

COMBUSTIBLES MARINOS ALTERNATIVOS PARA REDUCIR LA HUELLA DE CO₂

Trabajo Final de Grado



Facultad de Nàutica de Barcelona

Universidad Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:

Youssef Abdelouahed Vidal

Dirigido por:

Dr. Germán De Melo Rodríguez

Grado en Tecnologías Marinas – Marine Engineer

Barcelona, fecha

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar este apartado para dar las gracias a todos aquellos profesores que han invertido su tiempo para hacer de mí el profesional que soy hoy en día. A aquellas personas más cercanas que no han dejado de luchar por mi futuro y me han acompañado en el transcurso de mi aprendizaje a lo largo de todos estos años.

Des del primer profesor que me enseñó en el instituto lo que era la ciencia hasta los responsables de leer este proyecto, el cual en parte define quien soy y que las inquietudes que tengo respecto al reto medioambiental en el que nos encontramos hoy en día.

Me gustará agradecer particularmente al señor Germán De Melo Rodríguez, mi profesor y director de este trabajo, por sus consejos, recomendaciones y por el conjunto de aprendizajes muy valiosos que he adquirido de él. Su interés por la temática aquí tratada y su proximidad como persona dispuesta a compartir su experiencia profesional conmigo, han sido claves para sentirme muy bien atendido y tener respuesta muy satisfactoria a mis dudas y consultas en todo momento.

RESUMEN

Este proyecto proporciona una descripción general de los posibles combustibles alternativos para la propulsión marina. El transporte marítimo representa más del 80% del comercio mundial en volumen y aproximadamente el 3% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, mientras que también contribuye a la contaminación del aire cerca de las zonas costeras y los puertos.

Para reducir el impacto del transporte marítimo sobre el cambio climático y el medio ambiente, es necesario adoptar una serie de medidas de eficiencia del combustible, tanto a nivel técnico como operativo, incluida la introducción de combustibles alternativos.

La introducción de combustibles alternativos supondrá una fuerte reducción de SO_x, NO_x y PM, mientras que también será posible reducir los gases de efecto invernadero, dependiendo de los tipos de combustible que se utilicen.

Los combustibles fósiles, como el GNL, tendrán una contribución limitada a la reducción de gases de efecto invernadero, mientras que los biocombustibles tienen el potencial de conducir a reducciones drásticas.

A nivel técnico, la introducción de combustibles alternativos estará acompañada de una complejidad adicional, en las áreas de infraestructura de suministro de combustible, reglas para el uso seguro de combustibles a bordo y operación de nuevos sistemas.

Se espera que varios combustibles diferentes puedan llegar a ser importantes en diferentes mercados alrededor del mundo, dependiendo de la disponibilidad local de combustibles, lo que aumentará la complejidad.

En este entorno, el papel de las sociedades de clasificación será cada vez más importante.

Palabras clave:

- GNL - Gas Natural Licuado
- PM – Material Particulado
- OMI – Organización Marítima Internacional

ABSTRACT

This Project provides an overview of possible alternative fuels for marine propulsion. Shipping represents for more than 80% of world trade by volume and about 3% of global greenhouse gas emissions, while also contributing to air pollution near coastal areas and ports.

To reduce the impact of shipping on climate change and the environment, a number of fuel efficiency measures need to be adopted, both at a technical and operational level, including the introduction of alternative fuels.

The introduction of alternative fuels will mean a strong reduction in SO_x, NO_x, and PM, while it will also be possible to reduce greenhouse gases, depending on the types of fuel used.

Fossil fuels, such as LNG, will have a limited contribution to greenhouse gas reduction, while biofuels have the potential to lead to drastic reductions.

At the technical level, the introduction of alternative fuels will be accompanied by additional complexity, in the areas of fuel supply infrastructure, rules for the safe use of on – board fuels and operation of new systems.

It is expected that several different fuels could become important in different markets around the world, depending on the local availability of fuels, which will increase the complexity.

In this environment, the role of classification societies will become increasingly important.

Key words:

- LNG – Liquefied Natural Gas
- PM – Particulate Material
- IMO – International Maritime Organization

PRÓLOGO

“Cuando estás en un agujero...”

La mayoría de los proyectos comienzan bien y con buenas intenciones. Sin embargo, en poco tiempo, uno se va desviando de este camino y te acabas viendo abrumado por todo lo que te queda por hacer, llevas muy poco progreso y oyes críticas en todas las direcciones. Una respuesta estándar a esta situación es aumentar la presión: “¡Trabaja más duro!, ¡Trabaja más rápido!, ¿Qué estás haciendo?” Esta estrategia rara vez tiene éxito y, a menudo, empeora una mala situación.

Cuando un proyecto está en problemas, aumentar el caos no ayuda. Para restaurar el orden, primero debemos reconocer que existen problemas y luego debemos retroceder para determinar la mejor manera de controlar la redacción del proyecto.

Con estos consejos, al encontrarme en estas situaciones, pude aplicarlos y poder realizar correctamente y en el plazo marcado cada uno de los puntos del presente proyecto, del cual me siento orgulloso, ya que es un reflejo de mi dedicación, esfuerzo y aprendizaje.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
PRÓLOGO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
1. Introducción	1
2. Análisis actual	2
2.1. Sostenibilidad: un compromiso de futuro	2
3. Legislación internacional, europea y nacional	4
3.1. Convenio MARPOL 73/78	4
3.2. Directiva 2005/33/CE	7
3.3. Legislación nacional	8
3.4. Anexo VI del Convenio MARPOL 73/78	10
3.5. Áreas de Control de Emisiones (ECA's)	13
3.6. Enmienda de 2008 al Anexo VI del Convenio MARPOL 73/78	17
3.7. Emisiones de dióxido de carbono (CO ₂)	18
3.8. Certificaciones ambientales	19
4. Combustibles alternativos para el transporte marítimo	21
4.1. Disponibilidad y costo de combustible	22
4.2. Desafíos y barreras	23
5. Descripción general de combustibles alternativos	24
5.1. Electrificación de buques y renovables	25
5.2. Biocombustibles	26
5.2.1. Tecnología y desarrollos futuros	27
5.3. Hidrógeno	28
5.3.1. Tecnología y desarrollos futuros	28
5.4.1. Tecnología y desarrollos futuros	29
5.5. Propulsión nuclear	30
5.5.1. Tecnología y desarrollos futuros	30

6. Gas natural licuado.....	32
6.1. Introducción y antecedentes.....	32
6.2. Factores que sustentan el GNL en el transporte marítimo	33
6.2.1. El caso medioambiental del GNL.....	34
6.2.2. El caso económico del GNL	37
6.3.3. Barreras e incertidumbres.....	39
6.3. El mercado mundial de combustibles marinos	42
6.4. ¿Qué impulsa la decisión de cambiar a GNL y en qué sectores de transporte es probable?.....	48
6.4.1. La flota actual de GNL	48
6.4.2. Factores clave que respaldan el uso de GNL.....	51
6.5. Niveles pronosticados de uso de GNL como combustible marino.....	57
6.6. Infraestructura de reabastecimiento de GNL como combustible marino	64
7.1. Incertidumbres	73
8. Visión para el futuro	77
9. Conclusiones.....	80
10. Bibliografía	83
ANEXO 1. Impacto medioambiental: Cambios de temperatura y gases de efecto invernadero	85
ANEXO 2. Amoníaco como combustible marítimo.....	95
A2.1. Proyecto ShipFC, primera prueba de fuego.....	96
ANEXO 3. Propiedades físicas y químicas de los combustibles alternativos.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Origen del Plan Ribera – Fuente: Gobierno de España	10
Figura 2. ECA’s en el mundo – Fuente: Google imágenes	16
Figura 3. Límites (Tier I, Tier II y Tier III) sobre las emisiones de NOx - Fuente: OMI	18
Figura 4. Bombona de gas – Fuente: Google imágenes	21
Figura 5. Planta de GNL – Fuente: Google imágenes	27
Figura 6. Bombonas de gas – Fuente: Google imágenes.....	31
Figura 7. Emisiones totales del ciclo del combustible por viaje utilizando salidas modeladas - Fuente: Thomson et al (2015)	36
Figura 8. Comparación del precio del combustible marino (noroeste de Europa) con los precios regionales del gas - Fuente: Argus	38
Figura 9. Diferenciales de precios del combustible marino con precios regionales del gas (el diferencial negativo significa que el gas es más barato) - Fuente: Argus.....	38
Figura 10. Consumo mundial de combustible de buques por tipo de combustible (millones de toneladas de LNGeq) - Fuente: ICCT.....	44
Figura 11. Porcentaje de consumo mundial de combustible por tipo de buque en 2015 (Basado en LNGeq de abajo hacia arriba) - Fuente: ICCT.....	47
Figura 12. Buques de GNL en uso o en construcción - Fuente: DNV, 2018.....	48
Figura 13: Buque propulsado por Gas Natural Licuado – Fuente: Google imágenes.....	49
Figura 14. Logo de Lloyd’s Register – Fuente: Google imágenes	58
Figura 15. Número de barcos alimentados con GNL que deben construirse por año para satisfacer un nivel de demanda de 20 mtpa LNGeq para 2030 para supuestos de consumo “promedio” y “alto” – Fuente: DNV	60
Figura 16. Resultados de las emisiones de GEI de WTP para combustibles alternativos marinos - Fuente: DNV	72
Figura 17. Ingeniero ensayando – Fuente: Google imágenes	72
Figura 18. Resultados de un LCA (Diagrama de araña) – Fuente: DNV	74
Figura 19: Campo de aerogeneradores – Fuente: Google imágenes	79

Figura 20. Ciclo estacional GISTEMP - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies)	88
Figura 21. MERRA-2 – Fuente: NASA.....	88
Figura 22. Estimaciones medias globales basadas en datos terrestres y oceánicos - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies	89
Figura 23. Cambio de temperatura media anual sobre la tierra y el océano - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space	89
Figura 24. Cambio de temperatura en la zona norte de los trópicos - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies	90
Figura 25. Cambio de temperatura en la zona de los trópicos - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies.....	90
Figura 26. Cambio de temperatura en la zona sur de los trópicos - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies	91
Figura 27: Cambios de temperatura en los hemisferios - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies.....	91
Figura 28. Media mensual de la temperatura media global - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies.....	92
Figura 29. Media de temperatura en los Estados Unidos - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies.....	92
Figura 30. Cambios de temperatura en la Tierra (1880-2021) – Fuente: NASA.....	93
Figura 31. Cambios de temperatura según la estación del año – Fuente: NASA	93
Figura 32. Cambios de temperatura de El Niño – Fuente: NASA	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de emisión para combustibles marinos (g/g de combustible) - Fuente: OMI (2014)	34
Tabla 2. Emisiones de GEI de WTW para diferentes combustibles. Fuente: Thinkstep (2017).....	36
Tabla 3. Consumo mundial de combustible de buques (millones de toneladas). Fuente: ICCT (2017)	43
Tabla 4. Flota naviera mundial por categoría y tonelaje para 2017. Fuente UNCTAD (2017).....	45
Tabla 5. Consumo mundial de combustible por tipo de buque en 2015 (de abajo hacia arriba) - Fuente: ICCT (Columnas 1 y 2) y cálculos del autor (Columna 3)	46
Tabla 6. Buques de GNL en uso o en construcción a 1 de mayo de 2018 - Fuente: DNV, ICCT y cálculos del autor	50
Tabla 7. Principales navieras de contenedores - Fuente: UNCTAD 2017, DHL.....	53
Tabla 8. Número de buques de GNL navegando o bajo construcción - Fuente: DNV.....	58
Tabla 9. Proyecciones de consumo de GNL en el sector marítimo (mtpa) - Fuente: IEA WEO 2017, PWC, Lloyd's Register 2017.....	59
Tabla 10. Requisito de nueva construcción de buques alimentados por GNL para cumplir con las previsiones de consumo de GNL en el sector marino para 2030 - Fuente: Cálculos del autor	61
Tabla 11. Consumo aproximado de combustible de la flota de buques cisterna de GNL - Fuente: Cálculos del autor derivados de Rogers (2018) suponiendo: 55 toneladas / día de GNL equivalente para DFDE; 115 toneladas / día de GNL equivalente para ST - 300 días de vapor / año a una velocidad media de 16,5 nudos.....	62
Tabla 12. Infraestructura de repostaje de GNL en Europa - Fuente: GIE	66
Tabla 13. Límites del sistema en los combustibles alternativas - Fuente: DNV	70
Tabla 14. Potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero considerados en este informe, en relación con el CO2 - Fuente: DNV	71

1. Introducción

Las emisiones de contaminantes atmosféricos de los buques oceánicos internacionales tienen un impacto significativamente negativo sobre la salud pública y el cambio climático global debido a las tasas de crecimiento del transporte marítimo. Por lo tanto, los fabricantes y organizaciones enfatizan la necesidad de reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos peligrosos en el transporte marítimo. Destacan la importancia de frenar la degradación de la calidad ambiental por las emisiones antropogénicas del transporte marítimo.

La Organización Marítima Internacional (OMI) establece limitaciones para hacer frente a las emisiones centrándose en los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x), dióxido de carbono (CO₂) y material particulado (PM). La participación de la OMI en las emisiones requiere la consideración de tecnologías para controlar las limitaciones.

Por tanto, el objetivo de este proyecto es *“revisar las tecnologías que se aplican en los buques y las tecnologías aún en desarrollo, con el fin de mejorar la calidad del aire y la salud humana”*. Presenta un análisis integral de las diferentes técnicas de reducción de la contaminación atmosférica en el transporte marítimo, centrándose en los aspectos técnico-operativos.

Además, el estudio ofrece una visión general de los factores positivos y negativos de diferentes tecnologías. Los resultados de esta revisión han identificado que la reducción catalítica selectiva y el aire húmedo son las técnicas más poderosas para reducir la emisión de NO_x, mientras que el lavado de gases de escape o combustibles con bajo contenido de azufre se utilizan para reducir la emisión de SO_x.

En resumen, se presenta un enfoque objetivo basado en informes y estudios sobre los contaminantes del transporte marítimo, además de analizar los pasos a seguir para frenar la degradación de la calidad del aire.

2. Análisis actual

2.1. Sostenibilidad: un compromiso de futuro

El término “sostenible” es un concepto complejo, difícil de definir. En pocas palabras, es una idea que hace referencia a un modelo de uso de los recursos naturales a disposición de la humanidad, que se esfuerza por garantizar el bienestar común y el futuro mismo, responsabilizándose de las condiciones de vidas futuras.

Este método de explotación de los recursos se basa en el respeto y compromiso con las generaciones venideras, expresado en los siguientes términos “La necesidad de promover urgentemente un cambio en los patrones de producción y consumo que sea capaz de satisfacer las necesidades de las generaciones sin comprometer la capacidad de futuro”.

La sociedad actual tiene una gran capacidad para influir en el futuro. En la actualidad, en mayor o menor medida, la mayoría de decisiones y omisiones tienen sus respectivos impactos en el futuro, permitiendo prevenir o incidir en las acciones que las generaciones posteriores podrán tomar. Por tanto, el presente es responsable del futuro no solo en cuanto a configurar el escenario por venir, sino también y, sobre todo, a la prevención para prepararse para afrontar acontecimientos futuros muchas veces imprevistos.

En las últimas décadas esta sensibilidad hacia el futuro, guiada por la conciencia no solo de la fragilidad del medio natural sino también de la fragilidad del hombre ante los cambios en el equilibrio de este último, se ha manifestado en las políticas ambientales. En este nivel, el concepto de sostenibilidad se asocia generalmente con la idea de compatibilizar la salud del medio ambiente con la salud de la población humana.

Por lo tanto, el concepto de sostenibilidad va más allá de las consideraciones sobre cuestiones muy relacionadas con el medio ambiente. El desarrollo sostenible también significa satisfacer las necesidades básicas de todos los seres humanos, así como permitir que todos tengan la oportunidad de aspirar a mejores condiciones de vida.

Teniendo en cuenta lo anterior, la sostenibilidad también significa adoptar un enfoque global del desarrollo, en el que los aspectos ambientales están estrechamente vinculados a cuestiones como el empleo, el bienestar, la calidad de vida, la tolerancia, la cohesión social y la solidaridad.

Lo que se transmite de generación en generación, además de los bienes y actividades materiales e inmateriales, también debe tenerse en cuenta las expectativas y el potencial que posee el hombre para incidir en el futuro. No sólo en términos ambientales (patrimonio natural/actividades relacionadas), sino también en términos sociales (salud, esperanza de vida, patrimonio actual e

institucional), y en términos económicos (empleo, recursos humanos y tecnológicos). Son tres pilares interdependientes y que se apoyan mutuamente.

Se trata, pues, de renunciar a un modelo de desarrollo que, como Daniel Innerarity² subraya: *“Posponer los problemas actuales no resueltos para que las generaciones futuras tengan que lidiar con ellos, cuando tales post generaciones sólo sirven para aliviar las tensiones actuales, y para ello sobrecargar e hipotecar el futuro de las generaciones venideras”*.

Otra característica del desarrollo sostenible es el deseo de conciliar los problemas globales y locales. Esto esencialmente proviene de la combinación de dos factores. En primer lugar, por el hecho de que no solo los problemas que intenta abordar este método de explotación, sino también los principios en los que se basa, son transversales; es decir, están presentes y son aplicables a todas las escalas y esferas de la actividad humana: la familia, la empresa, la ciudad, la región, el país y el planeta. En segundo lugar, de las interdependencias que aparecen entre las distintas escalas y esferas de la actividad humana.

