activos	Consumo de combustible (t)	Consumo medio/buque (t)	Emisiones CO ₂ (t)	Media de emisiones CO ₂ /buque (t)
2018	1.733	1,45E+07	8,37E+03	4,53E+07	2,62E+04
2019	1.814	1,43E+07	7,89E+03	4,48E+07	2,47E+04
2020	1.819	1,33E+07	7,32E+03	4,17E+07	2,29E+04

Tabla 31. Datos de consumo y emisiones totales de CO₂ de la flota de metaneros del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS

METANEROS					
Año	Buques activos	Consumo de combustible (t)	Consumo medio/buque (t)	Emisiones CO ₂ (t)	Media de emisiones CO ₂ /buque (t)
2018	1.815	6,06E+06	3,34E+03	1,91E+07	1,05E+04
2019	1.963	6,37E+06	3,25E+03	2,01E+07	1,02E+04
2020	1.906	5,94E+06	3,12E+03	1,87E+07	9,82E+03

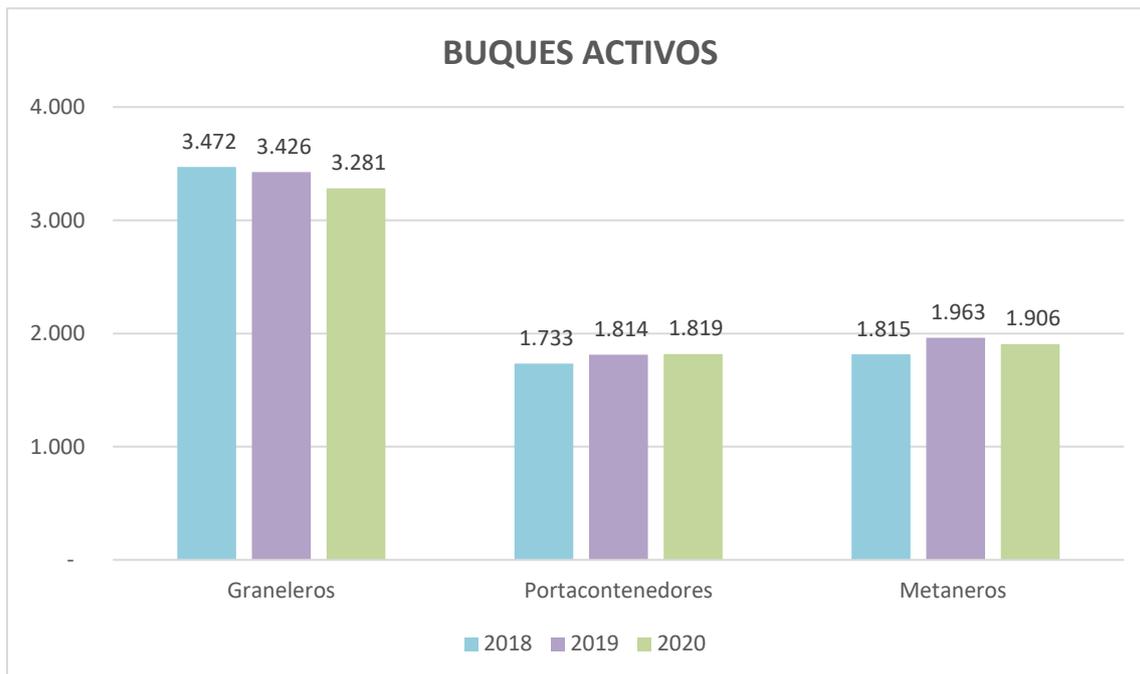


Figura 41. Evolución del número de buques activos del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS

Tal y como se puede observar en la Figura 41, el número total de buques activos aumentó un 3% en el año 2019, porcentaje que disminuyó en la misma medida en 2020, **manteniéndose el número total de buques activos fijo en los 3 años**. Respecto a los graneleros, se aprecia una disminución de un 1% de 2018 a 2019, y una disminución del 4% de 2019 a 2020. En el caso de portacontenedores, sin embargo, se aprecia un aumento en 2019 de un 5%, mientras que entre los años 2019 y 2020 no aumenta. Por último, en el caso de los metaneros, se puede apreciar un aumento en el número de buques de un 8% del año 2018 al 2019 y una disminución de un 3% entre los años 2019 y 2020.

Estos datos permiten concluir, por tanto, que la pandemia provocada por la COVID-19 no tuvo efecto en cuanto a la disminución del número de buques activos en el año 2020.

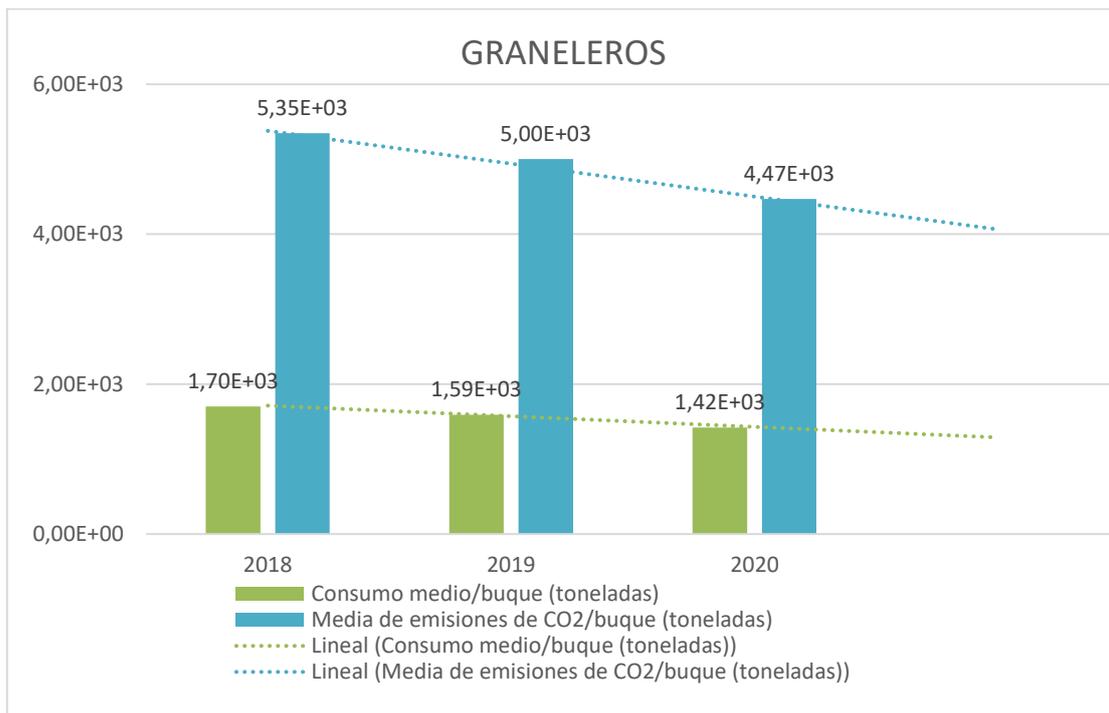


Figura 42. Evolución del consumo y de las emisiones de CO₂ en la flota de graneleros del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS

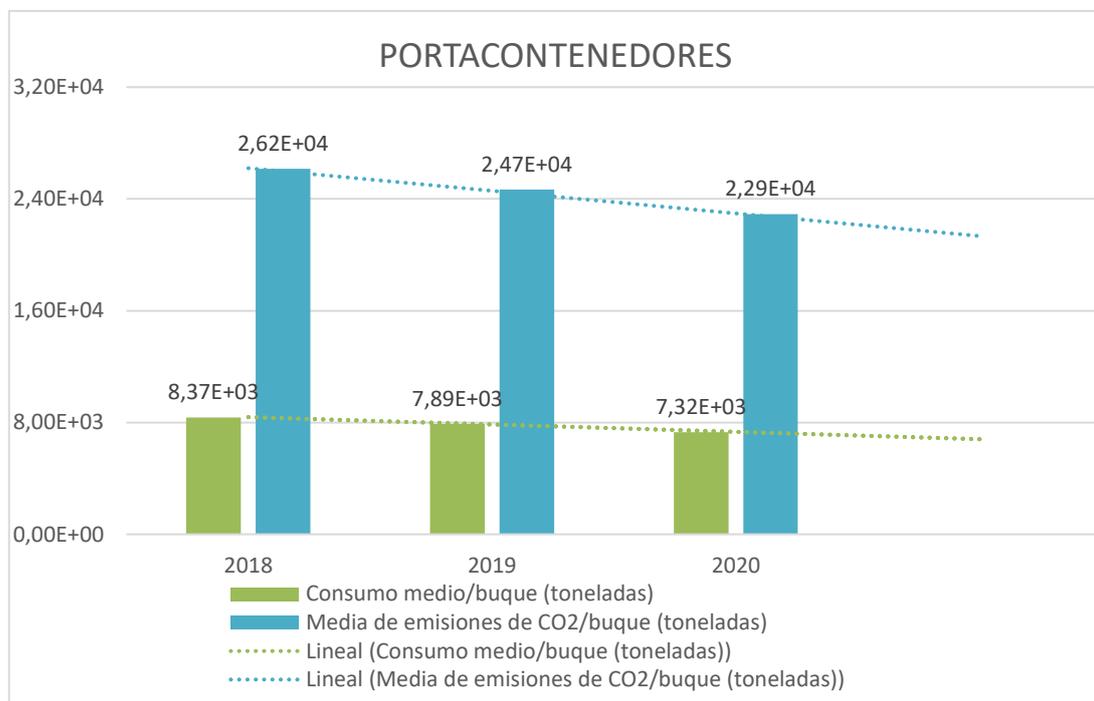


Figura 43. Evolución del consumo y de las emisiones de CO₂ en la flota de portacontenedores del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS

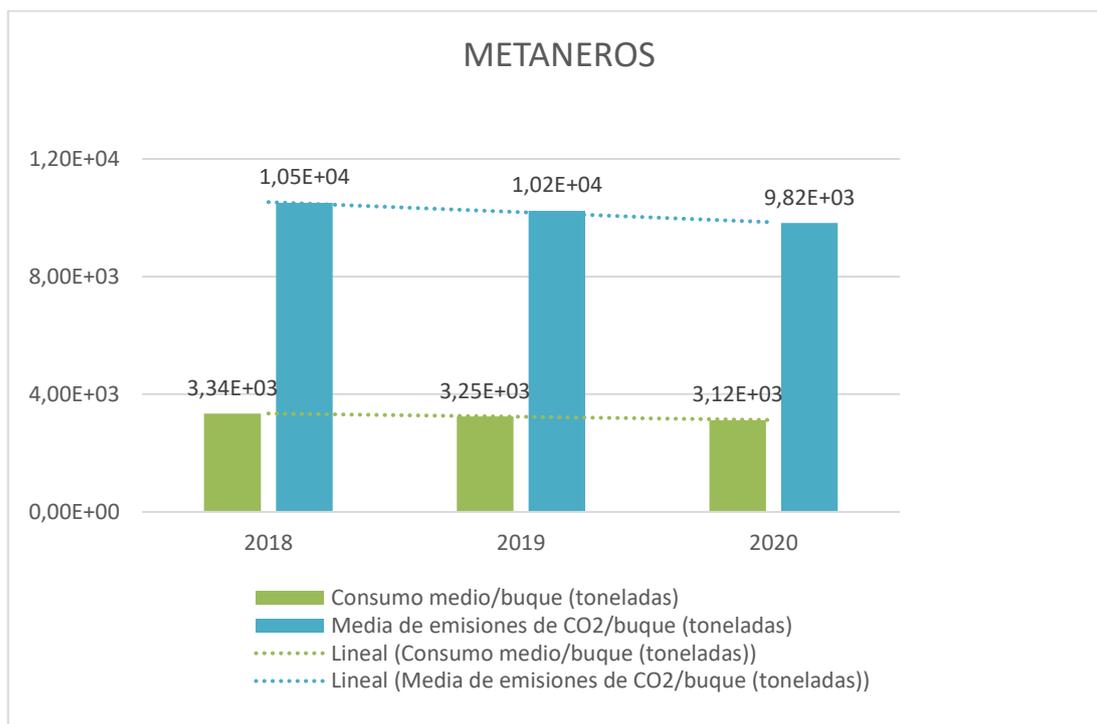


Figura 44. Evolución del consumo y de las emisiones de CO₂ en la flota de graneleros del año 2018 al 2020. Fuente: propia basada en MRV THETIS

A pesar de que, como se ha visto anteriormente, el número de buques activos no es una variable que influya en el consumo de combustible ni en las emisiones de CO₂, a efectos comparativos se ha decidido realizar el cálculo del consumo medio, así como una media de las emisiones CO₂ por buque para eliminar la variable del número de buques.

En el caso de los graneleros se aprecia una disminución en el consumo medio por buque del 7% entre 2018 y 2019 y del 11% entre 2019 y 2020, que se corresponde con una disminución de la media de emisiones de CO₂ por buque del mismo porcentaje.

Por otro lado, la disminución del consumo medio por buque en la flota de portacontenedores entre los años 2018 y 2019 es de un 6%, y de un 7% entre 2019 y 2020. En consecuencia, la media de emisiones de CO₂ por buque también se reduce en esa misma medida.

Por último, en el caso de la flota de graneleros, se aprecia una disminución en el consumo medio por buque del 3% entre 2018 y 2019 y del 4% entre 2019 y 2020, que se corresponde con una disminución de la media de emisiones de CO₂ por buque del mismo porcentaje.

Se puede concluir que, en el período que va del 2018 al 2020, ha habido una disminución en la media de emisiones de CO₂ en las tres flotas y en las emisiones totales, debido a una disminución

en el consumo medio por buque, así como en el consumo total. Por lo tanto, **la disminución en las emisiones se puede deber a la aplicación de medidas que fomenten la disminución del consumo de combustible**. La tendencia que se ve en las tres flotas de buques es una disminución tanto en el consumo como en las emisiones de CO₂, siendo mayor en los graneleros, donde en 2020 se redujo un 11% respecto a 2019, y seguido de los portacontenedores y de los metaneros.

4.2. Escenario II

El escenario II tiene la finalidad de mostrar la reducción de emisiones de CO₂ si se emplean combustibles alternativos verdes. Para este caso, se asume que las tres flotas son propulsadas por motores de combustión interna alimentados con mezclas de amoníaco y diésel (70% de NH₃).

Para la obtención de los datos, y a partir de la memoria del proyecto, se establece que el uso de esta mezcla de combustible reduce las emisiones en proporción al porcentaje de amoníaco utilizado en la mezcla, por tanto, a partir de las tablas de Excel, se calcula una disminución del 70% en las emisiones totales de CO₂.

Se asume que el número de buques en cada una de las flotas es el mismo que en el año 2020.

Tabla 32. Datos del escenario II. Fuente: propia basada en MRV THETIS

ESCENARIO II					
Tipo de buque	Buques activos	Emisiones totales CO ₂ combustible convencional (t)	Media de emisiones CO ₂ /buque (t)	Emisiones CO ₂ mezcla NH ₃ 70% (t)	Media de emisiones CO ₂ /buque (t)
Graneleros	3.281	1,47E+07	4,47E+03	4,40E+06	1,34E+03
Portacontenedores	1.819	4,17E+07	2,29E+04	1,25E+07	6,87E+03
Metaneros	1.906	1,87E+07	9,82E+03	5,62E+06	2,95E+03

4.3. Escenario III

En el caso del escenario III, se asume que las tres flotas son propulsadas por motores de combustión interna alimentados con metanol. Como se ha expuesto previamente en el capítulo 2, el metanol consigue reducir las emisiones de CO₂ en un 25%. Por tanto, a partir de las tablas de Excel, se calcula una disminución del 25% en las emisiones totales de CO₂.

Se asume que el número de buques en cada una de las flotas es el mismo que en el año 2020.

Tabla 33. Datos del escenario III. Fuente: propia basada en MRV THETIS

ESCENARIO III					
Tipo de buque	Buques activos	Emisiones totales CO ₂ combustible convencional (t)	Media de emisiones CO ₂ /buque (t)	Emisiones CO ₂ metanol (t)	Media de emisiones CO ₂ /buque (t)
Graneleros	3.281	1,47E+07	4,47E+03	4,40E+06	1,34E+03
Portacontenedores	1.819	4,17E+07	2,29E+04	1,25E+07	6,87E+03
Metaneros	1.906	1,87E+07	9,82E+03	5,62E+06	2,95E+03

Tras plantear los escenarios junto con las emisiones resultantes al emplear tanto combustibles tradicionales como combustibles alternativos, se realiza la comparación entre ellos a mediante las emisiones de CO₂ emitidas y el índice de intensidad de carbono.

4.4. Comparación entre los escenarios

Tras plantear los dos escenarios, se elabora una gráfica comparativa que permita apreciar de manera visual el impacto de emplear motores de combustión interna alimentados con mezclas de amoníaco (escenario II) y con metanol (escenario III). Para hacer la comparación de las emisiones teóricas en los 3 escenarios, se ha considerado el mismo número de buques que en 2020 y puesto que el objetivo del trabajo está centrado en las emisiones de GEI, no se ha considerado la comparación entre el consumo de combustible.