Esta modalidad se caracteriza por un enfoque holístico, que tiene en cuenta no solo las partes individuales, sino también las interrelaciones, positivas y negativas, que pueden surgir entre ellas.

Preservar hacia el objetivo de la sostenibilidad significa utilizar los conocimientos y las habilidades para asegurar la mejora del presente, proteger el futuro y, en definitiva, salvaguardar la vida misma; es un método de producción que se alimenta de la comprensión de la realidad a partir de la cual se obtiene la retroalimentación. [1]

3. Legislación internacional, europea y nacional

3.1. Convenio MARPOL 73/78

La tendencia en la expansión del transporte marítimo, el aumento del tráfico y el número de buques en tránsito por los mares de todo el mundo ha llevado a la necesidad de reducir el impacto medioambiental de este modo de transporte. Las instituciones internacionales más importantes han emitido una serie de medidas para abordar los problemas relacionados con la sostenibilidad del transporte marítimo. La protección del medio marino se persigue a nivel internacional a través de numerosos convenios. [2]

En Londres en 1954 se estipuló la Convención sobre la Prevención de la Contaminación por Hidrocarburos (OILPOL 1954), posteriormente modificada en 1962, 1969 y 1971. La finalidad de esta convención era prohibir categóricamente el vertimiento voluntario en el mar de hidrocarburos o sus mezclas. EL Convenio OILPOL 1954 consideró el petróleo crudo, el fueloil, el diésel pesado, el aceite lubricante y las mezclas de aceite que contienen más de 100 ppm de hidrocarburos como hidrocarburos.

En el caso de los buques petroleros, OILPOL 1954 dispuso que la descarga de hidrocarburos o sus mezclas se realice más allá de las 50 millas de la costa, con la excepción de un cierto número de zonas prohibidas en las que el vertido estaba estrictamente prohibido y para los derrames de hidrocarburos ocurridos en casos extremos (por la seguridad del propio barco o de otro barco o para evitar daños en el barco o la carga o para salvar vidas). El objetivo del convenio era establecer el registro de hidrocarburos en el que debían anotarse todas las operaciones realizadas, así como las descargas en el mar, aunque fueran accidentales, y que debían ser mostradas a las autoridades de cualquier estado contratante. Se introdujeron algunas disposiciones importantes según las cuales los estados contratantes debían prever la creación de instalaciones portuarias para recibir los residuos y mezclas de hidrocarburos aún presentes en las bodegas o en los tanques de carga, sin causar demoras a los buques.

Después del desastre del petrolero *Torrey Canyon* en 1967, el cual arrojó al mar 120.000 toneladas de petróleo, era evidente la necesidad de intervenir de forma más decisiva desde el punto de vista regulatorio. De hecho, en los años siguientes se estipularon otros importantes convenios internacionales como:

- Convenios de Bruselas de 1969: Eran dos convenios. El primero sobre la intervención en alta mar en caso de accidentes que puedan causar contaminación por hidrocarburos ("*Intervención*"). El segundo sobre la responsabilidad civil por daños resultantes de la contaminación por hidrocarburos ("*Convenio de Responsabilidad Civil*" o "*CRC*").

- Convenio de Londres de 1972: Sobre la prevención de la contaminación marina causada tanto por el vertimiento de desechos como por otras sustancias nocivas clasificadas en tres grupos distintos: Lista Negra, Lista Gris y Lista Blanca.
- Convenio de Londres de 1973: Para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL 73) con el posterior protocolo, renombrado como MARPOL 73/78.
- Convención de Barcelona de 1976: Sobre la protección del Mediterráneo.
- Convención de 1982 sobre el Derecho del Mar de Montego Bay: El artículo 1 define la contaminación como “cualquier introducción directa o indirecta, por el hombre, de sustancias en el medio marino cuando estas tengan o puedan tener efectos nocivos”.
- Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible de Río de Janeiro: Se introdujo el concepto de integrar la protección del medio ambiente en las actividades humanas que utilizan el mar o afectan su calidad.

El Convenio MARPOL 73/78 tiene como objetivo específico la contaminación producida por los buques. Entró en vigor el 2 de octubre de 1983 y es uno de los convenios más importantes emitidos por la Organización Marítima Internacional (OMI). El Convenio MARPOL 73/78 fue concebido para prevenir y minimizar la contaminación del ecosistema marino por los barcos tanto por accidentes como por los procedimientos habituales de transporte de mercancías, adoptando criterios más amplios que los reportados en convenios anteriores.

De hecho, el MARPOL 73/78 no limita su interés a la contaminación por hidrocarburos (o sus mezclas), sino que también prepara regulaciones para aquellas sustancias que, de ser liberadas al medio marino, pueden poner en peligro la salud humana, dañar los recursos biológicos y la vida marina. Este convenio se componía inicialmente de 5 anexos técnicos, cada uno relacionado con diferentes formas de contaminación marina por los buques, a los que se añadió un sexto anexo con el protocolo de 1997:

- Anexo I.- Prevención de la contaminación por productos petrolíferos. Entró en vigor el 2 de octubre de 1983.
- Anexo II.- Prevención de la contaminación por sustancias líquidas nocivas a granel. Entró en vigor el 2 de octubre de 1986. Al 31 de diciembre de 2020, 148 naciones, las cuales representan al 99% del tonelaje mundial, han implementado los Anexos I y II.
- Anexo III.- Prevención de la contaminación por sustancias peligrosas en bultos y contenedores. Entró en vigor el 1 de julio de 1992. Al 31 de diciembre de 2020, 130 naciones, las cuales representan el 95% del tonelaje mundial, han implementado el Anexo III.
- Anexo IV.- Prevención de la contaminación por aguas residuales. Entró en vigor el 27 de septiembre de 2003. Al 31 de diciembre de 2020, 121 naciones, las cuales representan el 81% del tonelaje mundial, han implementado el Anexo IV.
- Anexo V.- Prevención de la contaminación por residuos. Entró en vigor el 31 de diciembre de 1988. Al 31 de diciembre de 2020, 137 naciones, las cuales representan el 97% del tonelaje mundial, han implementado el Anexo V.
- Anexo VI. - Prevención de la contaminación atmosférica. Entró en vigor el 19 de mayo de 2005.

Una nación que suscribe y se adhiere al MARPOL 73/78 debe implementar inmediatamente los Anexos I y II. Los Anexos III, IV, V y VI son voluntarios. Para que los anexos entren en vigor, deben ser transpuestos por al menos 15 países cuya flota mercante represente al menos el 50% del tonelaje bruto mundial. Este era un proceso que resultó muy lento. Hasta la fecha, todos los anexos han sido aceptados por un número suficiente de estados; el Anexo VI es el más reciente y entró en vigor en 2005. En España, el convenio fue ratificado y publicado en el Boletín Oficial del Estado: “«BOE» núm. 249, de 17 de octubre de 1984” y fue dado en Madrid el día 22 de junio de 1984 a S.M.el Rey Don Juan Carlos I por el entonces ministro de exteriores Fernando Morán López.

Todos los buques que enarbolan pabellón de países signatarios del MARPOL 73/78 están sujetos a las obligaciones impuestas por el convenio, independientemente de la zona de navegación. El país donde está registrado un buque (indicado por la bandera del estado del barco o *estado de pabellón*) es responsable de certificar el cumplimiento del buque con las normas MARPOL 73/78 para la prevención de la contaminación marina. Además, cada nación signataria es responsable de promulgar leyes que implementen el convenio y sus anexos. En Estados Unidos, por ejemplo, el acto legislativo más importante que establece el cumplimiento de MARPOL 73/78 es el “*Actuar para prevenir la contaminación de los buques*”.

Una de las principales dificultades en la implementación del MARPOL 73/78 proviene del carácter transfronterizo del transporte marítimo. Las autoridades competentes de un país visitado por el buque pueden realizar su propia inspección para verificar el cumplimiento del buque con las normas internacionales y también pueden detener el buque si no cumple con esas normas. Cuando ocurre un accidente en aguas internacionales, fuera de la jurisdicción de cualquier nación, según el MARPOL 73/78 el caso se remite al estado de pabellón del buque.

Por definición, los convenios internacionales no se aplican a las unidades navales militares, ya que las disposiciones para adaptarse a los requisitos de MARPOL 73/78 podrían limitar en cierta medida sus capacidades operativas.

3.2. Directiva 2005/33/CE

De acuerdo con las directrices internacionales, la Unión Europea ha implementado las indicaciones sustanciales del Anexo VI de MARPOL 73/78 a través de la directiva 2005/33/EC que modifica la directiva anterior 1999/32/EC en relación con el contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo. La directiva obliga a los estados miembros a: [3]

- Tomar todas las medidas necesarias para garantizar que, en sus respectivas aguasterritoriales, las zonas económicas exclusivas y las zonas de control de la contaminación incluidas en las zonas de control de las emisiones de óxidos de azufre (SO_x), no se utilizan combustibles marinos con un contenido de azufre superior al 1.5% en masa. La disposición se aplica a los buques que enarbolan cualquier pabellón, incluidos los buques originarios de fuera de la Comunidad Europea.

- Velar para que los buques de pasaje que operan servicios de línea desde o hacia cualquier puerto comunitario no utilicen combustibles marinos con un contenido de azufre superior al 1.5% en sus aguas territoriales, zonas económicas exclusivas y zonas de control de la contaminación a granel. Los estados miembros son responsables de aplicar este requisito al menos en lo que respecta a los buques que enarboleden cualquier pabellón mientras se encuentren en sus puertos.
- Garantizar que los gasóleos marinos con un contenido de azufre superior al 1.5% en masa no se comercialicen en su territorio.
- Garantizar que los buques de navegación interior y los amarrados en puertos comunitarios no utilicen combustibles marinos si su contenido de azufre es superior al 0.1% en masa.
- Garantizar que los gasóleos para uso marino no se comercialicen en su territorio si su contenido de azufre es superior al 0.1% en masa.

3.3. Legislación nacional

- Convenio sobre Trabajo Marítimo, 2006.
- Orden 10.6.83. Normas complementarias al Convenio SOLAS 74/78. Aplicación a buques de recreo y de pesca.
- R.D. 1041/97. Normas de protección en el transporte de animales vivos.
- Orden 14.7.64. Por la que se establecen las tripulaciones mínimas que deben llevar los buques mercantes y de pesca.
- R.D. 145/89. Sobre admisión, manipulación y almacenamiento de mercancías peligrosas en los puertos.
- R.D. 1253/97. Decreto que incorpora a la normativa nacional las Directivas 93/75 y siguientes, sobre condiciones de notificación de buques con mercancías peligrosas. [4]

- R.D. 1952/95. Aprobación de la Comisión para la coordinación del transporte de mercancías peligrosas.
- R.D. 230/98. Norma por la que se publica el Reglamento de Explosivos.
- Ley 60/62. Regula lo relativo a las extracciones de restos hundidos, hallazgos de material en el mar, el remolque y los auxilios y salvamento en la mar.
- Decreto 984/67. Reglamento para la aplicación de la Ley 60/62
- R.D. 393/96. Desarrollo reglamentario del servicio de practicaje.
- Orden 20.02.97. Regulación del Reglamento de capacitación profesional para el servicio de practicaje.
- R.D. 1835/83. Normas de balizamiento en las costas españolas.
- Orden 27.2.96. Regulación de la Comisión de Faros.
- Orden 14.4.88. Por la que se establece la Comisión para la investigación de los siniestros marítimos.
- R.D. 799/81. Se establece el procedimiento de autorización de trabajos científicos a buques extranjeros en aguas españolas.
- Orden 18.2.88. Regula las condiciones para el enrole en un buque de personal ajeno a la tripulación.
- Orden 31.7.92. Establece los requisitos de formación en seguridad marítima que deben cumplir las tripulaciones de buques mercantes y de pesca.
- R.D. 438/94. Regula las instalaciones de recepción de residuos oleosos procedentes de buques.

A parte de toda esta normativa, el Ministerio de Transición Ecológica ha elaborado el denominado *Plan Ribera*, el cual incluye aspectos tales como un atlas de sensibilidad de la costa española y un análisis de vulnerabilidad y riesgo de la misma, amén de las capacidades logísticas y de gestión necesarias para hacer frente a un episodio de contaminación de dimensión e intensidad significativas.

Este Plan complementa los Planes Territoriales establecidos por las Comunidades Autónomas, con el objetivo de asegurar la coordinación en las actuaciones de lucha contra la contaminación en la costa, particularmente en aquellos casos en que más de una Comunidad Autónoma se vea afectada o

cuando se requiera la intervención de medios de otros Estados, esto es, cuando el episodio de contaminación tenga carácter supra autonómico o supranacional, o en aquellos casos de especial necesidad en que el peligro de daños irreparables sea inminente.

En todo caso, los medios del Plan Ribera pueden ser movilizados a petición de la Comunidad Autónoma cuando concurren circunstancias que así lo requieran. [5]



Figura 1: Origen del Plan Ribera – Fuente: Gobierno de España

3.4. Anexo VI del Convenio MARPOL 73/78

La Organización Marítima Internacional (OMI) es la agencia especializada de las Naciones Unidas responsable de la navegación. La OMI opera a través de varios comités, incluido el Comité de Protección del Medio Marino (CPMM), que se ocupa de la prevención de la contaminación originada por los buques. En la década de 1970, el MPCC organizó el Convenio Internacional para prevenir la contaminación originada por los buques (llamado Convenio MARPOL). Este Convenio ha establecido unas medidas para limitar el vertido de petróleo, productos químicos, alcantarillado y basura en los mares y océanos del mundo. [6]

En la década de 1990, sin embargo, quedó claro que se debían abordar otros problemas y que, si la OMI no tomaba medidas, los estados individuales comenzarían a tomar medidas a nivel nacional, lo que resultaría en un mosaico de demandas diferentes y potencialmente contradictorias. Si bien muchas cuestiones, como los efectos tóxicos de las pinturas anti incrustantes y el paso de organismos

extraños en el agua de lastre, se debatieron en conferencias específicas, el control de la contaminación del aire por los buques se abordó en cambio ampliando los objetivos del primer Convenio MARPOL mediante una serie de anexos. El anexo VI, por ejemplo, se aplicó en 2005, al haber cumplido los requisitos para su activación (15 Estados signatario que representan al menos el 50% del arqueo bruto mundial).

Durante ese tiempo, se inició una revisión integral del Anexo VI con el objetivo de avanzar en las metas de reducción de emisiones y discutir aspectos particulares de los problemas originalmente abordados por el Anexo.

Este proceso de revisión se completó en 2008 e incluyó medidas de control programadas para su introducción hasta 2020 o posiblemente más tarde. El nuevo Anexo VI, adoptado como resolución MEPC 176 (58), entró en vigor el 1 de julio de 2010. Esto no debe verse como el final del proceso de desarrollo del Anexo VI, y los cambios ya sea en el fondo (como la extensión para incluir los aspectos de eficiencia energética de los buques) o en los detalles (para mejorar la claridad y evitar ambigüedad) continuarán, al igual que otros instrumentos de la OMI, para llevarse a cabo en el tiempo cuando parezca necesario.

A finales de febrero de 2012, 68 países firmaron el protocolo que introdujo el Anexo VI, que representan más del 91% del tonelaje bruto mundial. A diferencia de los Anexos I – V anteriores, que tratan temas individuales, el Anexo VI del Convenio MARPOL trata de diferentes tipos de contaminación atmosférica: emisiones de gases de escape, sustancias que agotan la capa de ozono, compuestos orgánicos volátiles e incineración. En el contexto de las emisiones de escape, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x) están sujetos a control.

Allí la formación de NO_x en el proceso de combustión depende en gran medida de los picos de temperatura que provocan la formación de óxidos de nitrógeno tanto en el aire de combustión como en el propio combustible. Por esta razón, las emisiones de NO_x según el Anexo VI, están limitadas solo para los motores diésel (que tienen temperaturas máximas relativamente altas en comparación con las calderas) controlando los componentes críticos de NO_x , por parámetros de funcionamiento o instalando dispositivos de reducción.

Por el contrario, las emisiones de SO_x son simplemente una función directa del contenido de azufre del combustible utilizado, independientemente de la naturaleza del proceso de combustión particular, y, por lo tanto, están controladas en todos los fuelóleos utilizados a bordo.

Además, el control del contenido de azufre en el fueloil también tiene un efecto directo en la reducción de la materia en partículas total (PM) resultante de la combustión. El azufre está presente de forma natural en mayor o menor medida en todos los crudos. Durante el refinado, las diversas formas en las que está presente se distribuyen de manera desigual. En consecuencia, incluso si la mayor parte del azufre tenderá a existir solo en la fracción residual, todavía puede haber niveles significativos en algunos de los destilados.

Las emisiones de SO_x y PM tienen efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente natural y construido y durante mucho tiempo han sido objeto de controles en las industrias y en el transporte terrestre. La extensión de tales controles a la navegación es un enfoque lógico para la búsqueda global de una mejor calidad del aire, especialmente dado el alto contenido de azufre de gran parte del fueloil utilizado por los barcos, en ausencia de controles.

El enfoque adoptado en el Anexo VI del Convenio MARPOL hacia las emisiones de SO_x, y por lo tanto de PM, fue limitar el contenido máximo de azufre de los fuelóleos utilizados, con estos límites sujetos a reducciones graduales, dando tiempo a la industria y a los proveedores de combustible para planificar y adaptarse al cambio.

Además, se aplican límites bajos de azufre a los fuelóleos, cada uno con su propia reducción gradual, a las áreas denominadas *Áreas de Control de Emisiones* (ECA), donde se requiere un mayor nivel de protección debido a factores como los vientos predominantes, la proximidad de rutas marítimas con mucho más tráfico a las áreas edificadas y la susceptibilidad de depósitos ácidos naturales en una zona, provocados por emisiones contaminantes que ingresan a la atmósfera y se depositan en el suelo según el denominado fenómeno de "lluvia ácida".

Una complicación es que el término "Zona de Control de Emisiones" también se aplica a las áreas donde se propondrán niveles más altos de protección de NO_x. Si bien las ECA hechas para proteger contra las emisiones de SO_x y PM pueden ser las mismas que las hechas para proteger contra las emisiones de NO_x, esto no es necesariamente cierto, y en cada caso hay diferentes aplicaciones y fechas de implementación.

Para limitar la contaminación del aire por el tráfico marítimo, el Anexo VI requiere que todo buque, de más de 400 toneladas brutas, debe estar equipado con un certificado IAPP (Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación Atmosférica) en un plazo de 3 años a partir de la entrada en vigor del Anexo VI; es decir, antes de mayo de 2008. Además, en el Anexo VI se introducen otras disposiciones, que incluyen:

- El combustible utilizado a bordo debe tener un contenido de azufre inferior al 4.5% en masa, no puede contener ácidos inorgánicos y no debe añadirse sustancias que empeoren el impacto sobre la seguridad de las personas y el medio ambiente.
- Se introduce un anexo técnico (NO_x Código Técnico) para establecer los procedimientos para la certificación de motores marinos diésel que deben cumplir con los límites de emisión de óxidos de nitrógeno (g NO_x/kWh expresados en función de la velocidad de rotación de los motores relacionados con los motores diésel con potencia superior a 130 kW construidos después del 1 de enero del 2000) enumerados en el mismo anexo.

- Están prohibidas tanto la emisión de sustancias nocivas para la capa de ozono, incluidos los gases halones y los clorofluorocarbonos (CFC), como la incineración a bordo de los buques de determinados productos, incluidos los policlorinatos de difenilo (PCB).
- Todos los buques tanque deben estar equipados con sistemas de recolección de vapores compuestos orgánicos volátiles (COV) que se utilizaran durante la carga en puertos y terminales bajo la jurisdicción de un estado que regula las emisiones de COV. El estado debe notificar a la OMI la lista de puertos y terminales identificados y para proporcionar información sobre las dimensiones del tanque y sobre la carga que debe estar sujeta al control de las emisiones de vapor. La OMI está obligada a hacer circular la lista de todos los puertos y terminales sujetos a control.

3.5. Áreas de Control de Emisiones (ECA's)

Cualquier país signatario del Anexo VI del Convenio MARPOL 73/78 que desee limitar el efecto de las emisiones del transporte marítimo en su medio ambiente puede solicitar al MEPC que designe un área como ECA, cuando esto pueda ser respaldado por una necesidad demostrable. Esta solicitud debe presentarse al MEPC de acuerdo con los procedimientos y criterios establecidos en el apéndice III del Anexo VI, junto con los datos de respaldo necesarios. Cuando dos o más partes tienen un interés común en un área en particular, las reglas estipulan que deben hacer una propuesta coordinada. [7]

Generalmente, los países deciden nombrar áreas de ECA donde existe una necesidad particular de proteger la salud humana, la biodiversidad y el medio ambiente en general de los efectos de las emisiones del transporte marítimo; más a menudo cuando hay altos niveles de actividad de navegación cerca de áreas urbanizadas, lo que afecta a la salud humana. La solicitud debe especificar si el ECA está destinado a controlar las emisiones de SO_x y PM y/o NO_x (según corresponda) de los buques, y presentar los costos y beneficios de esta operación. Las cuestiones específicas que deben abordarse se detallan en el Apéndice III, pero se pueden resumir de la siguiente manera:

- Delimitación del área de aplicación prevista.
- Descripción de las zonas terrestres o marítimas que corren riesgo de sufrir el impacto de las emisiones de los buques.
- Una evaluación de la contribución de los buques a las concentraciones de contaminación atmosférica o los impactos ambientales adversos.
- Información relevante sobre las condiciones meteorológicas en el área de aplicación prevista para poblaciones humanas y áreas de riesgo ambiental.
- La descripción del tráfico de buques en el ECA propuesto.
- Una descripción de las medidas de control adoptadas por la parte, o por las partes proponentes, con respecto a las fuentes terrestres.
- Los costos relativos de reducir las emisiones de los barcos en comparación con los controles en tierra.
- Una evaluación de los impactos económicos en los costos de envío de los buques dedicados al comercio internacional.

El tiempo necesario para crear una nueva ECA es bastante largo. El MEPC considera que la solicitud de ECA es una modificación del Anexo VI. Cuando se proporciona documentación completa y convincente, una reunión del MEPC puede ser suficiente para su revisión y aprobación; de lo contrario, la aprobación puede posponerse para una reunión posterior (aproximadamente de 6 a 8 meses después), o la solicitud también podría rechazarse.

Una vez que la enmienda haya sido aprobada en una reunión MEPC, se adoptará formalmente en la próxima. De acuerdo con la aceptación tácita de los procedimientos del Convenio MARPOL, la fecha de entrada en vigor es un mínimo de 16 meses desde su adopción.

Además, la Regulación 14.7 estipula que debe haber un retraso de 12 meses entre la entrada en vigor de la enmienda y la fecha en que se aplica (la fecha de “entrada en vigor”).

De acuerdo con lo anterior, se puede observar que habrá un período mínimo de aproximadamente 3 años entre la primera reunión del MEPC en la que se considera una solicitud y la fecha de entrada en vigor de la consiguiente enmienda al Anexo VI del Convenio MARPOL.

Las zonas de control de emisiones designadas en virtud de la regla 13 del Anexo VI del Convenio MARPOL son (Control de emisiones de NO_x):

- El área de América del Norte (regla 13.6.1 y apéndice VII del Anexo VI del MARPOL:
El área de América del Norte comprende:
 1. El área marítima ubicada frente a las costas del Pacífico de los Estados Unidos y Canadá
 2. Las áreas marítimas ubicadas frente a las costas atlánticas de los Estados Unidos, Canadá y Francia (San Pedro y Miquelón) y la costa del Golfo de México de los Estados Unidos
 3. El área marítima ubicada frente a las costas de las islas hawaianas de Hawaii, Maui, Oahu, Molokai, Niihau, Kauai, Lanai y Kahoolawe

- La zona del mar Caribe de los Estados Unidos (regla 13.6.2 y apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL).

Las zonas de control de emisiones designadas en virtud de la regla 14 del Anexo VI del Convenio MARPOL son (Control de emisiones de SO_x y PM):

- La zona del Mar Báltico (regla 14.3.1 del Anexo VI del Convenio MARPOL y regla 1.11.2 del Anexo I del Convenio MARPOL):
“La zona del Mar Báltico significa el Mar Báltico propiamente dicho con el Golfo de Bosnia, el Golfo de Finlandia y la entrada al Mar Báltico delimitada por el paralelo de Skaw en Skagerrak a 57º 44,8’ N”.

- La zona del Mar del Norte (regla 14.3.1 del Anexo VI del Convenio MARPOL y regla 1.14.6 del Anexo V del Convenio MARPOL):
“La zona del Mar del norte significa el Mar del Norte propiamente dicho, incluidos los mares en el mismo con el límite entre:

1. El Mar del Norte al sur de la latitud 62º N y al este de la longitud 4º O
 2. El Skagerrak, cuyo límite sur está determinado al este del Skaw por la latitud 57º 44,8' N.
 3. El Canal de la Mancha y sus accesos al este de longitud 5º W y al norte de la latitud 48º 30' N.
- El área de América del Norte (regla 14.3.2 y apéndice VII del Anexo VI del MARPOL):
El área de América del Norte comprende:
1. El área marítima ubicada frente a las costas del Pacífico de los Estados Unidos y Canadá.
 2. Las áreas marítimas ubicadas frente a las costas atlánticas de los Estados Unidos, Canadá y Francia (San Pedro y Miquelón) y la costa del Golfo de México de los Estados Unidos.
 3. El área marítima ubicada frente a las costas de las islas hawaianas de Hawaii, Maui, Oahu, Molokai, Niihau, Kauai, Lanai y Kahoolawe
- La zona del mar Caribe de los Estados Unidos (regla 14.3.3 y apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL).



Figura 2. ECA's en el mundo – Fuente: Google imágenes

3.6. Enmienda de 2008 al Anexo VI del Convenio MARPOL

73/78

En octubre de 2008, durante el MEPC 58, la OMI aprobó algunas enmiendas al Anexo VI del Convenio MARPOL 73/78 con el objeto de reducir aún más las emisiones de SO_x y NO_x debido al transporte marítimo. [6]

Se pronosticó por primera vez una disminución progresiva en el contenido de óxidos de azufre en el combustible utilizado por los barcos de 4.5% a 3.5% a partir del 1 de enero de 2012, para luego llegar a 0,5% a partir del 1 de enero de 2020. Además, el contenido máximo de azufre permitido en las áreas ECA se redujo al 1,5% al principio, al 1% desde el 1 de marzo del 2010 y al 0.1% a partir del 1 de enero de 2015.

También se aprobó la reducción gradual de las emisiones de óxidos de nitrógeno de los motores marinos diesel instalados a bordo de buques construidos después del 1 de enero de 2011. Las normas para el NO_x se informan comúnmente como Tier I, II y III dependiendo de la fecha de construcción del barco y varían según la velocidad máxima alcanzada por el motor (revoluciones por minuto o rpm) como se muestra en la figura 6. Los motores Tier II (para buques construidos después del 1 de enero de 2011) tendrán que cumplir con una nueva curva de valor límite, reducida en aproximadamente un 20% en comparación con Tier I (para motores instalados en buques construidos después del 2000 y antes del 1 de enero de 2011).

Los límites de Tier I y Tier II son válidos a nivel mundial, mientras que el límite de Tier III solo se aplica a las Áreas de Control de Emisiones (ECA) donde los nuevos motores diesel instalados a bordo de buques construidos después del 1 de enero de 2016, deberán reducir sus emisiones en aproximadamente un 80% en comparación con el Tier I.

A menudo, los límites de las emisiones de NO_x se informan como IMO I, IMO II e IMO III. Es interesante informar que el límite Tier III para velocidades superiores a 1000 rpm es similar al valor impuesto por la directiva 1996/96/EC sobre emisiones de NO_x de vehículos comerciales pesados (2 g/kWh) que entran en la categoría Euro V en vigor desde el 1 de octubre de 2009.

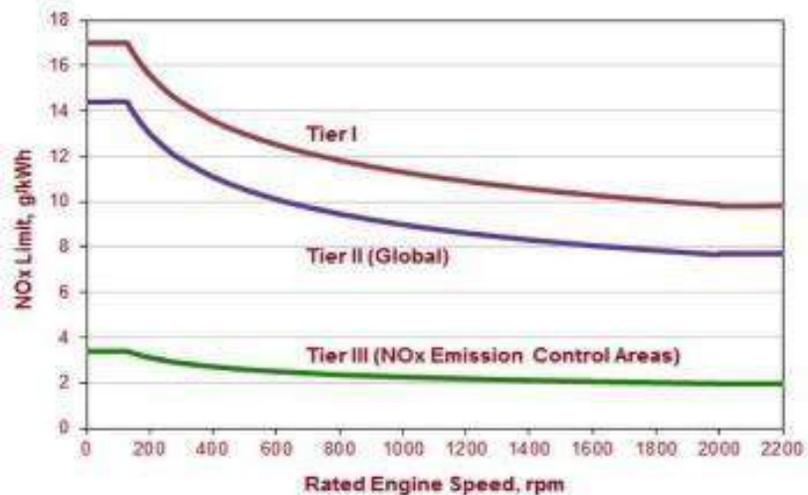


Figura 3. Límites (Tier I, Tier II y Tier III) sobre las emisiones de NOx - Fuente: OMI

La enmienda introduce cambios en las reglas sobre la contención de emisiones de COV (Compuestos orgánicos volátiles). En particular, todos los buques petroleros deben tener e implementar un Plan de Gestión de Emisiones de COV que contenga procedimientos escritos para minimizar las emisiones durante las fases de carga, descarga y navegación y una persona responsable de la implementación del Plan.

3.7. Emisiones de dióxido de carbono (CO₂)

El Anexo VI no tiene en cuenta las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la navegación marítima. [8]

En el año 2000, un estudio de un grupo de trabajo de la OMI sobre la influencia de los gases de efecto invernadero sobre el cambio climático, estableció que en el año 1996 los buques contribuyeron con alrededor del 1.8% de la producción mundial de CO₂. Estos datos se calcularon a partir de datos de tráfico y consumo de combustible de todo el mundo y se actualizaron en MEPC 58, que especificaba que las emisiones de CO₂ estimadas ascendieron a 843 millones de toneladas en 2007, equivalentes al 2,7% de las emisiones mundiales. Se han planteado dos escenarios para los cuales, en ausencia de medidas correctivas, se espera que las emisiones aumenten en un factor de 1.1 – 1.3% en 2025 y 2.4 – 3% en 2050.

Ya en el MEPC 53 se aprobaron las directrices para la aplicación voluntaria de dos índices de CO₂, un índice de “diseño de CO₂” y un índice provisional de “CO₂ operativo”. El índice de “diseño de CO₂” es

un factor indicativo de la eficiencia energética del combustible en la fase de diseño del barco que le permite comparar buques de diferentes tipos entre sí. Es un índice que depende fuertemente del tipo de combustible que se utilice, la presencia en el buque de sistemas de recuperación del calor producido por la combustión del combustible, etc.

El “CO₂ Operacional” es la relación entre las emisiones de CO₂ de un buque y su trabajo de transporte. Las emisiones se calculan a partir del consumo de combustible (incluidos los viajes en lastre y las escalas en puerto) y los factores de emisión correspondientes, mientras que el trabajo de transporte se determina multiplicando la carga (masa en toneladas, número de contenedores, coches, etc.) del buque por la distancia que viajó para el transporte de la carga en sí.

El índice sirve fundamentalmente para calcular las emisiones específicas de un buque (es decir, emisiones normalizadas por unidad de carga y distancia recorrida) y, por lo tanto, para dar una idea de la eficiencia del transporte de mercancías. El índice provisional ha sido ampliamente utilizado por los estados y las organizaciones industriales para determinar la eficiencia del transporte de mercancías.

3.8. Certificaciones ambientales

El concepto de desarrollo sostenible se está consolidando progresivamente como una estrategia a seguir para alcanzar altos niveles de competitividad en lugar de un costo adicional en el que incurrir. La protección del medio ambiente se ha convertido en una parte concreta de las políticas de la empresa; muchas empresas en todo el mundo tienen una estrategia ambiental basada en combinar las necesidades del desarrollo económico con la protección del medio ambiente. [8]

De hecho, el concepto de desarrollo sostenible se está extendiendo progresivamente como una estrategia a seguir para alcanzar altos niveles de competitividad en lugar de un costo adicional en el que incurrir. Los problemas ambientales son cada vez más objeto de la atención de quienes toman las decisiones políticas, por lo tanto, la falta de una estrategia ambiental, inevitablemente produce costos y gastos que podrían evitarse y administrarse en lugar de sufrir pasivamente.

La conciencia de la importancia de contar con un Sistema de Gestión Ambiental (SGA), capaz de identificar, evaluar y monitorear los aspectos ambientales que son gestionados directa o indirectamente por una organización, también se está extendiendo entre las Autoridades Portuarias nacionales que están impulsando iniciativas para adquirir una certificación ambiental.

Entre las normas y reglamentos más extendidos, es necesario mencionar, a nivel internacional, la “Organización Internacional de Normalización” (ISO) 14001 y, a nivel europeo, el “Plan de Auditoría y Gestión Ecológica” (EMAS).

ISO 14001 y EMAS no presentan diferencias sustanciales en la metodología de aplicación, salvo dos aspectos principales:

- La redacción de la declaración medioambiental es obligatoria para EMAS y opcional para ISO 14001.
- El análisis medioambiental inicial es obligatorio para EMAS y recomendado, pero no obligatorio, para ISO 14001.

La certificación según ISO 14001 o EMAS no es obligatoria, pero es una elección voluntaria de una organización que decide poner en práctica su propio sistema de gestión medioambiental. Contar con un sistema de gestión ambiental válido implica, entre otras cosas, el compromiso de la organización de controlar los impactos de sus actividades sobre el medio ambiente en cumplimiento de la ley y de perseguir la mejora constante.

Otro sistema de gestión ambiental desarrollado específicamente para puertos es el “Sistema Portuario de Revisión Ambiental” (PERS). El sistema fue desarrollado como parte del trabajo del proyecto europeo “Ecopuertos” (2002 – 2005) en el que participaron un número considerable de puertos europeos y algunas universidades e institutos de investigación; el sistema se basa en la experiencia de “Método de Autodiagnóstico” (SDM), un método de autoevaluación ambiental desarrollado dentro del mismo proyecto.

El PERS es una herramienta sencilla y eficaz que puede constituir, entre otras cosas, un punto de partida avanzado para el acceso posterior a certificaciones medioambientales ISO 14001 y/o EMAS. De hecho, define un estándar básico de buenas prácticas de gestión ambiental en el puerto que ofrece la posibilidad a los afiliados de la Fundación “Ecopuertos” a obtener una certificación de calidad ambiental del “Registro de Lloyd” holandés.