4.4.1. Comparación de los niveles de emisiones

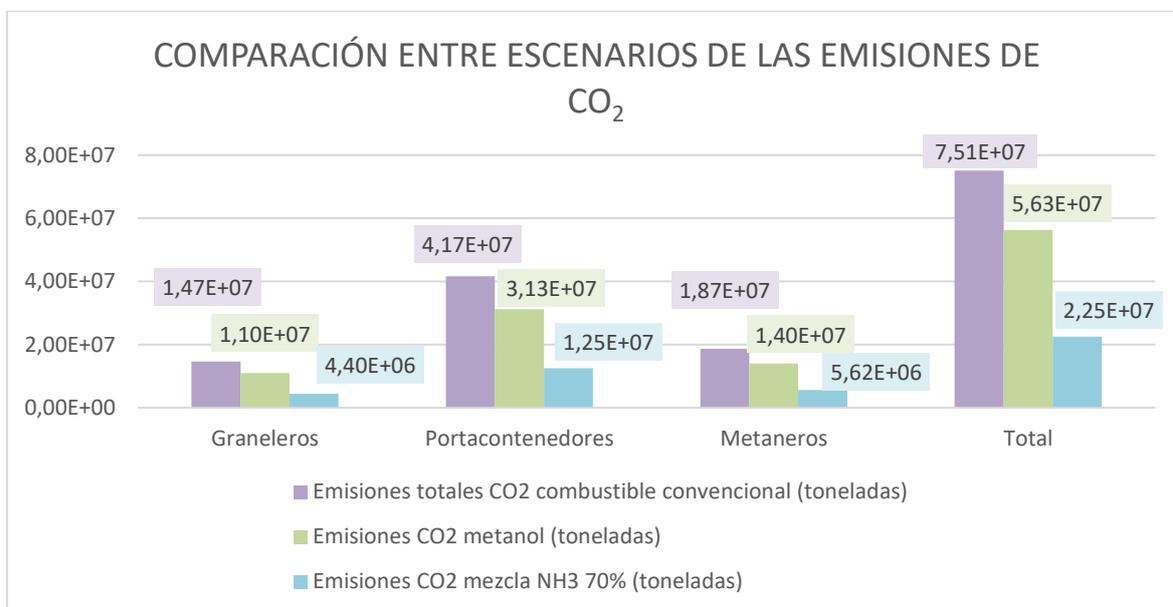


Figura 45. Comparación de las emisiones de CO₂ en los escenarios I, II y III. Fuente: propia basada en MRV THETIS

Como se puede observar en la Figura 45, las emisiones de CO₂ se reducirían en grandes proporciones si se empleasen combustibles alternativos y se puede apreciar que el uso de mezclas de amoníaco reduce las emisiones de CO₂ en mayor cantidad que el metanol.

En el escenario I se puede apreciar la tendencia a la baja del consumo de combustible y, en consecuencia, de las emisiones de CO₂, pero, si se compara con los escenarios II y III la disminución es mucho mayor. Esto evidencia que las medidas para disminuir el consumo de

combustible son efectivas y permiten reducir las emisiones de CO₂, pero que el uso de combustibles alternativos permite una disminución mucho más significativa.

4.4.2. Comparación a partir del índice de intensidad de carbono

Para realizar la comparación a partir del índice de intensidad de carbono, se ha seleccionado un buque de la flota de portacontenedores, ya que es la que más toneladas de CO₂ emite de las tres estudiadas en el subapartado anterior. Se selecciona un buque de los 1819 de la flota de 2020, ya que este es el año que se toma de referencia para hacer la comparación a partir del CII. Tras la selección del buque, se presenta una tabla con las especificaciones pertinentes que permiten calcular el índice de intensidad de carbono. Se calcula entonces el CII del buque en los tres escenarios presentados en el subapartado anterior: aplicando combustibles convencionales, combustibles con mezcla al 70% de amoníaco y combustibles de metanol.

Tabla 34. Especificaciones buque portacontenedores MSC ROBERTA. Fuente: propia basada en MRV THETIS y vesselfinder.com

Nombre del buque	MSC ROBERTA
Número IMO	9038907
GT	53815 toneladas
DWT	67640 toneladas
Emisiones de CO ₂ (combustible convencional)	40756,5 toneladas
Emisiones de CO ₂ (mezcla amoníaco al 70%)	12226,95 toneladas
Emisiones de CO ₂ (combustible de metanol)	30567,375 toneladas
Distancia recorrida	77426 millas náuticas

Una vez seleccionado el buque, se calcula el índice de intensidad de carbono para cada uno de los casos para comprobar si la clasificación de la eficiencia energética cambia en el caso de emplear combustibles alternativos. A continuación, se especifica el proceso llevado a cabo para dicho cálculo.

En primer lugar, se calcula el valor del índice de intensidad de carbono alcanzado ($CII_{Attained}$) y del índice de intensidad de carbono requerido ($CII_{Required}$).

$$CII_{Attained} = \frac{\text{emisiones de CO}_2}{\text{tonelaje de peso muerto} \times \text{distancia}} \times 10^6 \quad (9)$$

Para llevar a cabo el cálculo del $CII_{Required}$, es necesario calcular el índice de intensidad de carbono de referencia ($CII_{Reference}$), que se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$CII_{Reference} = a \times DWT^{-c} \quad (10)$$

En esta ecuación, los valores de a y c dependen del tipo de buque que se esté evaluando y se determinan a partir de la siguiente tabla:

Tabla 35. Valores de los coeficientes a y c para los diferentes tipos de buque. Fuente: ClassNK

Ship Type		Capacity	a	c
Bulk Carrier	DWT ≥ 279,000	279,000	4745	0.622
	DWT < 279,000	DWT	4745	0.622
Gas Carrier	DWT ≥ 65,000	DWT	14405E+7	2.071
	DWT < 65,000	DWT	8104	0.639
Tanker		DWT	5247	0.610
Container ship		DWT	1984	0.489
General cargo ship	DWT ≥ 20,000	DWT	31948	0.792
	DWT < 20,000	DWT	588	0.389
Refrigerated cargo carrier		DWT	4600	0.557
Combination carrier		DWT	40853	0.812
LNG Carrier	DWT ≥ 100,000	DWT	9.827	0
	100,000 > DWT ≥ 65,000	DWT	14479E+10	2.673
	DWT < 65,000	65,000	14479E+10	2.673
Ro-ro cargo ship (VC)		GT	5739	0.631
Ro-ro cargo ship		DWT	10952	0.637
Ro-ro passenger ship		GT	7540	0.587
Cruise passenger ship		GT	930	0.383

Tras asignar los valores de a y c , se puede proceder al cálculo del $CII_{Reference}$, para posteriormente calcular el $CII_{Required}$, que se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$CII_{Required} = CII_{Reference} \times \frac{100 - Z}{100} \quad (11)$$

El valor de Z de la ecuación anterior es el factor de reducción, cuyo valor va disminuyendo conforme pasa el tiempo, siendo cada vez más restrictivo. Se ha establecido que para el año 2023, que es cuando la implementación del CII entra en vigor, será de un 5%, con lo que se emplea este valor para los cálculos del apartado.

Tabla 36. Factor de reducción para el cálculo del CII. Fuente: ClassNK

Año	Factor de reducción (Z)
2023	5%
2024	7%
2025	9%
2026	11%

Finalmente, se calcula el valor d , que permite determinar el intervalo del CII en el que se encuentra el buque. El valor d se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$d = \frac{CII_{Attained}}{CII_{Requiere}} \quad (12)$$

A partir de la siguiente tabla, se determina el intervalo en el que se encuentra el buque:

Tabla 37. Valores para la determinación del intervalo d en cálculo del CII. Fuente: ClassNK

Ship type	d1	d2	d3	d4
Bulk Carrier	0.86	0.94	1.06	1.18
Gas Carrier >=65,000DWT	0.81	0.91	1.12	1.44
<65,000DWT	0.85	0.95	1.06	1.25
Tanker	0.82	0.93	1.08	1.28
Container ship	0.83	0.94	1.07	1.19
General cargo ship	0.83	0.94	1.06	1.19
Refrigerated cargo carrier	0.78	0.91	1.07	1.20
Combination carrier	0.87	0.96	1.06	1.14
LNG Carrier >= 100,000DWT	0.89	0.98	1.06	1.13
<100000DWT	0.78	0.92	1.10	1.37
Ro-ro cargo ship (VC)	0.86	0.94	1.06	1.16
Ro-ro cargo ship	0.66	0.9	1.11	1.37
Ro-ro passenger ship	0.72	0.90	1.12	1.41
Cruise passenger ship	0.87	0.95	1.06	1.16

Una vez determinado el intervalo a partir del valor d , se determina la clase del buque como se muestra a continuación:

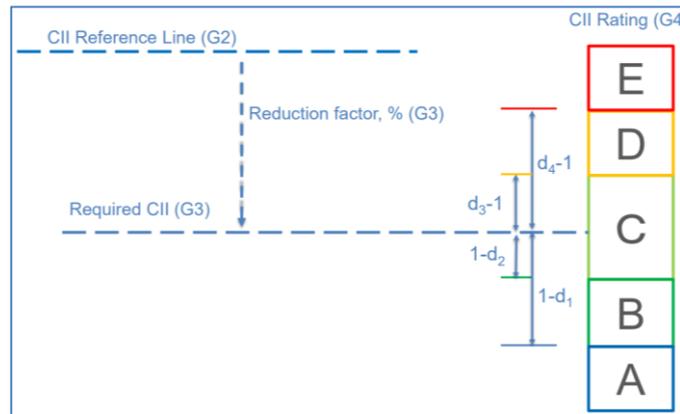


Figura 46. Determinación de la clasificación de la eficiencia energética del buque. Fuente: ClassNK

Tras especificar el método de cálculo del índice de la intensidad de carbono, se procede al cálculo para el buque seleccionado en cada uno de tres los escenarios.

Cálculo CII en el escenario I: MSC ROBERTA con combustible convencional

$$CII_{Attained} = \frac{\text{emisiones de } CO_2}{\text{tonelaje de peso muerto} \times \text{distancia}} \times 10^6 = \frac{40756,5}{77426 \times 67640} \times 10^6 = 7,782 \quad (13)$$

$$CII_{Reference} = a \times DWT^{-c} = 1984 \times 67640^{-0,489} = 8,621 \quad (14)$$

$$CII_{Required} = CII_{Reference} \times \frac{100 - Z}{100} = 8,621 \times \frac{100 - 5}{100} = 8,19 \quad (15)$$

$$d = \frac{CII_{Attained}}{CII_{Required}} = \frac{7,782}{8,19} = 0,95 \quad (16)$$

El buque MSC ROBERTA se encuentra entre $d_2 < 0,95 < d_3$, por lo que pertenece a la clase C.