Más allá de la aplicación de la legislación, la atención de los puertos a los problemas ambientales surge de las iniciativas puestas en marcha voluntariamente por Autoridades Portuarias individuales.

4. Combustibles alternativos para el transporte marítimo

En este apartado se proporciona una descripción general de los posibles combustibles alternativos para la propulsión marina. El transporte marítimo representa más del 80% del comercio mundial en volumen y aproximadamente el 3% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, mientras que también contribuye a la contaminación del aire cerca de las zonas costeras y los puertos. [9]

Para reducir el impacto del transporte marítimo sobre el cambio climático y el medio ambiente, es necesario adoptar una serie de medidas de eficiencia del combustible, tanto a nivel técnico como operativo, incluida la introducción de combustibles alternativos. El efecto inmediato de la introducción de combustibles alternativos supondrá una fuerte reducción de las emisiones de SO_x , NO_x y PM (como ha sido explicado anteriormente), mientras que también será posible reducir los gases de efecto invernadero, dependiendo de los tipos de combustible que se utilicen.

Los combustibles fósiles, como el GNL, tendrán una contribución limitada a la reducción de gases de efecto invernadero, mientras que los biocombustibles tienen el potencial de conducir a reducciones drásticas. A nivel técnico, la introducción de combustibles alternativos estará acompañada de una complejidad adicional, en las áreas de infraestructura de suministro de combustible, reglas para el uso seguro de combustibles a bordo y operación de nuevos sistemas.

Se espera que varios combustibles diferentes puedan llegar a ser importantes en diferentes mercados alrededor del mundo, dependiendo de la disponibilidad local de combustibles, lo que aumentaría la complejidad. En este entorno, el papel de las sociedades de clasificación será cada vez más importante para garantizar la manipulación segura de los combustibles en el transporte marítimo.



Figura 4. Bombona de gas – Fuente: Google imágenes

4.1. Disponibilidad y costo de combustible

Las estimaciones de las reservas futuras de petróleo varían según la fuente que sea consultada, pero cada año son más escasas. Los métodos avanzados de extracción de petróleo comienzan a ser económicamente viables, debido a los altos precios del petróleo en los últimos años. [9]

El uso de recursos no convencionales como el petróleo de esquisto y las arenas bituminosas, está ganando terreno, mientras que en el futuro puede haber una mayor presión para expandir las actividades de petróleo y gas en el Ártico. En los Estados Unidos, la producción de petróleo de esquisto de los últimos años ha remodelado el modelo energético de América del Norte. A pesar del potencial del Ártico para la producción futura de petróleo y gas, no está claro cuánto podría aumentar la producción mundial en el futuro.

Esto se debe principalmente a los altos costos y las difíciles condiciones incluso con una reducción del hielo marino. Las posibles consecuencias de un accidente en el Ártico también podrían ser muy graves. Es difícil obtener información precisa sobre la ubicación y cantidad de las reservas mundiales de petróleo, porque muchas naciones productoras de petróleo a menudo hacen afirmaciones públicas que no pueden verificarse fácilmente.

Además, a menudo depende en gran medida del suministro de petróleo en regiones potencialmente inestables desde el punto de vista político, lo que puede tener un efecto adverso en la seguridad del combustible. Para algunos países, este es un motor importante para el desarrollo de tecnología para la explotación de recursos locales no convencionales, como el petróleo y el gas de esquisto en EE.UU., y para intervenir en el desarrollo de biocombustibles como el etanol en Brasil y el biodiesel en Europa.

4.2. Desafíos y barreras

Hasta ahora, la industria del transporte marítimo no ha actuado de manera decisiva para realizar su potencial para reducir las emisiones a través de la energía baja en carbono. Para algunos propietarios, encontrar capital para financiar tecnologías comprobadas de ahorro de combustible puede ser un desafío, incluso para tecnologías que se amortizan en cuestión de años. Al introducir un nuevo combustible, es posible que los buques existentes deban reacondicionarse debido a la incompatibilidad de la maquinaria. Esto hace que los cambios sean una inversión a largo plazo. [9]

Para los pioneros, propietarios que se arriesgan a invertir en soluciones de nuevas tecnologías, los problemas técnicos imprevistos a menudo resultan en retrasos importantes que requieren capital adicional.

Al mismo tiempo, el fletador paga los costos del combustible para ciertos segmentos de envío, lo que elimina los incentivos para que los propietarios exploren combustibles alternativos o incluso medidas de eficiencia del combustible. Las regulaciones de retazos, impuestas por diferentes organismos gubernamentales, y la falta de estándares, también han ralentizado las acciones coordinadas.

La falta de infraestructura adecuada, como las instalaciones de abastecimiento de combustible y la incertidumbre con respecto a la disponibilidad de combustible a largo plazo son barreras adicionales para la introducción de cualquier combustible nuevo. Es decir, los propietarios no comenzarán a usar nuevos combustibles si no hay infraestructura disponible y los proveedores de energía no financiarán una infraestructura costosa sin primero asegurar a los clientes.

Romper este punto muerto requerirá un esfuerzo coordinado de toda la industria y la voluntad política para invertir en el desarrollo de nueva infraestructura. Las regulaciones de mosaico, aplicadas por diferentes organismos gubernamentales, y la falta de estándares, también han ralentizado la acción coordinada.

5. Descripción general de combustibles alternativos

A día de hoy, se están estudiando una serie de combustibles alternativos o portadores de energía que ya se utilizan o podrían utilizarse potencialmente en el transporte marítimo en el futuro. Estos combustibles son: [9]

- Gas natural licuado (GNL)
- Gas licuado de petróleo (LPG)
- Metanol y etanol
- Éter di-metílico (DME)
- Combustibles sintéticos
- Biodiesel
- Biogás
- Uso de electricidad para cargar pilas y planchado en frío
- Hidrógeno
- Combustible nuclear
- Amoníaco

Para cada uno de estos combustibles se ha recopilado la siguiente información con el fin de mejorar la comprensión de estos combustibles y su impacto potencial en el futuro (el GNL dispone de un apartado propio, debido a que es el más usado). El amoníaco está explicado en el Anexo 2 de este proyecto.

- Características físicas y químicas
- Producción, disponibilidad y costo: Información sobre los métodos de producción, los volúmenes y precios de producción actuales, la infraestructura y el pronóstico futuro, cuando esté disponible.
- Aplicaciones y estado actual: Aplicaciones en el sector marítimo y en otros sectores. Descripción general de la tecnología, incluidos motores y tanques de almacenamiento.
- Consideraciones de seguridad
- Emisiones y consideraciones ambientales.

Si bien la energía renovable (solar, eólica) puede tener cierto potencial para mitigar las emisiones de carbono, no se considera una alternativa viable para el transporte comercial. Ciertamente, las embarcaciones equipadas con velas, cometas de viento o paneles solares pueden completar los sistemas de generación de energía existentes, pero la relativa falta de confiabilidad de estas fuentes de energía las hace inadecuadas para el transporte en alta mar o para operaciones en algunas latitudes con condiciones climáticas estacionales.

Asimismo, la energía nucleoelectrica también sigue siendo problemática. Si bien es una solución probada que no produce GEI, los riesgos percibidos se consideran demasiado altos para que la energía nucleoelectrica se considere una alternativa viable para los buques.

Durante las próximas cuatro décadas, es probable que la contaminación energética se caracterice por un alto grado de diversificación. El GNL tiene el potencial de convertirse en el combustible de elección para todos los segmentos de transporte, siempre que la infraestructura esté en su lugar, mientras que los biocombustibles líquidos también podrían reemplazar gradualmente a los combustibles a base de petróleo.

Lo más probable es que la electricidad de la red se utilice cada vez más para cargar baterías para las operaciones de los buques en los puertos, pero también para la propulsión. La electricidad renovable también podría usarse para producir hidrógeno, que a su vez se puede usar para alimentar celdas de combustible, proporcionando energía auxiliar o de propulsión.

Si se requiere una reducción drástica de las emisiones de GEI y no se dispone de combustibles alternativos adecuados, los sistemas de captura de carbono podrían proporcionar una solución radical para una reducción sustancial de CO₂.

En los sub-apartados siguientes se presentan brevemente los combustibles que probablemente serán parte de la combinación energética futura para el transporte marítimo.

5.2. Electrificación de buques y renovables

Los desarrollos recientes en la electrificación de los buques son una promesa significativa para un uso más eficiente de la energía. Se puede aprovechar la producción de energía renovable para producir electricidad, para propulsar los buques atracados (planchado en frío), y para cargar baterías para buques totalmente eléctricos e híbridos. [9]

Mejorar el papel de la electricidad en los buques contribuirá a mejorar la gestión energética y la eficiencia del combustible en los buques más grandes. Por ejemplo, el cambio de redes de CA a CC a bordo permitirá que los motores funcionen a velocidades variables, lo que ayudaría a reducir las pérdidas de energía y reducción de ruido y vibraciones. Si la energía renovable del Sol o el viento no están disponibles para la producción de electricidad en tierra, se pueden utilizar plantas de energía convencionales.

En este caso, se seguirán emitiendo gases de efecto invernadero y otros contaminantes, pero se pueden reducir mediante sistemas de limpieza de gases de escape o captura y almacenamiento de

carbón. Alternativamente, la energía nuclear en tierra podría utilizarse para la producción de electricidad libre de emisiones, que se utilizará para cargar baterías a bordo.

Los dispositivos de almacenamiento de energía son fundamentales para el uso de electricidad para la propulsión de buques, mientras que también son importantes para optimizar el uso de energía a bordo en buques híbridos.

Actualmente hay varias tecnologías de almacenamiento de energía disponibles. Ya se están diseñando sistemas de propulsión alimentados por baterías para buques más pequeños, mientras que, para los buques más grandes, los fabricantes de motores se centran en soluciones de baterías híbridas. Los desafíos relacionados con la seguridad, la disponibilidad de los materiales utilizados y la vida útil deben abordarse para garantizar que los buques impulsados por baterías sean competitivos con los convencionales, pero el ritmo de la tecnología avanza rápidamente.

Otras tecnologías de almacenamiento de energía que pueden encontrar aplicación en el transporte marítimo en el futuro incluyen volantes, supercondensadores y dispositivos de almacenamiento de energía térmica. [9]

La electrificación ha generado un gran interés, especialmente para los tipos de buques con frecuentes variaciones de carga. Se debe esperar un crecimiento significativo de los buques híbridos, como los remolcadores portuarios, los buques de servicio en alta mar y los transbordadores después del año 2025, y se pueden aplicar más aplicaciones de tecnología a las grúas eléctricas para graneleros o incluso en los puertos.

Después de 2030, las mejoras en tecnología de almacenamiento de energía permitirán cierto grado de hibridación para la mayoría de los buques. Para embarcaciones grandes de aguas profundas, la arquitectura híbrida se utilizará para alimentar sistemas auxiliares, maniobras y operaciones portuarias, para reducir las emisiones locales cuando se encuentren en áreas pobladas.

5.3. Biocombustibles

Los biocombustibles pueden derivarse de tres fuentes primarias: cultivos comestibles, cultivos no comestibles (desechos o cultivos cosechados en tierras marginales) y algas, que pueden crecer en el agua y no compiten con la producción de alimentos. Además de tener el potencial para contribuir a una reducción sustancial de las emisiones de GEI, los biocombustibles derivados de plantas u organismos también se biodegradan rápidamente, lo que representa un riesgo mucho menor para el medio marino en caso de derrame.

Los biocombustibles también son flexibles: se pueden mezclar con combustibles fósiles convencionales para alimentar motores de combustión interna convencionales, mientras que el biogás producido a partir de residuos se puede utilizar para reemplazar el GNL. [9]

5.2.1. Tecnología y desarrollos futuros

Los biocombustibles derivados de los desechos tienen muchos beneficios, pero asegurar el volumen de producción necesario es un desafío. La tierra requerida para la producción de 300 millones de toneladas de biodiesel equivalente en petróleo (TOE) basado en la tecnología actual (biocombustibles de primera y segunda generación) es un poco más grande que el 5% de la tierra agrícola actual en el mundo.

Los biocombustibles a base de algas parecen ser los más eficientes y el proceso tiene el beneficio adicional de consumir cantidades significativas de CO₂, pero es necesario trabajar más para identificar las cepas de algas que serían adecuadas para una producción eficiente a gran escala. También deben abordarse las preocupaciones relacionadas con la estabilidad del almacenamiento a largo plazo de los biocombustibles a bordo de los buques y los problemas con la corrosión.

La experimentación con biocombustibles ya ha comenzado en grandes buques y los resultados preliminares son alentadores. Sin embargo, los avances en el desarrollo de biocombustibles de residuos o algas dependerán del precio del petróleo y el gas.

Como resultado, los biocombustibles tendrán una penetración limitada en el mercado de combustibles marinos en la próxima década. Sin embargo, para 2030, se prevé que los biocombustibles desempeñen un papel más importante, siempre que se puedan producir cantidades significativas de manera sostenible y a un precio atractivo. [9]

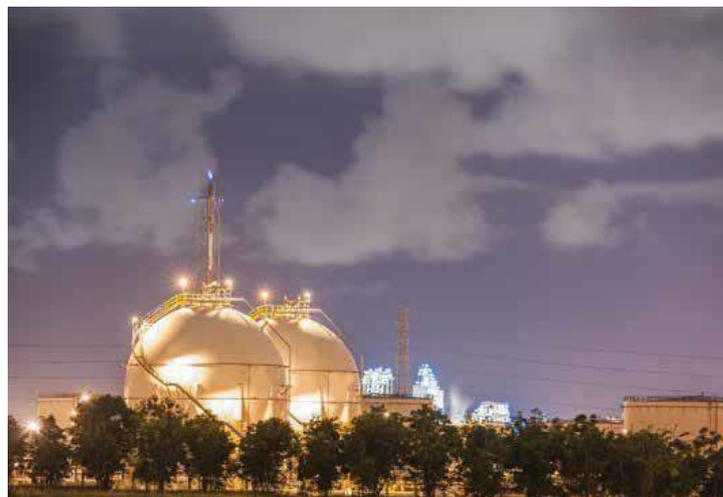


Figura 5. Planta de GNL – Fuente: Google imágenes

5.4. Hidrógeno

Se puede emplear electricidad renovable para producir hidrógeno, que se puede utilizar para alimentar pilas de combustible a bordo de los buques. Esta solución también ayudará a hacer frente a los desafíos asociados con la naturaleza intermitente de muchas fuentes de energía renovable. El hidrógeno es la más pequeña y liviana de todas las moléculas de gas, por lo que ofrece la mejor relación de almacenamiento de energía a peso de todos los combustibles.

Sin embargo, el hidrógeno como combustible puede ser difícil y costoso de producir, transportar y almacenar. El hidrógeno comprimido tiene una densidad de energía muy baja por volumen que requiere de seis a siete veces más espacio que el HFO. [9]

El hidrógeno líquido por otro lado, requiere almacenamiento criogénico a muy bajas temperaturas (-253 °C o 20 K), asociado a grandes pérdidas de energía, y muy a los sistemas de baterías híbridas y tanques de combustible bien aislados.

5.3.1. Tecnología y desarrollos futuros.

Las pilas de combustible son los dispositivos más utilizados para convertir la energía química del hidrógeno en electricidad. Cuando se dispone de un reformador de combustible, se pueden utilizar otros combustibles, como gas natural o metanol, para alimentar una pila de combustible.

Aunque las experiencias operativas han demostrado que la tecnología de pilas de combustible puede funcionar bien en un entorno marítimo, es necesaria más I + D antes de que las pilas de combustible puedan utilizarse para complementar las tecnologías de propulsión existentes para los buques.

Los desafíos incluyen altos costos de inversión, las dimensiones y el peso de las instalaciones de celdas de combustible y su vida útil esperada. Debe prestarse especial atención al almacenamiento de hidrógeno a bordo de los buques para garantizar operaciones seguras.

Se requieren importantes mejoras en la tecnología, acompañadas de reducciones de costos, para que las pilas de combustible sean competitivas para los buques. Con la reciente comercialización de ciertas aplicaciones de celdas de combustible terrestres, hay razones para creer que los costos bajarán.

Para las aplicaciones de buques, las reducciones de tamaño y peso son de inmensa importancia, mientras que la respuesta a cargas transitorias también sigue siendo un gran problema. Las pilas de combustible pueden convertirse en parte de la futura producción de energía en los buques, y en un futuro cercano podría ser posible ver aplicaciones de nicho exitosas para algunos buques, particularmente en combinación. [9]

5.5. Otras opciones de combustible líquido o gaseoso

Se pueden utilizar varios combustibles líquidos en motores de combustible dual, como sustituto del aceite. Normalmente, se utiliza una pequeña cantidad de fueloil marino como combustible piloto, para iniciar el proceso de encendido, seguido de la combustión del combustible alternativo seleccionado.

Algunos de los combustibles que se pueden utilizar son el Gas Licuado de Petróleo (GLP, mezcla de butano y de propano), metanol, etanol y éter di-metílico (DME). La mayoría de estos combustibles ofrecen reducciones significativas de emisiones de NO_x y material particulado, mientras que no contienen azufre y pueden usarse para cumplir con las regulaciones de ECA, cómo ha sido explicado en anteriores apartados de este proyecto. [9]

5.4.1. Tecnología y desarrollos futuros

Los fabricantes de motores marinos ofrecen motores de combustible dual que pueden funcionar con las opciones de combustible mencionadas anteriormente. Dependiendo del tipo de combustible, se requieren diseños especiales para tanques de combustible y tuberías.