Cálculo CII en el escenario II: MSC ROBERTA con mezcla de amoniaco al 70%

$$CII_{Attained} = \frac{\text{emisiones de } CO_2}{\text{tonelaje de peso muerto} \times \text{distancia}} \times 10^6 = \frac{12226,95}{77426 \times 67640} \times 10^6 = 2,334 \quad (17)$$

$$CII_{Reference} = a \times DWT^{-c} = 1984 \times 67640^{-0,489} = \mathbf{8,621} \quad (18)$$

$$CII_{Required} = CII_{Reference} \times \frac{100 - Z}{100} = 8,621 \times \frac{100 - 5}{100} = \mathbf{8,19} \quad (19)$$

$$d = \frac{CII_{Attained}}{CII_{Required}} = \frac{2,334}{8,19} = \mathbf{0,284} \quad (20)$$

Cálculo CII en el escenario III: MSC ROBERTA con combustible de metanol

$$CII_{Attained} = \frac{\text{emisiones de CO}_2}{\text{tonelaje de peso muerto} \times \text{distancia}} \times 10^6 = \frac{30567,375}{77426 \times 67640} \times 10^6 = \mathbf{5,837} \quad (21)$$

$$CII_{Reference} = a \times DWT^{-c} = 1984 \times 67640^{-0,489} = \mathbf{8,621} \quad (22)$$

$$CII_{Required} = CII_{Reference} \times \frac{100 - Z}{100} = 8,621 \times \frac{100 - 5}{100} = \mathbf{8,19} \quad (23)$$

$$d = \frac{CII_{Attained}}{CII_{Required}} = \frac{5,837}{8,19} = \mathbf{0,713} \quad (24)$$

Tal y como se puede observar, **en los escenarios II y III el valor d es inferior al obtenido en el escenario I, por lo que el intervalo de valores también disminuye.** El valor de este parámetro es tan bajo que no entra en los rangos establecidos en la Tabla 37, lo que permite asumir que, en caso de estar en alguno de los rangos, sería en el más bajo ($d_1 < 0,284 < d_2$) y ($d_1 < 0,713 < d_2$) obteniendo así la clase A en cuanto a eficiencia energética. Esto permite deducir que, incluso si se emplearan mezclas de amoniaco de menor porcentaje, el valor d también sería bastante inferior en comparación con aquel obtenido al usar combustibles convencionales y permitiría obtener la clase A o B de eficiencia energética. En consecuencia, la utilización de combustibles alternativos no sólo reduciría las emisiones de CO₂ notablemente, sino que también permitiría mejorar la eficiencia energética del CII.

Conclusiones

Tras realizar el análisis de los cuatro combustibles expuestos en el trabajo, se ha llegado a la conclusión de que su implementación a fin de cumplir los objetivos de la OMI y de descarbonizar el transporte marítimo es viable y ya está en curso. Algunas de las tecnologías aplicadas a los combustibles ya se implementan en algunas embarcaciones, y otras están siendo estudiadas mediante experimentos y pruebas piloto, aunque todavía quedan barreras por superar para que la implementación de estos combustibles pueda sustituir a los combustibles fósiles.

Gracias a la comparación de los diferentes combustibles se puede concluir que, actualmente, **la opción más prometedora es el amoníaco**, dado que, **si se produce a partir de fuentes renovables, su uso no genera emisiones de gases contaminantes. Además, es el combustible que cuenta con mayor número de aplicaciones ya que, no sólo se puede aplicar a motores y pilas de combustible, sino que también puede funcionar como vector energético del hidrógeno.** Por otro lado, **la alternativa más viable en el corto plazo es el metanol**, ya que, a pesar de contener carbono en su molécula, **permite reducir las emisiones de NO_x, SO_x, materia particulada y CO₂. Además, cuenta con la ventaja de que ya se implementa en motores de combustión interna y su eficiencia es buena.**

El capítulo 4 permite apreciar el impacto medioambiental que tendría la implementación de combustibles alternativos en tres flotas diferentes. Este capítulo muestra la evolución de las emisiones entre los años 2018 y 2020, que disminuyen a lo largo de este período de tiempo, pero en porcentajes muy bajos. Por otro lado, al emplear mezclas de amoníaco y diésel o metanol, las emisiones totales de CO₂ de las tres flotas se ven claramente afectadas y las emisiones producidas se reducen notablemente. Esto evidencia que **la implementación de medidas que regulan el consumo de combustible permite disminuir, en porcentajes discretos, las emisiones de CO₂ pero que estas medidas deben ir acompañadas de la implementación de combustibles y tecnologías limpias y sostenibles para que el impacto en la reducción de emisiones de CO₂ sea significativa.**

Por otro lado, este capítulo también permite evidenciar **que el uso de combustibles alternativos permite un índice de intensidad de carbono inferior al obtenido cuando se emplean combustibles tradicionales**, obteniendo una clasificación de eficiencia energética mejor que al emplear combustibles de origen fósil.

- Todas las opciones que se han expuesto en el proyecto se encuentran en desarrollo para poder implementarlas en buques mercantes.
- Ya existen embarcaciones que funcionan a partir de metanol e hidrógeno, por tanto, se puede verificar que su aplicación en buques de mayores dimensiones es viable si se optimizan las tecnologías existentes.
- La densidad de energía por volumen del amoníaco, el hidrógeno y el metanol es inferior a la de los combustibles fósiles, lo que limita su uso en motores (si se emplean mezclas puras) y afecta al volumen requerido para almacenarlos.
 - o El volumen requerido para almacenar amoníaco es 3,14 veces superior al requerido para almacenar HFO.
 - o El volumen requerido para almacenar hidrógeno es 4,18 veces superior al requerido para almacenar HFO y además se requieren temperaturas criogénicas.
- Las pilas de combustible son más eficientes que los motores de combustión interna, pero al someterse a cargas elevadas, su eficiencia es menor que la de los motores.
- En el corto plazo, el combustible que mejores proyecciones tiene es el metanol, ya que cuenta con una densidad de energía por volumen mayor que el NH_3 y el H_2 , y su aplicación en motores de combustión interna ya es una realidad y ha demostrado tener una eficiencia elevada.
- En el medio plazo, la tecnología más adecuada para utilizar amoníaco son mezclas de amoníaco con diésel o gasolina, ya que permite una mejor combustión gracias al índice de cetano de la gasolina y el diésel.
- La combustión del amoníaco puede generar en emisiones de NO_x y N_2O , por lo que se deben emplear y optimizar sistemas de postratamiento para mitigar estas emisiones.
- En el largo plazo, la tecnología óptima para implementar amoníaco e hidrógeno son las pilas de combustible, pero éstas requieren una mejora en la eficiencia al someterse a cargas elevadas.
- Los biocombustibles y el metanol permiten un proceso de descarbonización, pero al poseer contenido de carbono, las emisiones de CO_2 no se eliminan.

- Los biocombustibles son una buena alternativa en el corto plazo ya que, a pesar de generar emisiones de gases contaminantes al combustionar, se obtienen a partir de recursos naturales y residuos orgánicos. Esto permite contar con las ventajas de eficiencia de los combustibles fósiles, sin generar emisiones de gases contaminantes durante su obtención.
- El gran inconveniente de los biocombustibles es su escasa disponibilidad y su alto coste.
- La producción de hidrógeno y amoniaco debe ser a partir de fuentes renovables para no generar emisiones contaminantes y eliminar la dependencia de los combustibles fósiles.
- El amoniaco es un portador de hidrógeno más eficiente volumétricamente que el propio hidrógeno y, por tanto, ofrece una posible solución práctica de carbono cero para el transporte y almacenamiento.
- El craqueo y purificación del amoniaco a bordo presenta barreras en cuanto a la cantidad de consumo energético, por lo que se debe optimizar este proceso para potenciar la posibilidad de que el amoniaco sea el vector energético del hidrógeno.
- La implementación de los combustibles estudiados cumple con los objetivos de la OMI y con el anexo VI del convenio MARPOL.

Bibliografía y referencias

Referencias

[1] CLIMÁTICO, Stop Cambio, 2017. Transporte marítimo, un gran lastre para el cambio climático. *Stop cambio climático*. [en línea] [Consulta: 14/02/2022]. Disponible en:

<https://www.stopcambioclimatico.es/2017/11/23/transporte-maritimo-gran-lastre-cambio-climatico/>

[2] AUNIÓN, Juan Antonio y PLANELLES, Manuel, 2019. El CO₂ en el cambio climático. *El país*. [en línea] [Consulta: 19/04/2022]. Disponible en: <https://elpais.com/especiales/2019/el-co2-en-el-cambio-climatico/#:~:text=1950->

[,En%20800.000%20a%C3%B1os%20la%20concentraci%C3%B3n%20de%20Di%C3%B3xido%20de%20Carbono%20en,mill%C3%B3n%20en%20solo%2070%20a%C3%B1os](https://elpais.com/especiales/2019/el-co2-en-el-cambio-climatico/#:~:text=1950-)

[3] Gobierno de España. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Edición 2022.