En julio de 2013, DNV publicó reglas para el uso de combustibles líquidos de bajo punto de inflamación (LFL), como el metanol, como combustible para búnker (DNV, 2013). El interés por el metanol como combustible para buques está creciendo en Suecia en respuesta a la necesidad de reducir las emisiones de SO_x y NO_x.

El metanol tiene un punto de inflamación relativamente bajo, es tóxico cuando entra en contacto con la piel o cuando se inhala o ingiere y su vapor es más denso que el aire. Como resultado de estas propiedades, DNV requiere barreras de seguridad adicionales.

La nueva tecnología LFL FUELED cubre aspectos como materiales, disposición, seguridad contra incendios, sistemas eléctricos, control y vigilancia, maquinaria, componentes y algunos segmentos de buques con específicas consideraciones.

Debido a la disponibilidad limitada de todos estos combustibles, no se espera que penetren en los sectores del transporte marítimo de aguas profundas en un futuro cercano o mediano. Sin embargo, pueden convertirse en partes importantes de la mezcla de combustibles en los mercados locales. [9]

5.6. Propulsión nuclear

La energía nuclear es una tecnología bastante controvertida que también se puede utilizar en el transporte marítimo, según los avances tecnológicos y la aceptación social. El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) define el material nuclear como uranio, plutonio y torio. Para evitar la posibilidad de fabricar armas con material nuclear, los buques de propulsión nuclear necesitarían funcionar con material nuclear poco enriquecido.

Si bien no se considera una alternativa energética verdaderamente sostenible, debido al uso de recursos limitados, tiene la ventaja obvia de no emitir GEI, a excepción de las emisiones relacionadas con la manipulación de materiales nucleares.

La energía nuclear se puede utilizar para la propulsión de buques muy grandes o en buques que necesitan ser autosuficientes durante períodos más largos a la vez. La flota rusa de rompehielos, que opera en la ruta marítima del norte, es un ejemplo en el que la energía nuclear está totalmente adaptada. Además, varios buques de la armada de propulsión nuclear están en funcionamiento a día de hoy.

Sin embargo, se han construido muy pocos buques mercantes de propulsión nuclear, y todo ello sin éxito comercial.

La electricidad producida a partir de plantas de energía nuclear en tierra también se puede utilizar para planchar en frío, para cargar baterías de buques eléctricos puros o para proporcionar la energía necesaria para producir otros combustibles, como biocombustibles o hidrógeno. [9]

5.5.1. Tecnología y desarrollos futuros

Se están estudiando varios conceptos para reactores nucleares compactos, que van desde los 30MWe hasta los 200MWe en potencia de salida, todos con más de 10 años de vida útil. Una barrera importante que debe superarse está relacionada con el almacenamiento y reciclaje seguros del combustible gastado. [9]

El uso de torio como combustible nuclear (en lugar del uranio o plutonio, que se utilizan en la actualidad), también puede ofrecer ventajas significativas: mayor disponibilidad de combustible, mayor eficiencia y menor producción de desechos nucleares. El óxido de torio se puede mezclar con un 10% de óxido de plutonio, que también ofrece una forma de reciclar el plutonio.

La mezcla de torio y óxido de plutonio aumenta el punto de fusión y la conductividad térmica, lo que resulta en reactores más seguros. Actualmente se está probando un reactor de torio experimental en Noruega, con el fin de evaluar la viabilidad de esta tecnología.

La energía nuclear es una de las tecnologías más controvertidas para la generación de energía y la propulsión. Si bien los estándares de seguridad son muy altos y el número de accidentes es muy bajo, las consecuencias de un accidente pueden ser devastadoras.

La historia reciente (los accidentes de Three Mile Island, 1979, Chernobyl, 1986 y Fukushima, 2011) ilustra el impacto de un accidente en la formación de la opinión pública y las decisiones políticas de conducción. El ejemplo más reciente de todo esto es el abrupto cambio de dirección de Alemania con una drástica reducción de la energía nuclear inmediatamente después del accidente de Fukushima en 2011.

Dada la oposición pública a la energía nuclear en la mayoría de los países y los temores relacionados con las posibles consecuencias de los accidentes, parece muy poco probable que se adopte la propulsión nuclear en el transporte marítimo en los próximos 10 a 20 años. [9]

La generación de energía nuclear en tierra se mantendrá en los niveles actuales, principalmente debido a los desarrollos en China. Este panorama podría cambiar después de 2030, siempre que aumente la aceptación social y otros esfuerzos para reducir los GEI no resulten tan efectivos como se desea.



Figura 6. Bombonas de gas – Fuente: Google imágenes

6. Gas natural licuado

6.1. Introducción y antecedentes

En 2014, el OIES (Oxford Institute for Energy Studies) publicó un documento sobre las perspectivas del gas natural en el sector del transporte marítimo con especial atención a Europa. El documento concluyó que las perspectivas para el gas eran más prometedoras en el sector marino, donde las restricciones ambientales empujaban a los propietarios y operadores de buques a considerar alternativas al fueloil. [10]

Desde entonces, la actividad ciertamente ha aumentado con un número creciente de sitios de abastecimiento de combustible de GNL y buques que funcionan con GNL que se están construyendo. La creciente preocupación por la contaminación del aire de los vehículos de carretera diésel también ha dado un impulso adicional a las aplicaciones terrestres de gas.

El potencial para un crecimiento de volumen significativo en la demanda de gas natural parece mayor en el sector marítimo, aunque en ambos sectores todavía hay mucha incertidumbre sobre el ritmo y la escala.

Este apartado se basa en el anterior informe, recopilando información de diferentes fuentes, las cuales se centran en las perspectivas generales del GNL en el transporte marítimo. El enfoque principal está en el mercado de combustibles marinos, ya que también hay informes que analizan los sectores de carreteras y ferrocarriles para el mercado de GNL y GNC. Las razones para tratar los dos mercados por separado son:

- El GNL marino se está desarrollando debido a circunstancias específicas que rodean las restricciones de la Organización Marítima Internacional sobre el fueloil.
- La estructura y funcionamiento del mercado marítimo es muy diferente al del transporte terrestre.
- A parte del cambio impulsado por la OMI en los estándares de combustible, la cantidad de intervención estatal en la promoción de soluciones alternativas al transporte marítimo (con una o dos excepciones notables) es relativamente limitada. Por lo tanto, la decisión de cambiar a GNL está impulsada por un conjunto diferente de métricas.
- La decisión de cambiar a GNL por parte de uno o dos grandes operadores podría conducir a un crecimiento rápido y significativo de la demanda que podría tener consecuencias para el mercado mundial de GNL.

La mayor importancia del GNL es que es un combustible de transición. Además de reducir en un 30% las emisiones de CO₂, el gas natural licuado no tiene azufre y las cantidades de óxido nitroso son de hasta un 80% menos, lo que reduce la producción de lluvia ácida, “algo muy importante” ha explicado a la agencia de noticias EFEverde el Doctor en Marina Civil y profesor de la Facultad de Náutica de Barcelona, Germán De Melo.

El profesor ha recordado que, aunque a día de hoy es la medida alternativa “más inmediata” para evitar la paralización de la industria marítima, el GNL “es un combustible de transición”, ya que sigue produciendo “muchas cantidades de CO₂” y además tiene el inconveniente de que puede sufrir pérdida de metano durante su combustión, un GEI “28 veces más potente” que el dióxido de carbono.

Es por ello que el profesor Germán De Melo insiste en una transicionalidad del GNL hacia otros combustibles como el amoníaco o el hidrógeno con los que “prácticamente no se produciría ninguna contaminación”, aunque a día de hoy las empresas “no son capaces de producir estos combustibles en grandes cantidades”, ni los puertos están preparados para administrarlos.

Por este motivo se ha decidido dedicar un apartado completo al GNL, el cual tiene como objetivo:

- Evaluar los sectores más prometedores para el GNL en el transporte marítimo en los mercados marítimos mundiales.
- Derivar un conjunto de métricas que podrían usarse para generar pronósticos de la demanda de GNL en el sector marino y evaluar la validez de los pronósticos actuales.
- Evaluar el estado actual y el estado previsto de la infraestructura de repostaje de GNL y su impacto en el desarrollo del mercado.
- Mencionar brevemente las perspectivas comparativas del GNL en el transporte terrestre.

6.2. Factores que sustentan el GNL en el transporte marítimo

Las principales ventajas del GNL sobre otros combustibles para el transporte marítimo son: [10]

- Ahorro en costos de combustible y mantenimiento del motor.
- Reducción de emisiones contaminantes, hasta un 90% vs combustóleo (IFO) y diésel.
- Cumplimiento de la norma OMI 2020.
- Mayor seguridad en el almacenamiento.
- Mejor combustión, control y eficiencia.

En este capítulo se revisan brevemente estos factores y actualiza el panorama basado en desarrollos operativos y comerciales recientes. También se revisan algunas de las principales barreras e incertidumbres para la adopción del GNL.

Las dos consideraciones críticas son los factores ambientales y los precios corporativos del combustible.

6.2.1. El caso medioambiental del GNL

El gas natural tiene algunas ventajas medioambientales importantes sobre los productos tradicionales del petróleo. Esto es más notable en el uso del GNL como combustible marino en lugar de fueloil pesado o diésel marino. El GNL normalmente produce menores emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y prácticamente sin óxidos de nitrógeno (NO_x), materia particulada (PM) u óxidos de azufre (SO_x). En la Tabla 1 se muestra una comparación de los factores de emisión de los combustibles marinos. [10]

EMISIÓN	HFO	MDO	GNL
SO _x *	0.049	0.003	Despreciable
CO ₂	3.114	3.206	2.750
CH ₄	Despreciable	Despreciable	0.051
NO _x	0.093	0.087	0.008
PM	0.007	0.001	Despreciable

Tabla 1. Factores de emisión para combustibles marinos (g/g de combustible) - Fuente: OMI (2014)

*Cifra de 2012 basada en un contenido medio de azufre de HFO del 2.51%.

Esta última característica es particularmente importante en el contexto de los límites de la OMI sobre el azufre en el fueloil (explicado ampliamente en este proyecto en apartados anteriores). Estos son actualmente del 0.1% en las áreas de control de emisiones (ECA) obligatorias en América del Norte y los mares Báltico y del Norte en Europa y del 0.5% a nivel mundial a partir del año 2020.

En el año 2018, el límite mundial del contenido de azufre es del 3.5% y las cifras de 2016 de la OMI muestran que el contenido medio anual de azufre de los fuelóleos residuales probados en 2016 fue del 2.58%. El contenido medio mundial de azufre para el combustible destinado en 2016 fue del 0.08% por lo que podría haber una interrupción significativa en las cadenas de suministro de combustible marino tradicionales una vez que el nuevo límite entre en vigor, lo que afectará a los proveedores, comerciantes, mayoristas y usuarios de combustible. [10]

También existen estándares de emisiones de NO_x para motores de buques basados en el año de instalación del buque. La aplicación de estos estándares también está vinculada a las ECA.

Los atractivos del GNL en términos de reducción de NO_x, SO_x y material particulado son evidentes. Las ventajas del GNL en términos de gases de efecto invernadero (GEI) (dióxido de carbono y metano) son menos evidentes, particularmente cuando se incluyen las emisiones de ciclo completo y el impacto del deslizamiento de metano (la combustión incompleta del gas natural durante la etapa de utilización).

El metano es un GEI mucho más potente que el CO₂, aunque los métodos para medir su impacto están sujetos a mucho debate.

Los efectos del ciclo completo se refieren a las emisiones de GEI que resultan de trasladar el gas desde su fuente al recipiente y luego de su combustión. Este enfoque, a menudo denominado *Well- to-Wake* (WTW) captura el impacto ambiental de la producción, el transporte y la licuefacción de gas, incluidos los efectos las emisiones de metano.

Se han analizado las emisiones del ciclo de vida del gas natural en comparación con los combustibles tradicionales a base de petróleo en el sector marino y se muestran los resultados de una simulación (un buque portacontenedores que viaja entre Los Ángeles y Honolulu y viceversa) en la Figura 7.

A partir de esta evidencia, está claro que las ventajas del GNL en términos de contaminación del aire (SO_x y PM) no son tan grandes en comparación con otros combustibles con respecto a las emisiones totales de GEI.

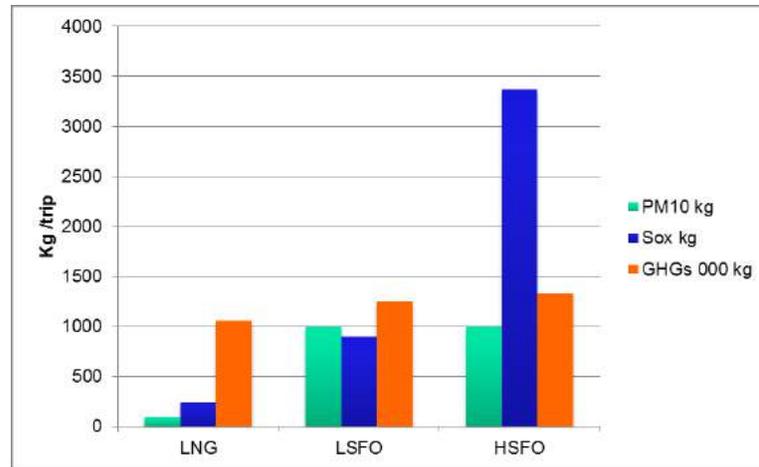


Figura 7. Emisiones totales del ciclo del combustible por viaje utilizando salidas modeladas - Fuente: Thomson et al (2015)

Un estudio más reciente de Thinkstep (2017) para la Asociación de Vehículos de Gas Natural ha evaluado las emisiones totales de WTW para el uso del transporte en la UE tanto para GNC como GNL. Los resultados para el GNL en el mar se resumen en la Tabla 2, que muestra la proporción de CO₂ equivalentes de emisiones debidas al metano.

Modo	Fuel Oil	Diésel marino	GNL (4 tiempos)	De los cuales metano	GNL (2 tiempos)	De los cuales metano
CO ₂ marino (eq/kWh)	742	750	662	120	589	49

Tabla 2. Emisiones de GEI de WTW para diferentes combustibles. Fuente: Thinkstep (2017)

Las cifras de GNL se basan en motores de combustible dual.

Un área creciente de emisiones potenciales es el “deslizamiento de metano” en el sector del transporte, donde los motores de gas no pueden quemar completamente todo el metano que luego se escapa a la atmósfera. Un estudio realizado por Anderson (2015) midió la cantidad de metano en el escape de un ferri alimentado con GNL en el Mar Báltico.

Este estudio informó alrededor de 7g/kg de GNL con cargas de motor más altas, aumentando a 23-36 g con cargas más bajas: 0.7% a 3.6%. Thinkstep (2017) estima que el deslizamiento de metano se encuentra en la región del 0.13% al 0.16% de la masa de gas consumida.

Los autores esperan que esta cantidad se reduzca a medida que los diseños de los motores se adapten específicamente para el gas natural como combustible, aunque es probable que los motores de combustible dual sean susceptibles a cierto grado de deslizamiento de metano. EL mismo estudio estima emisiones de metano de 0.05 a 0.2% durante el suministro de combustible

El uso de biogás como fuente de GNL mejoraría, por supuesto, el desempeño ambiental del combustible de manera muy significativa. El uso de biomasa como materia prima para el GNL es una posibilidad técnica, aunque se necesita un apoyo financiero significativo.

Hay una pequeña cantidad de proyectos en consideración, principalmente dirigidos al transporte por carretera. Para el transporte marítimo, dados los volúmenes necesarios, es probable que se prefieran otras opciones de biocombustible.

6.2.2. El caso económico del GNL

El costo del combustible es a menudo una consideración clave para los operadores de buques y puede representar entre el 60 y el 80% de los costos operativos totales, y el aumento de los precios del petróleo hace que los costos del combustible sean una preocupación aún mayor. Los combustibles marinos generalmente se venden libres de impuestos, por lo que las comparativas de precios son relativamente sencillas, aunque se deben utilizar sustitutos para el GNL, ya que no hay precios publicados en la actualidad.

El apoderado más apropiado para usar GNL como combustible en un mercado en particular sería el centro comercial asociado: Henry Hub (HH) para la costa este de EE.UU. y TTF o NBP para el nordeste de Europa.

Sin embargo, los dos mercados de GNL son diferentes. En los Estados Unidos, el precio del combustible debería ser superior al de HH, ya que incluiría el precio de licuefacción y, en circunstancias en las que el mercado de GNL se endurezca, incluirá una prima adicional que refleje esta rigidez. Los precios del GNL en Europa, por otro lado, deberían, en igualdad de condiciones, tener un descuento en TTF o NBP, ya que excluirían los costos de regasificación y entrada a la red.

En efecto, los compradores de GNL comprarán el combustible a un precio FOB en el Golfo de México de EE.UU. y a un precio DES en Grain o Rotterdam. Para los mercados asiáticos, el precio de importación publicado del GNL a Japón es probablemente el apoderado más apropiado en este momento. [10]

Es posible que estas complicaciones no sean particularmente relevantes para los compradores, ya que, como se indica a continuación, la tendencia parecería ser que los vendedores ofrezcan GNL con un descuento fijo sobre los precios publicados de los productos petrolíferos.

Sin embargo, la existencia de diferenciales seguirá siendo importante, ya que demuestra que hay un margen que aprovechar para cambiar al GNL.