[Consulta: 17/04/2022]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/Inventario-GEI.aspx>

[4] Organización Marítima Internacional, 2018. El organismo marítimo de Naciones Unidas adopta una estrategia para combatir el cambio climático en el sector. *OMI*. [en línea] [Consulta: 08/03/2022]. Disponible en:

<https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx>

[5] Organización Marítima Internacional. Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL). [Consulta: 02/03/2022]. Disponible en:

[https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

- [6] Organización Marítima Internacional. Óxidos de nitrógeno (NOx) – Regla 13. **[Consulta: 07/03/2022]**. Disponible en: [https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)
- [7] Organización Marítima Internacional. Medidas de eficiencia energética. **[Consulta: 10/02/2022]**. Disponible en: <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Technical-and-Operational-Measures.aspx>
- [8] Gobierno de España. Estrategia de desarrollo sostenible 2020. **[Consulta: 02/03/2022]**. Disponible en: <https://www.agenda2030.gob.es/objetivos/home.htm>
- [9] European Maritime Safety Agency. European Maritime Transport Environmental Report 2021.
- [10] Consejo de la Unión Europea. Pacto Verde Europeo. **[Consulta: 30/03/2022]**. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>
- [11] COM (2019) 640 final. El Pacto Verde Europeo. Bruselas, 2019.
- [12] Ammonia as marine fuel. Sustainability Whitepaper. American Bureau of Shipping. 2020.
- [13] CARRO DE LORENZO, Francisco, 2022. El amoniaco como vector energético para transporte y almacenamiento de hidrógeno. **[en línea]**. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Pontificia Comillas. **[Consulta: 22/04/2022]**. Disponible en: https://www.comillas.edu/images/catedras/catedra-rafael-marino/2021-2022/20220223_Presentaci%C3%B3n_Amoniaco_Verde_TRESCA_red.pdf
- [14] Ammonia as marine fuel. Sustainability Whitepaper. American Bureau of Shipping. 2020.
- [15] ROCA, José Antonio, 2022. La noruega Scatec se asocia con ACME Group para desarrollar una instalación de amoniaco verde a gran escala en Omán. *El periódico de la energía*. **[en línea]** **[Consulta: 25/03/2022]**. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/la-noruega-scatec-se-asocia-con-acme-group-para-desarrollar-una-instalacion-de-amoniaco-verde-a-gran-escala-en-oman/#:~:text=La%20compa%C3%B1a%20noruega%20Scatec%20ha,a%20gran%20escala%20en%20Om%C3%A1n>
- [16] Maersk, 2021. Maersk backs up plan to build Europe’s largest green ammonia facility. *Maersk*. **[en línea]** **[Consulta: 31/03/2022]**. Disponible en: <https://www.maersk.com/news/articles/2021/02/23/maersk-backs-plan-to-build-europe-largest-green-ammonia-facility>

- [17] DE VRIES, Niels, 2019. Safe and effective use of ammonia as a marine fuel. Thesis. Delft: TU Delft Mechanical, Maritime and Materials Engineering.
- [18] KARABEYOGLU, Arif and EVANS, Brian 2012. Fuel Conditioning System for Ammonia-Fired Power Plants. A: 9th Annual NH₃ Fuel Association Conference. **[en línea]**. San Antonio, Texas, 2012. **[Consulta: 27/02/2022]**. Disponible en: <https://www.ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2021/01/evans-brian.pdf>
- [19] Mitsubishi Power, 2021. Mitsubishi power commences development of world's first ammonia-fired 40 MW class gas turbine system. Mitsubishi Power. **[en línea]** **[Consulta: 27/02/2022]**. Disponible en: <https://power.mhi.com/news/20210301.html>
- [20] TRONSTAD, Tomas et al. Study on the use of fuel cells in Shipping. EMSA European Maritime Safety Agency - DNV-GL. 2016.
- [21] Ammonia as a marine fuel. Group Technology and Research Whitepaper. DNV-GL. 2020
- [22] Centro Nacional del hidrógeno. El hidrógeno. **[Consulta: 07/05/2022]**. Disponible en: <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [23] SOTO, Juan Luis, 2014. ¿Cómo se obtiene el hidrógeno? El futuro del coche a pila, a examen. *El economista*. **[en línea]** **[Consulta: 27/04/2022]**. Disponible en: <https://www.economista.es/ecomotor/motor/noticias/6345560/12/14/Como-se-obtiene-el-hidrogeno-El-futuro-del-coche-de-pila-a-examen.html>
- [24] DNV. Hidrógeno. **[Consulta: 14/05/2022]**. Disponible en: <https://www.dnv.es/services/hidrogeno-180186>
- [25] Motor pasión. Motor de combustión de hidrógeno: sostenibilidad y deportividad al mismo tiempo. **[Consulta: 12/05/2022]**. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/motor-combustion-hidrogeno-sostenibilidad-deportividad-al-tiempo>
- [26] Hydrogen as marine fuel. Sustainability Whitepaper. American Bureau of Shipping. 2021.
- [27] ANAVE: Asociación Navieros Españoles. Stena Lines primera naviera en transformar un ferry para operar con metanol como combustible **[en línea]** **[Consulta: 29/04/2022]**. Disponible en: <https://anave.es/prensa/archivo-noticias/956-stena-lines-primera-naviera-en-transformar-un-ferry-para-operar-con-metanol-como-combustible>

[28] CARMEN H., Chia-wen and FELBY, Claus, 2018. Biofuels for the marine shipping sector: an overview and analysis of sector infrastructure, fuel technologies and regulations. IEA Bioenergy. **[en línea] [Consulta: 10/05/2022]** Disponible en: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/02/Marine-biofuel-report-final-Oct-2017.pdf>

[29] TRONSTAD, Tomas et al. Study on the use of fuel cells in Shipping. EMSA European Maritime Safety Agency - DNV-GL. 2016.

[30] Ammonia as marine fuel. Sustainability Whitepaper. American Bureau of Shipping. 2020.

[31] European Maritime Safety Agency (EMSA). THETIS-MRV **[en línea] [Consulta: 17/05/2022]**. Disponible en: <https://mrv.emsa.europa.eu/#public/emission-report>

Otros documentos consultados

Artículos de sociedades de clasificación y organismos internacionales

Biofuels as marine fuel. Sustainability Whitepaper. American Bureau of Shipping. 2021.

Comparison of Alternative Marine Fuels. DNV-GL. 2019.

CII (Carbon Intensity Indicator). Marine GHG Certification Department. ClassNK. 2021.

Energy Transition Outlook 2021. A global regional Forecast to 2050. DNV. 2021.

European maritime transport Environmental report 2021. European Maritime Safety Agency, EMSA. European Environment Agency. 2021.

Guide for ammonia fueled vessels. American Bureau of Shipping. 2021.

Maritime Forecast to 2050. Energy Transition Outlook 2020. DNV-GL. 2020.

Maritime Forecast to 2050. Energy Transition Outlook 2021. DNV-GL. 2021.

Methanol as marine fuel. Sustainability Whitepaper. American Bureau of Shipping. 2021.

UNCTAD. Informe sobre el transporte marítimo 2021. Conferencia de las Naciones Unidas sobre comercio y desarrollo. 2021.

Module 2: Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. IMO Train the Trainer Course. Energy Efficient Ship Operation. International Maritime Organisation, 2016. **[en línea] [Consulta: 15/03/2022]**. Disponible en:

<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/>

[M2%20Energy%20Efficiency%20Regulations%20-%20IMO%20TTT%20course%20presentation%20final1.pdf](#)

Roadmap to decarbonising European Shipping. Transport and Environment. 2018.

Estudios

ANDERSSON, Karin y MÁRQUEZ, Carlos, 2015. Methanol As A Marine Fuel Report - Prepared for Methanol Institute. FCBI Energy **[en línea]** **[Consulta: 10/05/2022]**. Disponible en:

<https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>

GEZERMAN, A. O., 2021. A Critical Assessment of Green Ammonia Production and And Ammonia Production Technologies. Toros Agri & Industry, Research & Development Center **[en línea]**

[Consulta: 28/03/2022]. Disponible en: <https://hrcak.srce.hr/en/file/392796>

LI, Jun et al., 2021. A Review on Combustion Characteristics of Ammonia as a Carbon-Free Fuel.

Frontiers in Energy Research **[en línea]** **[Consulta: 23/02/2022]**. Disponible en:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.760356/full#T1>

MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia. MAN Energy Solutions. 2020.

Master plan for CO₂ reduction in Dutch Shipping sector – Biofuels for Shipping. E4trch (UK). 2018.

Power into the future. Two-stroke marine systems. MAN Energy Solutions **[en línea]** **[Consulta:**

25/05/2022]. Disponible en: https://man-es.com/docs/default-source/marine/man-igip_brochure_052020_finale-version.pdf?sfvrsn=e1fd6baf_4

Wärtsilä 32 methanol. Wärtsilä.

Artículos y noticias

BIOENERGY INTERNATIONAL, 2020. Wärtsilä advances future combustion capabilities with first ammonia fuel tests. Bioenergy International **[en línea]** **[Consulta: 22/04/2022]**. Disponible en:

<https://bioenergyinternational.com/wartsila-advances-future-combustion-capabilities-with-first-ammonia-fuel-tests/>

CdS. Maersk respalda la creación del mayor centro de producción europeo de amoníaco verde, 2021. *Cadena de suministro* **[en línea]** **[Consulta: 28/03/2022]**. Disponible en:

<https://www.cadenadesuministro.es/noticias/maersk-respalda-la-creacion-del-mayor-centro-de-produccion-europeo-de-amoniaco-verde/>

CdS. Nuevo proyecto para construir una flota de graneleros propulsados por amoniaco, 2021.

Cadena de suministro [en línea] [Consulta: 31/03/2022]. Disponible en:

<https://www.cadenadesuministro.es/noticias/nuevo-proyecto-para-construir-una-flota-de-graneleros-propulsados-por-amoniaco/>

EIDESVIK. Eidesvik Offshore and Wärtsilä to cooperate in world's first ammonia conversion project

[en línea] [Consulta: 06/04/2022]. Disponible en: <https://eidesvik.no/eidesvik-offshore-and-wartsila-to-cooperate-in-worlds-first-ammonia-conversion-project/>

El canal marítimo y logístico, 2021. Los buques producen el 13,5% de las emisiones del transporte europeo, por detrás de los modos terrestre (71%) y aéreo (14,4%). *El canal marítimo y logístico*

[en línea] [Consulta: 31/03/2022]. Disponible en: <https://www.diarioelcanal.com/buques-producen-135-emisiones-transporte-europeo/>

HANSSON, Julia et al., 2020. The potential role of ammonia as marine fuel – based on energy systems modeling and multi-criteria decision analysis. *Sustainability*.

KYUNGHWA, Kim et al., 2020. A Preliminary Study on an Alternative Ship Propulsion System Fueled by Ammonia: Environmental and Economic Assessments. *Journal of Marine Science and Engineering*.

MARÍN, Alejandro, 2022. El hidrógeno como futuro de los combustibles en automoción. *Revista Digital del Cedex* [en línea] [Consulta: 27/04/2022]. Disponible en:

<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2460>

OLIVEIRA, Juan Antonio, 2022. El Kriti Future, el primer petrolero preparado para usar amoniaco (NH₃) como combustible. *VA DE BARCOS* [en línea] [Consulta: 07/04/2022]. Disponible en:

<https://vadebarcos.net/2022/03/08/el-kriti-future-el-primer-petrolero-preparado-para-usar-amoniaco-nh3-como-combustible/#:~:text=El%2010%20de%20enero%20pasado,la%20descarbonizaci>

SOTO, Juan Luis, 2014. ¿Cómo se obtiene el hidrógeno? El futuro del coche a pila, a examen. *El economista* [en línea] [Consulta: 27/04/2022]. Disponible en:

<https://www.eleconomista.es/ecomotor/motor/noticias/6345560/12/14/Como-se-obtiene-el-hidrogeno-El-futuro-del-coche-de-pila-a-examen.html>

Ponencias

Asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos de España (23/02/2022). *El potencial del amoníaco como combustible marino*. [Jornada]. Comisión de Transición Energética **[en línea] [Consulta: 14/03/2022]** Disponible en: <https://sectormaritimo.es/sigue-en-directo-la-jornada-el-potencial-del-amoniac-como-combustible-marino>

Sitios web

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). ToxFAQs™ – Óxidos de nitrógeno (monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, etc.) (Nitrogen Oxides) **[en línea] [Consulta: 19/04/2022]**. Disponible en:

https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html#bookmark1

ECODES. Por un transporte marítimo limpio. Hidrógeno verde y amoníaco: el futuro de los combustibles marinos **[en línea] [Consulta: 10/05/2022]**. Disponible en:

<https://ecodes.org/hacemos/cambio-climatico/incidencia-en-politicas-publicas/por-un-transporte-maritimo-limpio/hidrogeno-verde-y-amoniac-como-combustible-marino>

El H₂ y la pila de combustible **[en línea] [Consulta: 06/05/2022]**. Disponible en:

<https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/hidrogeno-pilas-de-combustible>

Enciclopedia de energía. Densidad energética. **[en línea] [Consulta: 17/02/2022]**. Disponible en:

[https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Densidad_energ%C3%A9tica#:~:text=Densidad%20energ%C3%A9tica%20volum%C3%A9trica%20%2D%20la%20cantidad,litro%20\(MJ%2FL\)](https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Densidad_energ%C3%A9tica#:~:text=Densidad%20energ%C3%A9tica%20volum%C3%A9trica%20%2D%20la%20cantidad,litro%20(MJ%2FL))

Gencat. Los gases de efecto invernadero. **[en línea] [Consulta: 26/01/2022]**. Disponible en:

https://canviclimatic.gencat.cat/es/canvi/efecte_hivernacle/

Gobierno de España. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Registro Estatal de Emisiones y Fuente Contaminantes (PRTR). SO_x (óxidos de azufre) **[en línea] [Consulta:**

19/04/2022]. Disponible en: [https://prtr-es.es/SOx-oxid-os-de-azufre,15598,11,2007.html#:~:text=Los%20C3%B3xidos%20de%20azufre%20son,\(H2SO4\)](https://prtr-es.es/SOx-oxid-os-de-azufre,15598,11,2007.html#:~:text=Los%20C3%B3xidos%20de%20azufre%20son,(H2SO4))

Informe sobre la brecha en las emisiones del 2020. ONU – programa para el medio ambiente **[en línea] [Consulta: 14/04/2022]**. Disponible en:

<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34438/EGR20ESS.pdf?sequence=35#:~>

[:text=2019.&text=mundiales%20de%20GEI%20volvieron%20a,9\)%20si%20estas%20se%20incluye](#)
[n](#)

Ingeniero marino. El buque como Fuente de Contaminación Marina **[en línea] [Consulta: 19/04/2022]**. Disponible en: <https://ingenieromarino.com/el-buque-como-fuente-de-contaminantes/>

Ingeniero marino. El convenio MARPOL 73/78 **[en línea] [Consulta: 12/03/2022]**. Disponible en: <https://ingenieromarino.com/el-convenio-marpol-7378/>

Khan Academy. Tipos de catalizadores. **[en línea] [Consulta: 16/02/2022]**. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/kinetics-ap/arrhenius-equation-mechanisms-ap/a/types-of-catalysts#:~:text=Los%20catalizadores%20heterog%C3%A9neos%20son%20catalizadores, en%20fase%20l%C3%ADquida%20o%20gaseosa.>

S&P. Partículas en suspensión: qué son, cómo nos afectan y cómo podemos reducir su presencia **[en línea] [Consulta: 19/04/2022]**. Disponible en: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/particulas-suspension/#:~:text=Las%20part%C3%ADculas%20en%20suspensi%C3%B3n%20pueden,puede%20ser%20mineral%20u%20org%C3%A1nica>

Solar Turbines. Ventajas de las turbinas de gas **[en línea] [Consulta: 24/02/2022]**. Disponible en: https://www.solarturbines.com/es_MX/products/gas-turbines.html

Vessel Finder. Rastreo de buques AIS de tráfico marino **[en línea] [Consulta: 19/05/22]**. Disponible en: <https://www.vesselfinder.com/es>

Anexo 1. Coste del proyecto

A1.1. Cronograma del proyecto

Tabla 38. Tareas del proyecto. Fuente: propia

TAREAS	Inicio	Fin	Número de horas
FASE 1	03/11/2021	18/01/2022	175
Definición de la idea	03/11/2021	05/11/2021	15
Búsqueda bibliográfica	18/11/2021	09/12/2021	60
Selección de documentos	12/12/2021	14/12/2021	18
Lectura de los documentos seleccionados	14/12/2022	07/01/2022	72
Establecimiento de objetivos	16/01/2022	18/01/2022	10
FASE 2	10/02/2022	01/06/2022	523
Redacción de la memoria del proyecto	10/02/2022	01/06/2022	374
Elaboración de la bibliografía	07/03/2022	28/05/2022	36
Comparación de las alternativas	09/05/2022	11/05/2022	12
Selección de las alternativas más viables	12/05/2022	14/05/2022	18
Búsqueda de estadísticas de emisiones de CO ₂	15/05/2022	16/05/2022	8
Análisis y selección de las estadísticas relevantes	17/05/2022	22/05/2022	30
Diseño y elaboración de las gráficas	22/05/2022	27/05/2022	26
Conclusiones	28/05/2022	31/05/2022	19
FASE 3			32
Revisión y modificaciones	01/06/2022	03/06/2022	20
Enmaquetación y diseño	03/06/2022	04/06/2022	12
TOTAL HORAS			730