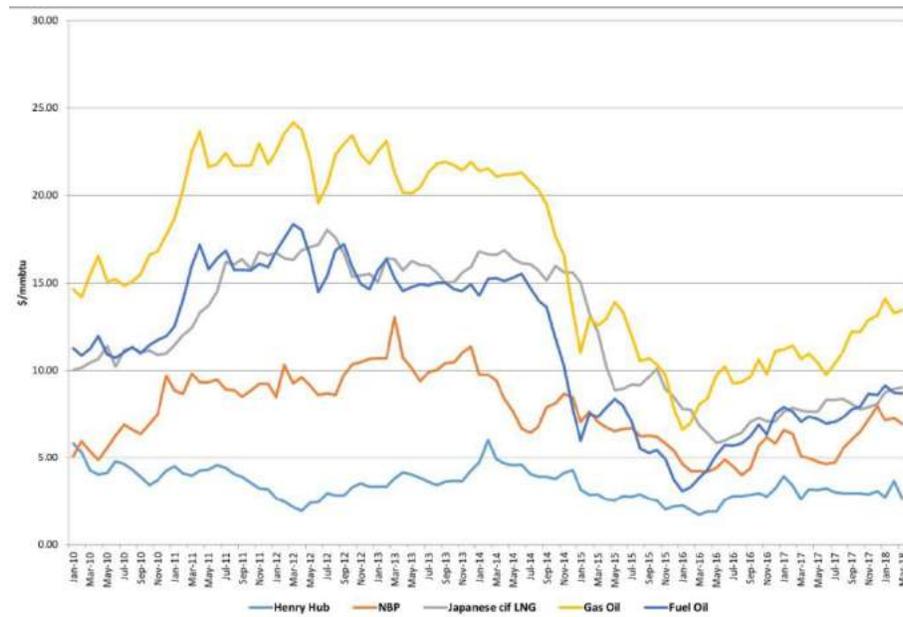


Figura 8. Comparación del precio del combustible marino (noroeste de Europa) con los precios regionales del gas - Fuente: Argus

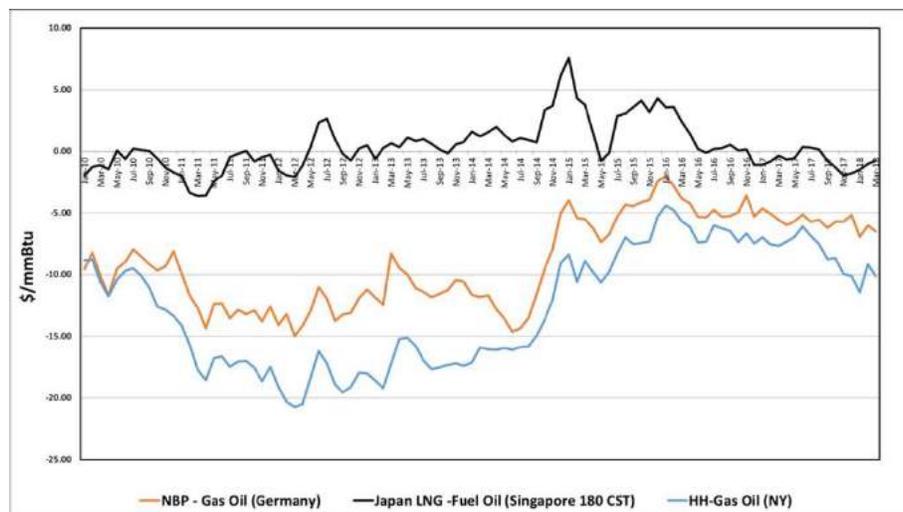


Figura 9. Diferenciales de precios del combustible marino con precios regionales del gas (el diferencial negativo significa que el gas es más barato) - Fuente: Argus

La Figura 8 muestra la evolución de los precios clave en \$/MMBtu (Metric Million British Thermal Unit).

El precio de las materias primas del gas natural en general ha sido más barato que el gasoil en Europa y los EE.UU. Mientras que el diferencial entre el GNL y el fueloil en Japón es generalmente más estrecho, lo que es de esperar dado que el precio de la mayoría del GNL japonés todavía está vinculado a los precios del crudo.

Los precios del gasóleo asiático son típicamente un 50% más alto que los precios del fuelóleo.

La Figura 9 muestra la diferencia con el gasóleo en las ECA de Norteamérica y Europa y con el fueloil en los mercados asiáticos. Las diferencias han tenido que reducirse entre 2015 y 2017 con la caída de los precios del petróleo.

Sin embargo, el descuento del GNL sobre el gasóleo sigue siendo de al menos 5\$/MMBtu y esta es, a día de hoy, la diferencia más relevante una vez que entraron en vigor las restricciones de la OMI en todo el mundo en 2020.

También existen ventajas en los costos operativos del uso de GNL en comparación con el fueloil, ya que el combustible más limpio significa que los motores y los equipos asociados necesitarán menos mantenimiento y durarán más, aunque el costo de inversión para adaptar los buques existentes, estimado en alrededor de 6 millones de dólares, significa que es poco probable que la modernización de GNL sea práctica.

Por supuesto, no hay ninguna garantía de que se mantengan las diferencias existentes una vez se introduzcan las restricciones de la OMI. El exceso repentino de fueloil pesado que necesita un costoso tratamiento reductor de azufre junto a una escasez de diésel podría dar lugar a cambios importantes e impredecibles en las diferencias relativas entre gasóleo y fueloil.

6.3.3. Barreras e incertidumbres

Si bien el GNL tiene algunas ventajas claras sobre otros combustibles, no es la única solución. Los operadores de buques que buscan alternativas al fueloil tienen otras dos opciones: diésel marino con bajo contenido de azufre o depuradores de azufre con una posibilidad adicional, aún sin precio, de combustible con bajo contenido de azufre.

Si bien los depuradores de azufre pueden ser una opción atractiva a corto plazo en algunas circunstancias, es posible que no representen una opción realista a largo plazo. Un análisis citó un costo de 4 millones de dólares para instalar depuradores, lo que indica que el fueloil con alto

contenido de azufre tiene que ser de al menos 200 \$/tonelada más barato que el 0.5% del fueloil con bajo contenido de azufre o el 0.1% del gasóleo marino para justificar la instalación de depuradores.

Sin embargo, es probable que haya restricciones crecientes sobre la eliminación del agua de lavado rica en azufre y una escasez de instalaciones en tierra para manejarla. Se informa que varios grandes operadores de transporte, incluidos Maersk y Teekay, ya han descartado esta opción por este motivo.

Además, aunque la OMI ha acordado eximir a los buques con depuradoras de las restricciones sobre el transporte de combustible que no cumplan con las normas, las normas locales pueden hacer que el manejo y transporte de combustibles con alto contenido de azufre sea cada vez más difícil y costoso.

Esta opción se ve corroborada por la evidencia de que solo 300 buques habían instalado sistemas de depuración en marzo de 2018, aunque más buques se fueron adaptando a medida que se acercaba la fecha límite de 2020.

El mercado del transporte marítimo todavía está estancado con un exceso de capacidad a pesar de algunas quiebras recientes de alto perfil. Las restricciones de la OMI se introdujeron en todo el mundo en 2020 y esto se sumó a los problemas financieros del mercado.

Un estudio ha estimado que un cambio de fueloil a diésel podría costarle a un operador de flota de contenedores típico 1500 millones de dólares adicionales al año, lo que equivale a un aumento de 93.75 dólares por TEU. Maersk ha pronosticado un aumento en los costos de combustible marino de 10000 millones de dólares para el sector de contenedores y 50000 millones para la industria naviera en su conjunto.

Muchos operadores de buques son reacios a arriesgar inversiones significativas en este clima y han adoptado un enfoque de “esperar y ver”.

El marco comercial y regulatorio imperante también refuerza este enfoque conservador. Por ejemplo, los propietarios de buques generalmente alquilan sus buques a los operadores y, por lo tanto, no se benefician de ningún ahorro en el costo de combustible al cambiar a GNL.

Es probable que los principales proveedores de GNL desempeñen un papel importante a la hora de ayudar a los operadores de buques a superar la incertidumbre sobre las diferencias de precios del combustible ofreciendo contratos a largo plazo con precios relacionados con el petróleo.

Tal enfoque significaría que los operadores de buques están asegurando un descuento fijo para un producto que ya están comprando mientras eliminan cualquier riesgo asociado con los picos de precios en los centros de comercio de gas.

Estos contratos también podrían incluir garantías con respecto a la entrega física, lo que elimina otra incertidumbre en la mente del comprador y permite al vendedor recuperar el costo de la infraestructura.

Estos acuerdos de precios también reducirán el riesgo para los vendedores de GNL, muchos de los cuales pagan una parte o la totalidad de su GNL a precios vinculados al petróleo.

Por ejemplo, de los 21 BCM anuales de GNL comprados por Gas Natural, 7 BCM provienen de los EE.UU. a precios vinculados a Henry Hub y el resto está relacionado con los precios del crudo o de los productos derivados del petróleo. Gas Natural ha concluido recientemente un contrato con el operador de transbordadores Balearia para suministrar GNL durante once años.

En otros lugares, se entiende que un vendedor importante ofrece un descuento del 30% a MGO para algunos acuerdos a largo plazo.

La voluntad de las grandes empresas de gas de asumir un compromiso proactivo con la comercialización de GNL es, por tanto, un componente importante para superar algunas de las barreras e incertidumbres. Hasta ahora parecen estar adoptando una serie de estrategias.

Shell y Total han demostrado algunos compromisos importantes. Shell compró el 100% del comercializador noruego de GNL GasNor en 2012 y Total ha anunciado planes para adquirir Clean Energy, un proveedor de GNL con sede en California.

Total, también ha comprado los activos de GNL de Engie, que después de hacer gran parte de su funcionamiento inicial en Europa, ahora se está retirando gradualmente en el mercado de GNL aguas abajo. En abril de 2018 vendió su negocio de marketing de GNL en Bélgica y los Países Bajos a Titan.

Una barrera adicional ha sido la inconsistencia entre (y a veces dentro) de los países con respecto a la concesión de licencias y el control de reabastecimiento de GNL. La armonización de las normas y las operaciones en todos los mercados potenciales está avanzando.

Organizaciones como la Society for Gas as Marine Fuel (SGMF) y SEALING han contribuido significativamente al desarrollo de enfoques estandarizados para el manejo seguro, la transferencia de custodia y la evaluación de competencias.

No obstante, el GNL sigue siendo un combustible nuevo para muchas autoridades portuarias y es importante la falta de comprensión de las diferencias clave con los productos derivados del petróleo. En términos de volumen, los tanques de GNL deben ser un 80% más grande que los de fueloil con alto contenido de azufre.

Más importante aún, como combustible superenfriado, el GNL almacenado continuará evaporándose hasta que se use. Esto significa que no se puede almacenar durante períodos prolongados sin una gestión proactiva.

En muchos sentidos, se parece más a un producto perecedero que al aceite. El dimensionamiento de los terminales también puede resultar bastante complicado dada la necesidad de mantener suficientes reservas y volúmenes.

En consecuencia, los arreglos logísticos deben organizarse para reflejar estos puntos y desarrollar una cadena de suministro criogénica integral. Será más difícil hacer esto sin una fuerte demanda de carga base.

También existe cierta incertidumbre sobre el marco regulatorio comercial que rige la infraestructura de GNL y algunos participantes argumentan que los puntos de venta deberían estar regulados. DNV (2017) sugiere que podría haber muchos proveedores de servicios de almacenamiento y abastecimiento de GNL, lo que hace que el mercado sea potencialmente competitivo.

Por otro lado, el número real y el tamaño de las instalaciones pueden ser limitados, por ejemplo, debido a limitaciones operativas o físicas en los puertos o al alcance relativamente limitado de la demanda total. En estas circunstancias, puede haber un caso para la regulación de las instalaciones, incluidas las reglas de acceso y asignación de capacidad.

Una barrera final para el gas es que no es una solución para alcanzar la huella 0 de dióxido de carbono a menos que la fuente sea el biogás. Como se ha señalado anteriormente, es poco probable que este sea el caso del GNL, aunque hay ejemplos de biogás en la cadena de suministro de transporte para automóviles y camiones alimentados con GNC.

A pesar de estas incertidumbres, existe un claro nivel de interés por parte de una serie de importantes operadores de buques en cambiar a GNL. Para intentar cuantificar lo que esto podría significar, primero es necesario obtener una imagen más clara del mercado de combustibles marinos.

6.3. El mercado mundial de combustibles marinos

En este apartado se analiza el mercado mundial de combustibles marinos a los niveles y tipos existentes de buques propulsados por GNL previstos en funcionamiento. También considera los niveles típicos de uso de combustible para una variedad de tipos de embarcaciones clave. Con el fin de proporcionar una base significativa de comparación, siempre que sea posible, las cifras de consumo de combustible se han convertido a toneladas equivalentes de GNL (LNGeq) utilizando los factores de conversión adecuados.

Los datos sobre los búnkeres marinos no siempre son precisos debido a las diferencias en los métodos de clasificación y recopilación de datos. La IEA publica cifras de consumo de combustible de

buques a nivel mundial desglosadas por tipo de combustible, por ejemplo, fueloil y gasóleo marino. Estos números se basan en datos de ventas de combustible.

Otros investigadores han desarrollado estimaciones del consumo de combustible utilizando el llamado método ascendente.

Este enfoque fue adoptado por UCL (OMI, 2014) en nombre de la OMI para calcular las emisiones de CO₂ utilizando datos del Sistema de Identificación Automática (AIS) que rastrea la actividad en envío cada hora para desarrollar un conjunto de datos de alta resolución del consumo de combustible. Este trabajo se actualizó en 2017 en un informe publicado por el Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT).

Ambos estudios muestran que el enfoque de abajo hacia arriba genera estimaciones de consumo de combustible más altas que las producidas por la IAE.

La Tabla 3 ilustra la diferencia.

Si bien esto muestra que la brecha está disminuyendo a medida que mejora la precisión de los dos enfoques, todavía hay algunos problemas de datos y la OMI está planificando un ejercicio de monitoreo de combustible para identificar dónde podrían estar las brechas.

Las estimaciones de arriba hacia debajo de la IEA no distinguen entre diferentes categorías de buques. Comprender el consumo de combustible por tipo de buque es una consideración importante al determinar las perspectivas del GNL, ya que los diferentes sectores muestran características de consumo de combustible muy diferentes.

El estudio realizado por ICCT proporciona un grado mucho mayor de granularidad en términos de consumo por tipo de envío, por lo que estos números se utilizarán para el análisis en el presente proyecto. [11]

Fuente	Método	2007	2009	2011	2013	2015
IEA	De arriba hacia abajo	258	246	264	254	265
OMI	De abajo hacia arriba	352	313	327	291	298

Tabla 3. Consumo mundial de combustible de buques (millones de toneladas). Fuente: ICCT (2017)

La Figura 10 muestra el desglose del consumo por categoría de combustible para el período de 2013 a 2015 que ilustra la proporción dominante de fueloil. Una pequeña cantidad de combustible

(aproximadamente 6.5 millones de toneladas) se clasifica como GNL, de las cuales alrededor del 97% lo consumen los transportistas de GNL, presumiblemente en forma de gas de ebullición. La siguiente sección analiza el número de buques que ya utilizan GNL.

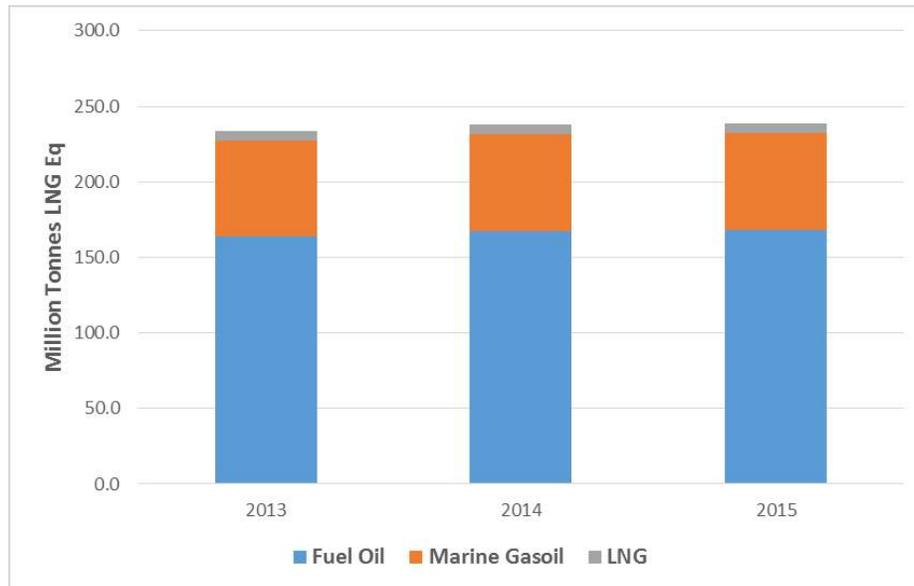


Figura 10. Consumo mundial de combustible de buques por tipo de combustible (millones de toneladas de LNGeq) - Fuente: ICCT

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD) clasifica a los buques en cinco categorías principales:

- Tanque de aceite
- Buque carguero
- Buque de carga general
- Portacontenedores
- Otros: Esta categoría incluye los transportistas de gas (28% del DWT en esta categoría), los quimiqueros (21%), los buques de alta mar (37%), los transbordadores y los buques de pasaje (3%) y otros (11%).