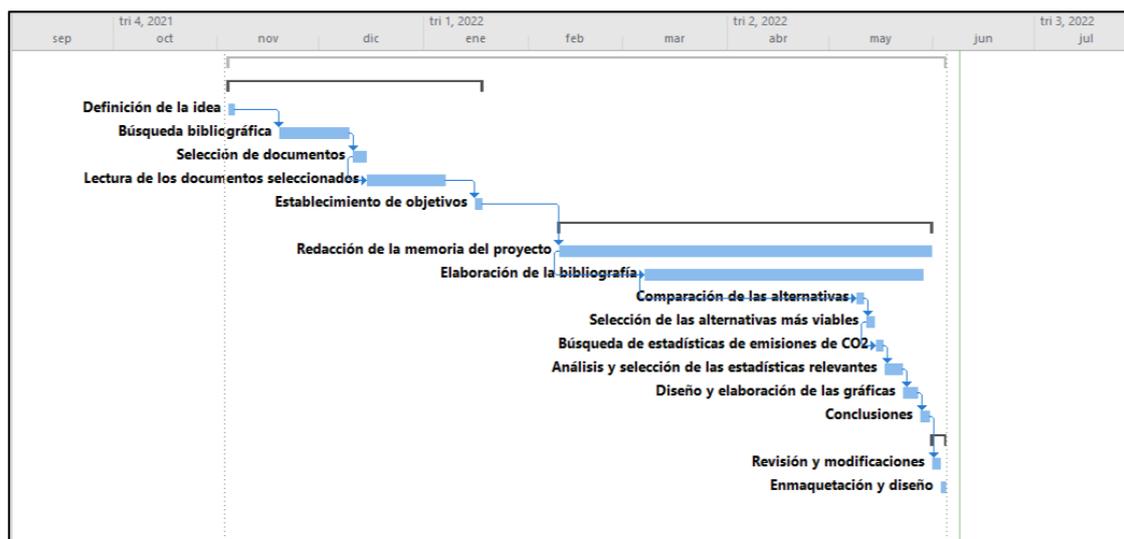


Figura 47. Diagrama de Gantt del proyecto. Fuente: propia

A1.2. Coste del proyecto

A partir de las horas invertidas en este proyecto, y estableciendo el precio de consultoría por hora para un ingeniero junior, se ha determinado el coste real del proyecto.

COSTE DEL PROYECTO	
Tiempo invertido (horas)	730
Precio	50 €
COSTE TOTAL	36.500 €

Anexo 2. Listado de abreviaciones

OMI → Organización Marítima Internacional	MARPOL → <i>Marine Pollution</i>
ECA → <i>Emission Control Areas</i>	CE → Comisión Europea
UE → Unión Europea	ONU → Organización de las Naciones Unidas
ODS → Objetivos de Desarrollo Sostenible	UNFCCC → <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
MEPC → <i>Marine Environment Protection Comimittee</i>	EMSA → <i>European Maritime Safety Agency</i>
EEDI → <i>Energy Efficiency Design Index</i>	SEEMP → <i>Ship Energy Efficiency Management</i>
EEXI → <i>Energy Efficiency eXisting Ship Index</i>	CII → <i>Carbon Intensity Indicator</i>
IAPP → <i>International Air Pollution Prevention Certificate</i>	EEOI → <i>Energy Efficiency Operational Indicator</i>
CIG → Código internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel	IGF → Código internacional de seguridad para los buques que utilicen gases u otros combustibles de bajo punto de inflamación
IEE → <i>International Energy Efficiency</i>	EEM → <i>Energy-Efficiency Measures</i>
ABS → <i>American Bureau of Shipping</i>	DNV → <i>Det Norske Veritas</i>
n → régimen nominal del motor [rpm]	GEI → Gases de efecto invernadero
CO ₂ → Dióxido de carbono	NO _x → Óxidos de nitrógeno
SO _x → Óxidos de azufre	NH ₃ → Amoniac

H ₂ → Hidrógeno	CH ₃ OH → metanol
GNL → Gas natural licuado	GLP → Gas licuado del petróleo
HVO → <i>Hydrotreated Vegetable Oil</i>	FAME → <i>Fatty Acid Methyl Ester</i>
N ₂ O → Óxido nitroso	NO ₂ → Dióxido de nitrógeno
CH ₄ → Metano	O ₃ → Ozono
CFC → Clorofluorocarbonos	HFC → Hidrofluorocarburos
HCFC → Hidroclorofluorocarburos	PFC → Perfluorocarburos
SF ₆ → Hexafluoruro de azufre	NF ₃ → Trifluoruro de nitrógeno
HNO ₃ → Ácido nítrico	SO ₃ → Trióxido de azufre
SO ₂ → Dióxido de azufre	H ₂ SO ₄ → Ácido sulfúrico
MGO → <i>Marine gasoil</i>	HFO → <i>Heavy fueloil</i>
CSS → <i>Carbon capture and storage</i>	MDO → <i>Marine Diesel Oil</i>
PEMFC → <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>	CCUS → <i>Carbon capture, utilisation and storage</i>
SCR → <i>Selected Catalytic Reduction</i>	SOFC → <i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
EGR → <i>Exhaust gas recirculation</i>	DPF → <i>Diesel Particulate Filter</i>

Anexo 3. Proceso de Haber-Bosch

El proceso de Haber-Bosch es la técnica empleada desde hace más de 100 años para la formación de amoníaco a nivel industrial. Consiste en la reacción de nitrógeno e hidrógeno gaseosos para producir amoníaco en condiciones de elevada presión (200 atm) y elevada temperatura (400-500°C). La reacción exotérmica que rige este proceso es la siguiente:



El nitrógeno que se emplea en esta reacción se obtiene directamente del aire y el hidrógeno se obtiene principalmente del gas natural o metano, que reacciona con el vapor de agua en presencia de catalizadores. La reacción natural de este proceso es muy lenta, por ello, se acelera con un catalizador de hierro (Fe^{3+}) y óxidos de aluminio (Al_2O_3) y potasio (K_2O) consiguiendo alcanzar el equilibrio con mayor rapidez. Gracias al aumento de temperatura y presión (factores de rendimiento), el equilibrio de la reacción se desplaza hacia los productos (principio de Le Châtelier), consiguiendo así un rendimiento del 10 al 20%.

Los gases que no reaccionan para la formación de amoníaco se vuelven a procesar en repetidas ocasiones, obteniendo una recuperación del 98%.

Tabla 39. Gases de efecto invernadero del proceso de Haber-Bosch. Fuente: miteco.gob.es

Gases de efecto invernadero					
CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFCs	PFCs	SF ₆
✓	NA	NA	-	-	-
OBSERVACIONES: Notation keys correspondientes al último reporte a UNFCCC					

Tabla 40. Contaminantes atmosféricos del proceso de Haber-Bosch. Fuente: miteco.gob.es

Contaminantes principales				Material particulado				Otros	Metales pesados prioritarios			Metales pesados adicionales						Contaminantes orgánicos persistentes				
NO _x	NM VOC	SO ₂	NH ₃	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP	BC	CO	Pb	Cd	Hg	As	Cr	Cu	Ni	Se	Zn	DIOX	PAH	HCB	PCB	
✓	✓	✓	✓	NA	NA	NA	NA	✓	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

OBSERVACIONES:

Notation keys correspondientes al último reporte a CLRTAP

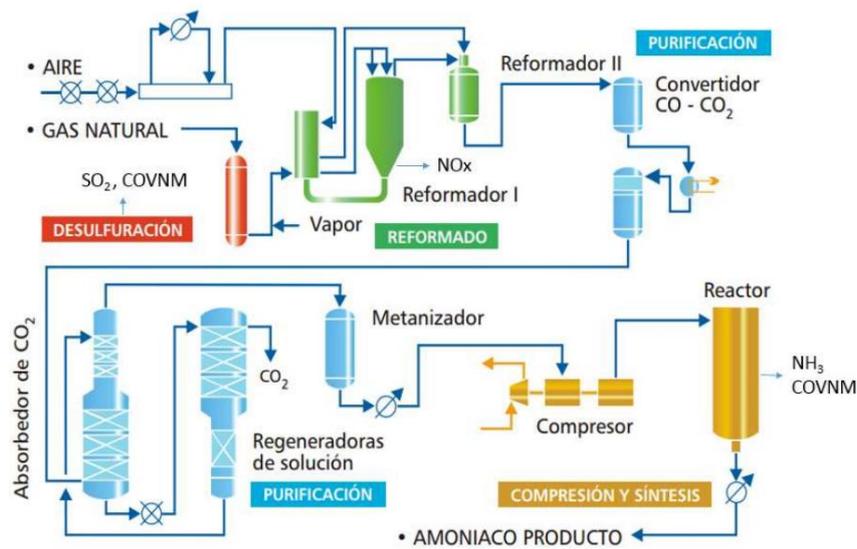


Figura 48. Proceso de Haber-Bosch. Fuente: miteco.gob.es

Anexo 4. Especificaciones de los motores

A4.1. Wärtsilä 32

Estado del motor → comercializado



Figura 49. Motor Wärtsilä 32. Fuente: Wärtsilä

Tabla 41. Datos técnicos motores Wärtsilä 32. Fuente: *Wärtsilä 32 methanol*

Datos técnicos	
Diámetro interior del cilindro	320 mm
Golpe del pistón	400 mm
Salida del cilindro	589 kW/cil
Velocidad	750 rpm
Presión media efectiva	28,9 bar
Velocidad del émbolo	10 m/s

Tabla 42. Potencia nominal motores Wärtsilä 32. Fuente: *Wärtsilä 32 methanol*

Potencia nominal	
Tipo de motor	kW
6L32	3480
7L32	4060
8L32	4640
9L32	5220
12V32	6960
16V32	9280

Tabla 43. Dimensiones y pesos motores Wärtsilä 32. Fuente: *Wärtsilä 32 methanol*

Dimensiones (mm) y pesos (toneladas)								
Tipo de motor	A*	A	B*	B	C	D	F	Peso (toneladas)
	mm							
6L32	5570	5139	2431	2295	2380	2345	1155	35
7L32	-	5745	-	2330	2380	2345	1155	38
8L32	6400	6379	2457	2375	2610	2345	1155	44
9L32	6885	6869	2455	2375	2610	2345	1155	49
12V32	7098	6865	2516	2430	2900	2120	1210	57
16V32	8041	7905	2516	2595	3325	2120	1210	71

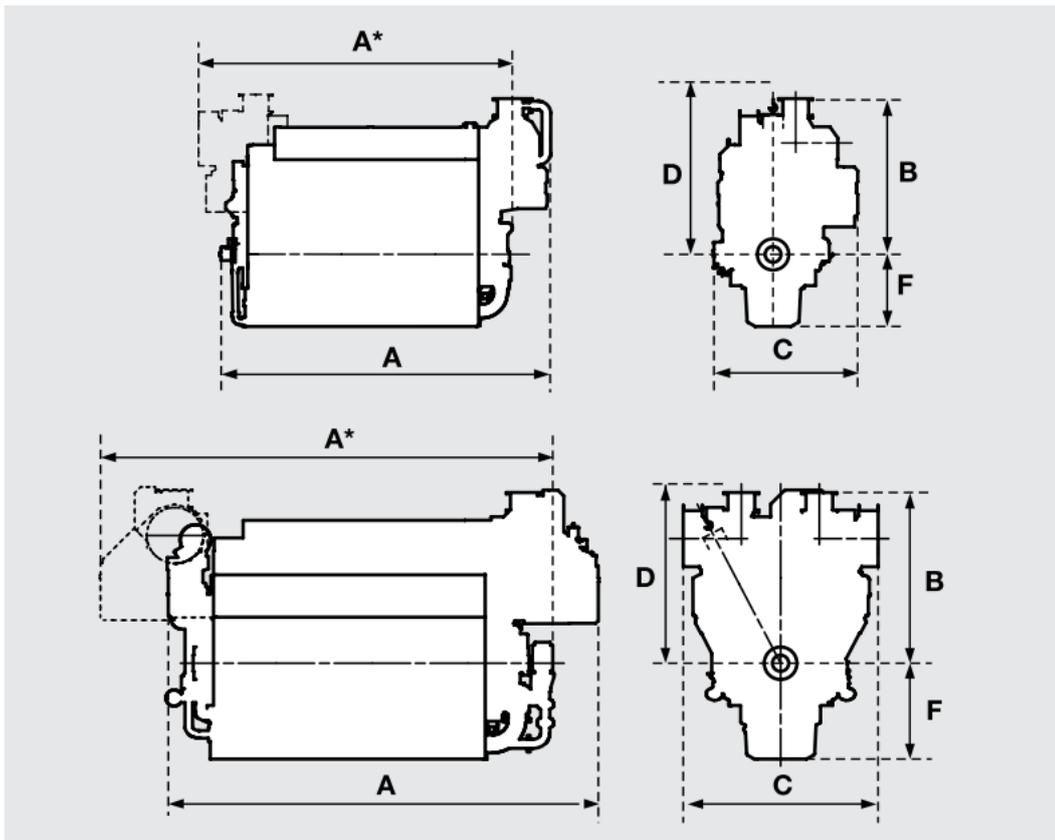


Figura 50. Plano motores Wärtsilä 32. Fuente: *Wärtsilä 32 methanol*

A4.2. Desarrollo motor MAN

Estado del motor → en desarrollo

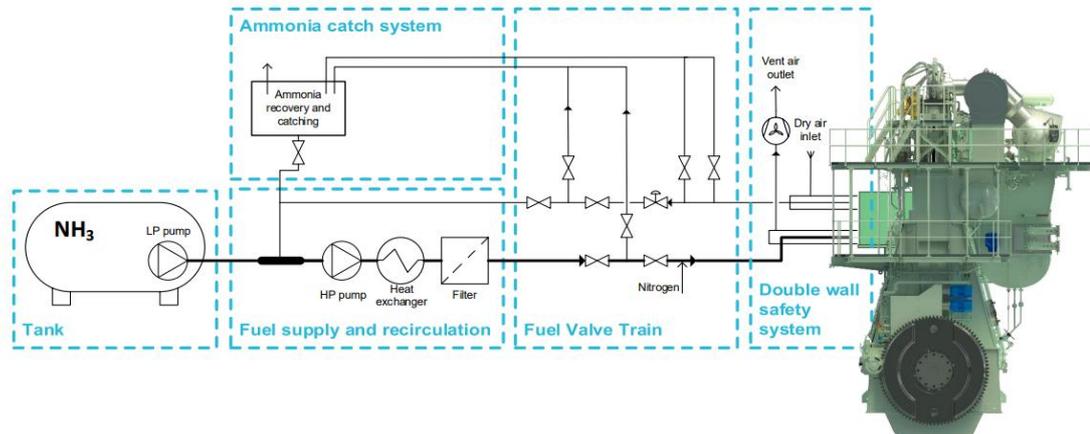


Figura 51. Sistemas auxiliares motor MAN. Fuente: *MAN B&W Ammonia fueled engine development status*

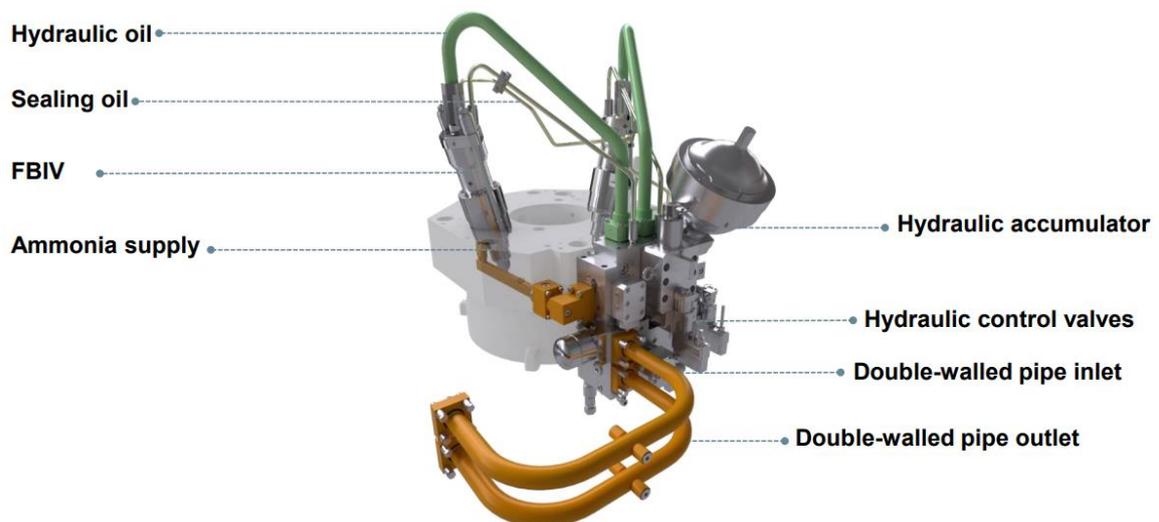


Figura 52. Sistema de inyección LGI. Fuente: *MAN B&W Ammonia fueled engine development status*

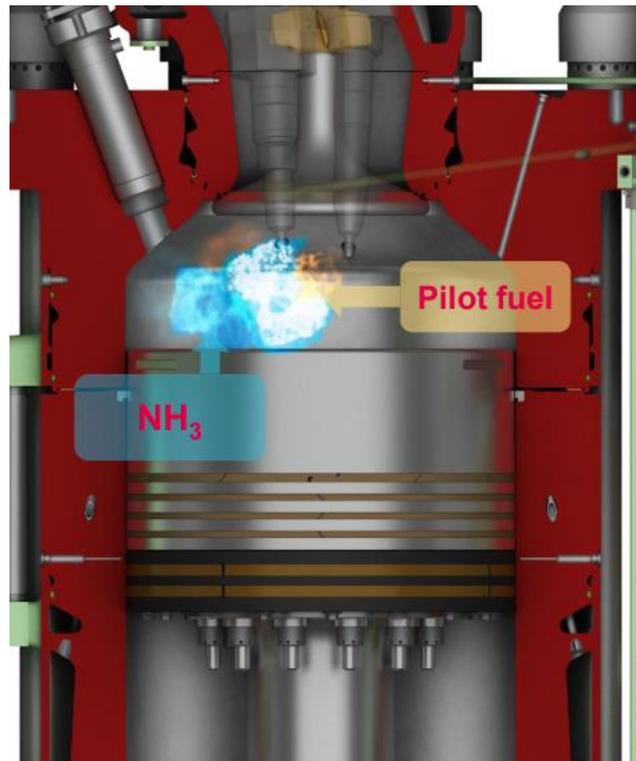


Figura 53. Principio de combustión LFI. Fuente: *MAN B&W Ammonia fueled engine development status*



Figura 54. Tubería de doble pared motor MAN. Fuente: *MAN B&W Ammonia fueled engine development status*