La Tabla 4 muestra el número de buques por categoría y tonelaje para 2017.

Categoría	Número de vasos	DWT (millones)	% del DWT total	Promedio DWT/Buque
Tanques de aceite	10152	535	28	52685
Buque carguero	10884	797	43	73188
Carga general	19601	75	4	3817
Portacontenedores	5154	246	13	47654
Otro	47370	210	12	4433
Total	93161	1862	100	19985

Tabla 4. Flota naviera mundial por categoría y tonelaje para 2017. Fuente UNCTAD (2017)

El análisis de las hojas de cálculo detalladas que acompañan al informe ICCT permite calcular el consumo de combustibles en términos equivalentes de GNL y el consumo medio de los diferentes tipos de embarcación. Los siguientes gráficos y tablas proporcionan esta información.

Las categorías principales se muestran en la Tabla 5 y la Figura 11 en términos de consumo de combustible total y promedio.

Categoría	Combustible consumido (millones de toneladas de LNGeq)	Número de buques	Consumo medio (Toneladas de LNGeq)
Portacontenedores	52.5	5009	10491
Granelero	43.6	10650	4097
Petrolero	31.6	6395	4938
Quimiquero	14.2	4720	2999
Carga general	13.2	10973	1202
Buques cisterna para GLP/GNL	12.7	1687	7509
Crucero	9.6	477	20170
Ferry y Ro - Ro	10.2	5288	1933
Vehículo / ro-ro	11.4	2236	5658
Servicio	8.8	25317	397
Refrigerado	3.8	4876	779
"Offshore"	3.5	785	4477
Otro+sin clasificar	23.0	21021	1094
Total	238.1	99434	2393

Tabla 5. Consumo mundial de combustible por tipo de buque en 2015 (de abajo hacia arriba) - Fuente: ICCT (Columnas 1 y 2) y cálculos del autor (Columna 3)

Nota: La conversión se basa en la siguiente base: 1 tonelada de GNL contiene 52 MMBtu, 1 tonelada de fueloil 40,7MMBtu y 1 tonelada de gasóleo marino 43,3 MMBtu

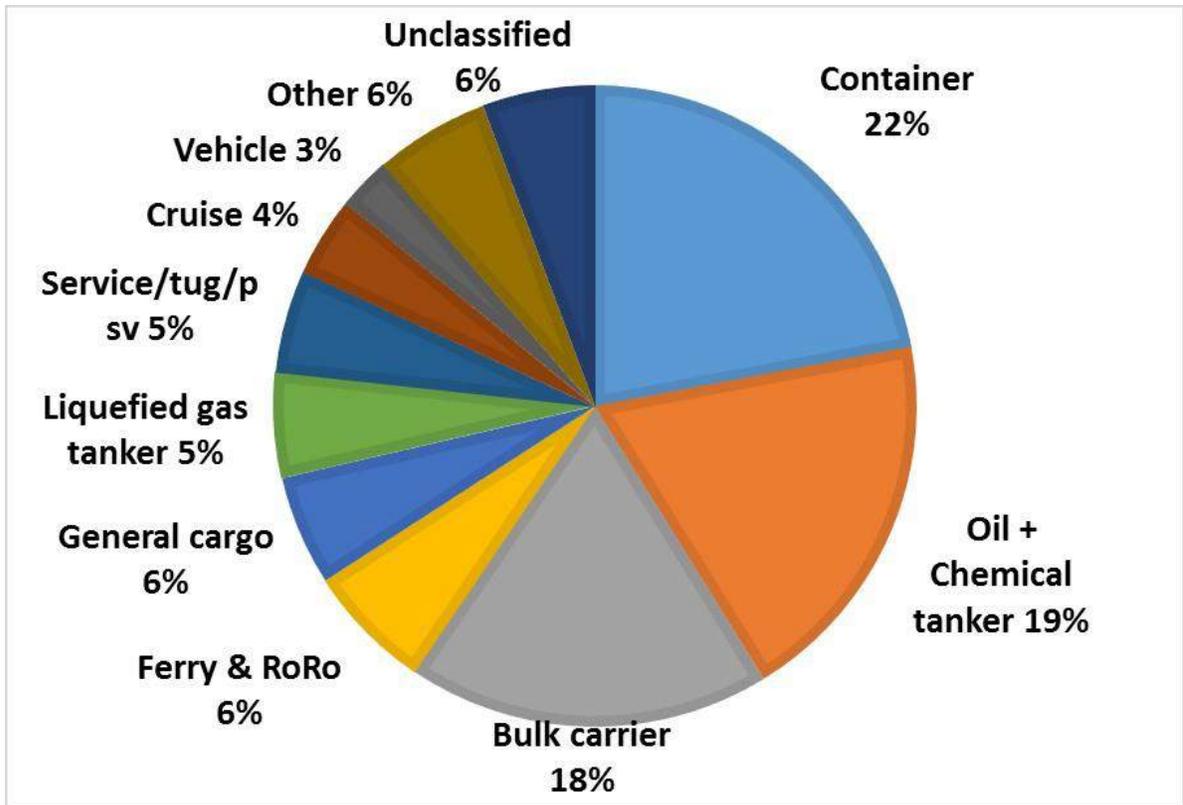


Figura 11. Porcentaje de consumo mundial de combustible por tipo de buque en 2015 (Basado en LNGeq de abajo hacia arriba) - Fuente: ICCT

De la Tabla 6 se desprende claramente que es más probable que los buques que consumen más sean petroleros, portacontenedores y graneleros, aunque, como se indica a continuación, hay algunos sectores en la categoría “otros”, como los buques pasajeros, que son de interés.

Dentro de cada sector existe una amplia gama de tipos de embarcaciones y por tanto de consumo. Por ejemplo, hay ocho categorías diferentes de portacontenedores clasificados en términos de su capacidad de carga en unidades equivalentes a veinte pies (TEU). La categoría más grande son los buques con una capacidad superior a 14500 TEU.

Actualmente hay 68 buques registrados en la base de datos del ICCT con un consumo anual medio estimado por buque de casi 30000 toneladas de equivalente a GNL. En el Apéndice 1 se presentan más detalles sobre cómo varía el consumo en estas categorías.

El combustible no solo se consume por la propulsión sino también para los motores auxiliares. Estos varían según la categoría de buque: para los buques graneleros, el 84% del consumo es para el motor principal, mientras que para los cruceros es solo del 76% (ICCT). [11]

6.4. ¿Qué impulsa la decisión de cambiar a GNL y en qué sectores de transporte es probable?

6.4.1. La flota actual de GNL

Hay una serie de buques que funcionan con GNL (distintos de los transportadores de GNL) que ya están en funcionamiento o bajo pedido. En términos de arqueo bruto, la proporción de buques con capacidad para GNL entregados ha aumentado del 1.4% en 2010 al 5.7% en 2017 (UNCTAD, 2017). Esta proporción se eleva al 13.5% para los buques encargados y que se entregaron en el año 2018.

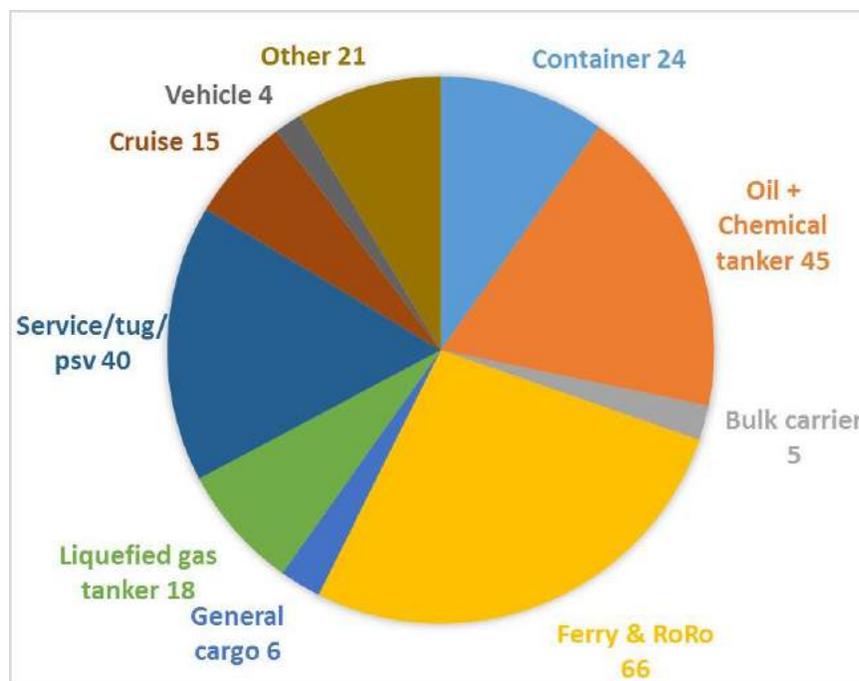


Figura 12. Buques de GNL en uso o en construcción - Fuente: DNV, 2018

Según las estadísticas de la Sociedad de Clasificación DNV, al 1 de mayo de 2018 había 122 buques de GNL en funcionamiento y 132 en construcción o pedidos confirmados. El desglose de estos números por categoría se muestra en la Figura 12 y la Tabla 6, y éste último proporciona algunos números indicativos de consumo de combustibles basados en los promedios del ICCT. [10]

Los números promedio para las cuatro categorías de envío (portacontenedores, petroleros y quimiqueros, cruceros y buques transbordadores) con el mayor consumo potencial se han dividido

para mostrar el consumo promedio en todos los tamaños de buques y el consumo promedio, aunque sea se utilizan recipientes de mayor tamaño.

Por ejemplo, en el caso de los buques portacontenedores, el consumo medio de GNL es 10491 toneladas de LNGeq por año si solo se evalúan los buques con un tamaño superior a 12000 TEU.

Por lo tanto, se estima que el consumo potencial de GNL de los buques en operación y en construcción está en el rango de 1.3 a 3 millones de toneladas de LNGeq anualmente. Cabe señalar que estos números excluyen los buques de GNL convencionales y los buques tanque de gas licuado de la tabla se refieren a los buques de transporte de productos polivalentes operando principalmente en el Báltico y el Mar del Norte.

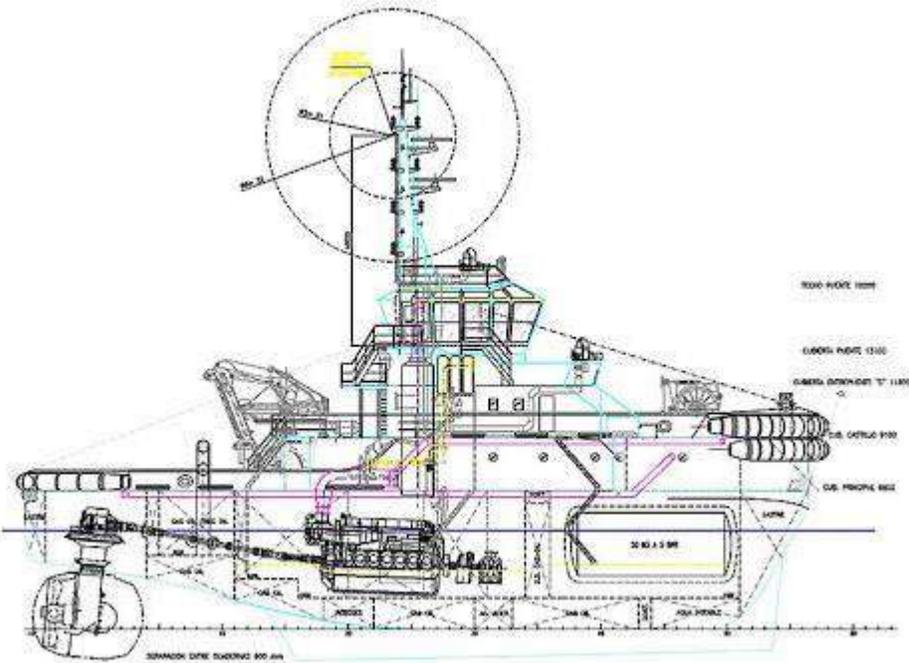


Figura 13: Buque propulsado por Gas Natural Licuado – Fuente: Google imágenes

	En navegación	En construcción	Proporción de la flota total	Consumo potencial de GNL ('000 toneladas)
Portacontenedores	3	21	0.48%	251.8 a 609.3
Petrolero + Químico	10	33	0.40%	176.9 a 533.2
Granelero	3	3	0.06%	24.6
Ferry y ro-ro	41	25	0.98%	149.8 a 466.9
Carga general	4	2	0.05%	7.2
Cisterna de gas licuado	18	0	1.07%	135.2
Servicio /remolcador/ psv	31	9	0.13%	16.3
Crucero	0	18	4.82%	463.9 a 1154.7
Vehículo	2	2	0.49%	31.1
Otro	9	17	0.12%	16.4
Total	121	135	0.26%	1273 a 3015

Tabla 6. Buques de GNL en uso o en construcción a 1 de mayo de 2018 - Fuente: DNV, ICCT y cálculos del autor

6.4.2. Factores clave que respaldan el uso de GNL

El uso de gas como combustible marino es más probable cuando se cumplen algunas o todas las siguientes condiciones económicas y legislativas:

- Los buques operan principal o exclusivamente en áreas sujetas al límite de la OMI de azufre del 0.1%: las áreas de control de emisiones en América del Norte y El Caribe, y el Báltico y el Mar del Norte.
- Los buques son grandes, y, por lo tanto, los requisitos de combustible son elevados, lo que permite recuperar más fácilmente los costos de infraestructura fija y convierte a los propios buques en una perspectiva de marketing prometedora.
- Los costos de combustible representan una proporción relativamente alta de los costos operativos totales, por lo que cualquier ahorro derivado de un descuento en el gasóleo será significativo.
- Los buques tienen patrones de viajes regulares y predecibles. Esto es importante ya que será más fácil planificar el reabastecimiento de GNL en el supuesto que las instalaciones no estarán tan extendidas como el fueloil, particularmente en las primeras etapas de desarrollo. También implica altos niveles de utilización que serán importantes dada la naturaleza “perecedera” del GNL.
- Los operadores también son propietarios de sus embarcaciones. Esto significa que los beneficios derivados de la inversión adicional en GNL serán recuperados directamente por el propietario en lugar de tener que reflejarse en tarifas chárter más altas que pueden ser más difíciles de recuperar, especialmente si persiste el exceso de oferta de envío.
- Los buques siguen rutas que permiten un fácil acceso a las instalaciones de abastecimiento de combustible de GNL.
- Existe un nivel relativamente alto de rotación de buques; en otras palabras, una alta frecuencia de nuevas construcciones o reacondicionamientos importantes. Si bien algunas embarcaciones pueden ser reacondicionadas para usar GNL, se espera que la mayoría sean nuevas construcciones.
- Existe un nivel relativamente alto de demanda de energía auxiliar y/o el buque pasa un tiempo relativamente largo atracado en lugar de en el mar, una característica particular de

los cruceros. Muchos puertos están introduciendo reglas sobre la energía de tierra al buque para reducir el ruido y la contaminación ambiental, y hay estudios que han sugerido que el GNL presenta una alternativa creíble a la electricidad en tierra.

- El sector se caracteriza por una serie de grandes empresas con amplias operaciones en todo el mundo; por ejemplo, el transporte de contenedores y las líneas de cruceros. Es más probable que las empresas más grandes estén preparadas para hacer un compromiso estratégico de invertir en una fuente de combustible como el GNL y, a su vez, representarían una perspectiva más atractiva para los comercializadores de GNL.
- Hay altos niveles de apoyo gubernamental para nuevas inversiones que favorezcan a los buques que utilizan GNL.

Estos requisitos no son imprescindibles y su importancia relativa variará. Por ejemplo, el 50% de los buques de GNL existentes están operando en Noruega. Estos buques representan una amplia gama de segmentos de uso y, en este caso, demuestran la importancia de la participación estatal que ha sido muy proactiva en el caso de Noruega.

En otros lugares ha habido un estado directo con un apoyo relativamente limitado al envío de GNL, aunque en septiembre de 2017 Alemania anunció una que pondría 278 millones de euros a disposición para subvencionar la conversión y construcción de buques con GNL como combustible, y Corea del Sur ha indicado que proporcionará alrededor del 10% del costo de los nuevos buques graneleros alimentados con GNL.

6.4.3. Los sectores más prometedores para el GNL

Las condiciones descritas en la sección anterior sugieren que los mercados más prometedores serían los grandes buques portacontenedores, cruceros, graneleros y transbordadores junto con la mayoría de los tipos de buques que pasan todo o la mayor parte de su tiempo operando en la región del Mar Báltico/Mar del Norte o en la costa de América del Norte.

Otras categorías que podrían ajustarse a algunas de las condiciones anteriores incluyen remolcadores y dragas en puertos con instalaciones de abastecimiento de combustible de GNL. Los principales sectores se examinan con más detalle a continuación.

Portacontenedores

El sector del transporte marítimo de contenedores es el más grande en términos de consumo de combustible y, posiblemente, el referente clave para el transporte marítimo. Se caracteriza por altos y crecientes niveles de concentración, con los diez principales transportistas proporcionando el 75% de la capacidad de envío en 2017 en comparación con el 62% en 2011.

Las fusiones recientes incluyen la combinación de COSCO y China Shipping, Hapag Lloyd con United Arab Shipping y la adquisición de Hamburg Sud por parte de Maersk.

Los principales actores se muestran en la Tabla 7.

Empresa	Domicilio	Cuota de mercado	Número de embarcaciones
Maersk	Dinamarca	16%	621
MSC	Suiza	14.6%	469
CMA CGM	Francia	11.1%	441
COSCO	China	8.0%	227
Hapag Lloyd / UASC	Alemania	7.9%	236
NYK/ MOL/ K-Line	Japón	7.1%	243
Total		64.7%	2287

Tabla 7. Principales navieras de contenedores - Fuente: UNCTAD 2017, DHL

A pesar de la ola de fusiones y consolidaciones más la quiebra de Hanjin Shipping, persiste el exceso de oferta. [12]

Esto significa que la tendencia a los altos niveles de rotación de buques nuevos se ha reducido, y Platts informó de una relación de cartera de pedidos a flota del 12% en 2017 en comparación con un máximo del 64% en 2007. Las perspectivas para el sector se ven empañadas aún más por las preocupaciones de una guerra comercial global y un regreso a la fabricación de base regional.

A pesar de estos factores negativos, las perspectivas para el envío de GNL en este sector parecen prometedoras con el monitor DNV (2018) que muestra 21 buques en orden. Estos incluyen los que está construyendo la compañía francesa de transporte de contenedores CMA CGM, que ha anunciado que todos sus nuevos buques estarán equipados para funcionar con GNL.

Total, ha acordado suministrar a estos barcos alrededor de 300.000 toneladas anuales de combustible búnker de GNL durante diez años a partir de 2020. En abril de 2018, Maersk dijo que no tenía planes de construir nuevos buques portacontenedores, aunque si tuviera que pedir nuevos barcos, "definitivamente consideraría tener barcos de GNL".

La compañía ha descartado los depuradores de azufre y el reacondicionamiento de GNL para sus buques existentes y utilizará ULSFO y MGO.

Buque carguero

Los graneleros representan la gran mayoría del comercio marítimo internacional en términos de toneladas cargadas. Los principales productos básicos transportados son mineral de hierro (29% de las toneladas cargadas en 2017), carbón (23%), cereales (10%), acero (8%) y productos forestales (7%) (UNCTAD 2017).

En 2015 se encargó un transportista de 50.000 DWT alimentado con GNL para transporte de piedra caliza para la siderúrgica surcoreana POSCO. Los constructores navales surcoreanos están diseñando buques más grandes (180.000 y 250.000 DWT) para el tráfico en aguas profundas, como los envíos de mineral de hierro desde Australia.

El análisis de los datos de ICCT indica que la categoría más grande de embarcaciones consume alrededor de 10,000 toneladas/año de GNL sobre una base de combustible equivalente.

Petroleros, gaseros y quimiqueros

Los buques tanque pueden incluir petróleo crudo, productos derivados del petróleo, productos químicos y gas, tanto GNL como GLP. El petróleo crudo representa el 60% de los envíos en términos de toneladas cargadas en 2016 y los productos petrolíferos un 28% adicional (UNCTAD 2017).

Sin embargo, los petroleros de crudo pueden no presentar un mercado particularmente prometedor para el GNL. La proporción de propietarios-operadores es menor que en algunos otros sectores y es probable que los arreglos de suministro de combustible existentes se adapten fácilmente para tomar fueloil con menor contenido de azufre.

Por ejemplo, Teekay Shipping ha indicado que optará por una solución a base de destilados para la mayor parte de su flota, ya que la adaptación de depuradores de azufre o GNL es demasiado cara. Aunque los buques tanque de GNL solo representan el 9 por ciento de los envíos de buques tanque, son claramente importantes en este contexto debido al uso significativo de GNL de ebullición como combustible.

Como ha señalado recientemente Rogers (2018), ha habido un cambio de la propulsión de turbina de vapor tradicional a motores diésel de combustible dual (DFDE) más eficientes.

Un buque DFDE completamente cargado puede navegar utilizando solo GNL procedente de la ebullición natural, aunque para optimizar el consumo de combustible a la velocidad requerida del buque, generalmente se consume una mezcla de GNL y fueloil.

Cruceros

El sector del transporte marítimo de cruceros no es grande en términos de su proporción del total de embarcaciones, aunque los barcos individuales son grandes y tienen un consumo de combustible muy alto.

Por ejemplo, se calcula que los buques de más de 100.000 toneladas brutas tienen un consumo medio de combustible de alrededor de 60.000 toneladas / año de GNL sobre una base de combustible equivalente.

Además, la naturaleza del transporte marítimo de crucero significa que los operadores están más expuestos que la mayoría de los otros sectores al escrutinio sobre su huella ambiental. Como consecuencia, varios operadores se han comprometido a utilizar GNL y en marzo de 2017 97 se encargaron cruceros, de los cuales 13 iban a ser de doble combustible con GNL.

Esto representó alrededor del 25 por ciento del tonelaje bruto pedido en el sector de cruceros, lo que sugiere que los barcos más grandes son los más favorecidos para el uso de GNL.

El mayor actor del sector, Carnival Cruise Lines tiene siete cruceros propulsados por GNL en pedidos con fechas de entrega entre 2020 y 2022. Cuando estén operativos, estos podrían tener un requerimiento combinado de combustible de GNL de 300.000 toneladas de GNL por año.

Cabe señalar que la compañía tiene un uso anual total de combustible de 3,2 millones de toneladas, el 78% de las cuales fue HSFO en 2016, por lo que podría, por sí sola, representar un mercado a largo plazo muy importante para el GNL.

En 2017, la compañía anunció un acuerdo marco con Shell para suministrar GNL para sus dos nuevos cruceros norteamericanos que se entregarán en 2020 y 2022. Otro factor importante es que en promedio, un crucero pasa alrededor del 40 por ciento de su tiempo de operación en un puerto. Algunos buques ya están utilizando GNL para sus necesidades energéticas en este momento.

Ferries y sectores asociados

Con sus patrones de viajes regulares e intensivos, no es sorprendente que los grandes transbordadores ro-ro, particularmente los que operan en ECA como el Báltico, hayan sido los primeros en adoptar el GNL como combustible.

Un ejemplo típico es Fjord Line, que ha estado operando ferries de GNL entre Noruega y Dinamarca desde 2013. Otros ejemplos incluyen el ferry Megastar que navega entre Tallin y Helsinki y el operador estadounidense TOTE, que ha convertido dos de sus barcos en operación de combustible dual con GNL 36.

Una categoría separada pero similar de buques son los transportadores de automóviles: se trata de una forma especializada de buque ro-ro que transporta automóviles de pasajeros. United European Car Carriers (UECC) opera dos transportadores de automóviles y camiones de doble combustible entre Southampton y San Petersburgo.

Otra empresa, SIEM, está introduciendo dos embarcaciones similares en 2019 para enviar automóviles VW desde Europa a los EE. UU.

6.5. Niveles pronosticados de uso de GNL como combustible marino

Este capítulo proporciona una revisión de los pronósticos recientes de captación de GNL en el sector marino y sugiere algunas métricas para evaluar estos pronósticos a medida que evoluciona el mercado.

Las expectativas anteriores de un rápido crecimiento de la demanda no se han materializado. En 2012, DNV pronosticó que habría más de 1,000 buques alimentados con GNL para 2020. Esto fue revisado a entre 400 y 600 en 2015 y las últimas cifras sugieren una flota de menos de 300 para ese momento.

Los precios del petróleo más bajos y un desarrollo de la infraestructura más lento de lo esperado se citaron como las principales razones, aunque la incertidumbre sobre la evolución del escenario regulatorio y la desaceleración general en la construcción de nuevos barcos también son factores probables. [10]

De hecho, el continuo exceso de capacidad de transporte marítimo en la mayoría de los sectores podría persistir durante algunos años.

Pronosticar la participación de GNL en el mercado marítimo se complica por la dinámica de la oferta y la demanda general en el sector del transporte marítimo. Se espera que la demanda global de capacidad de envío crezca, aunque la forma en que esto se traduzca en requisitos de combustible dependerá de cómo evolucione la eficiencia del combustible (tanto a través de motores más eficientes como de barcos más grandes) y de factores operativos como la utilización de los barcos y las velocidades promedio.

La situación se complica aún más con el endurecimiento de las regulaciones ambientales que generarán una variedad de respuestas. Para las embarcaciones existentes, se encuentra disponible una gama de tecnologías de reducción y los operadores de embarcaciones tienen la opción de cambiar de combustible, instalar depuradores o reacondicionamiento para utilizar GNL.

A medida que se acerca la fecha límite de 2020, está comenzando a surgir más claridad sobre las opciones de disponibilidad de combustible. Informes de Platts 38 que varias refinerías han anunciado planes para producir combustibles con 0,5% de azufre, aunque llegar a un estándar común para dichos combustibles será un desafío y es probable que surja una gama de productos. Como se señaló anteriormente, la adaptación para GNL es una opción poco probable en la mayoría de los casos.

En consecuencia, la demanda de GNL en el sector será impulsada principalmente por las nuevas construcciones y, por lo tanto, el número de buques que funcionan con GNL en construcción es un indicador adelantado útil. Además, hay relativamente pocos sectores en los que un cambio a GNL tendrá un impacto importante en los volúmenes de consumo.

La Tabla 8 muestra cómo ha evolucionado el número de buques alimentados con GNL en los últimos años y, como en la Tabla 7, indica una flota de alrededor de 250 buques que podría equivaler a un consumo anual de entre 1,2 y 3 millones de toneladas excluyendo el consumo de los buques tanque de GNL. La flota total sigue creciendo, aunque la tasa de crecimiento no muestra signos particulares de aceleración.

Buques Consumiendo GNL	2010	2012	2014	2016	2018	2020
Navegando	21	35	56	77	119	122
En construcción	n/a	n/a	n/a	85	125	132
Total	21	35	56	162	244	254

Tabla 8. Número de buques de GNL navegando o bajo construcción - Fuente: DNV

La Tabla 9 muestra algunos pronósticos recientes para la demanda de GNL en el sector marítimo. Nuevamente, esto excluye el consumo de los buques tanque de GNL.



Figura 14. Logo de Lloyd's Register – Fuente: Google imágenes

Fuente	2025	2030	2035	2040
IEA Desarrollo Sostenible	11.6	11.8	26.8	37.0
IEA – Nuevas Políticas	23.9	29.7	36.2	41.3
ENGIE/PWC	n/a	24-30	n/a	n/a
Registro de Lloyds	8-30	10-40	15-45	20-65

Tabla 9. Proyecciones de consumo de GNL en el sector marítimo (mtpa) - Fuente: IEA WEO 2017, PWC, Lloyd's Register 2017

El amplio consenso es de un nivel de demanda entre 20 y 30 mtpa (28 y 40 bcm) por año por 2030. El estudio de Lloyds Register tiene una gama más amplia que en parte refleja una gama más amplia de escenarios alternativos en los que también figuran el hidrógeno y los biocombustibles.

El rango de pronóstico para 2030 es un aumento significativo en los niveles actuales y, si bien es bastante factible, requerirá un aumento en la tendencia de nuevas construcciones. La Tabla 10 muestra que para alcanzar 20 mtpa se necesitarían entre 170 y 400 nuevas construcciones de envío todos los años hasta 2030.

En la Figura 15 se muestra una indicación de cómo se compara este nivel de actividad con el número de nuevas construcciones hasta la fecha. En este gráfico, el supuesto de "alto consumo" significa que se deben construir menos barcos para alcanzar el mismo nivel de demanda.

Hemos visto que los principales buques consumidores son los portacontenedores y las líneas de cruceros. Estas son claramente buenas perspectivas para el mercado de GNL y un número relativamente pequeño de embarcaciones puede marcar una gran diferencia en el nivel de demanda.

Si asumimos que el 80 por ciento del crecimiento de la demanda proviene de buques tan grandes, el número aproximado que se requerirá construir durante la próxima década se muestra en la Tabla 10.

Por lo tanto, para alcanzar el 80% del pronóstico de 20 mtpa se necesitarían 23 nuevos cruceros grandes o se construirán 46 nuevos buques portacontenedores de gran tamaño por año.

Entonces, una combinación anual de, digamos, 5 nuevos cruceros grandes más 10 nuevos buques portacontenedores grandes más otros 15 buques grandes, como graneleros, transbordadores, etc. cumplirían con el pronóstico de 20 mtpa.

En general, la opinión actual es que el rango de pronóstico es alcanzable, aunque desafiante, y un nivel de demanda de alrededor de 15 mtpa para 2030 puede ser más realista. Además, dados los plazos de entrega involucrados, a principios de la década de 2020 se hará evidente si se pueden alcanzar los objetivos.

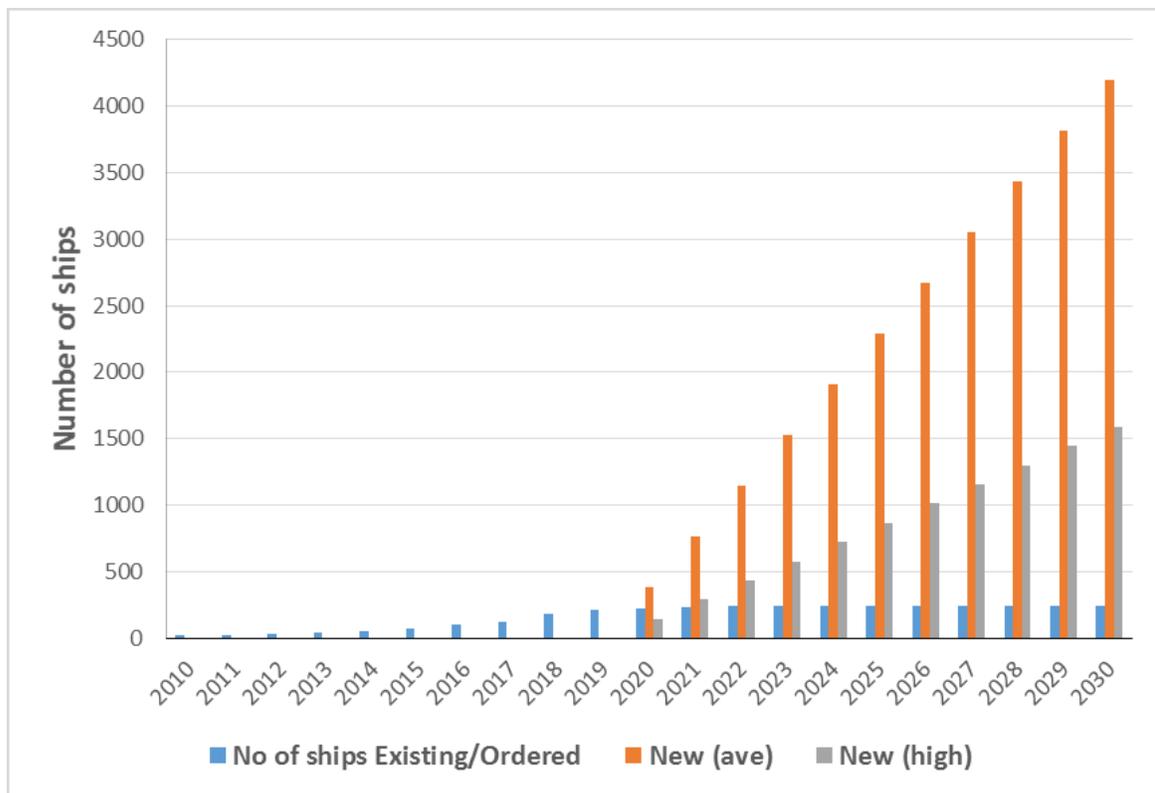


Figura 15. Número de barcos alimentados con GNL que deben construirse por año para satisfacer un nivel de demanda de 20 mtpa LNGeq para 2030 para supuestos de consumo “promedio” y “alto” – Fuente: DNV

Nivel de demanda para 2030	20 mtpa	30 mtpa
Cantidad de nuevas construcciones para consumo “promedio” anual	400	600
Número de nuevas construcciones por año de “alto” consumo”	170	255
Número de buques portacontenedores grandes nuevos construidos por año*	46	69
Número de nuevos cruceros grandes construidos por año*	23	34

Tabla 10. Requisito de nueva construcción de buques alimentados por GNL para cumplir con las previsiones de consumo de GNL en el sector marino para 2030 - Fuente: Cálculos del autor

*Número aproximado de nuevas construcciones necesarias para satisfacer el 80% del nivel de demanda previsto.

Algunos puntos a tener en cuenta:

- Se están construyendo otros 111 buques preparados para GNL. Estos podrían adaptarse fácilmente para usar GNL, por lo que representan algunas ventajas potenciales.
- Los pronósticos excluyen el consumo de los buques tanque de GNL (ver más abajo).
- No toda la demanda de GNL será satisfecha por el mercado mundial de GNL, ya que una parte se obtendrá de gas licuado local como en Noruega y Dinamarca.

Como se señaló anteriormente, los pronósticos excluyen el consumo de los buques cisterna de GNL y después de 2020 puede tener sentido comercial aumentar la cantidad de combustible utilizado como ebullición en lugar de diésel marino de alto precio.

La Tabla 11 presenta algunas estimaciones muy aproximadas del tamaño potencial de este mercado asumiendo que todos los transportistas de GNL iban a cambiar exclusivamente al uso de GNL. Rogers (2018) ha señalado que la cantidad de combustible utilizado por embarcación variará según la configuración del motor (turbina de vapor o doble combustible) y su velocidad promedio.

La Tabla 11 asume que la flota de GNL crece en línea con el pronóstico de la IEA (2017) y la proporción de buques DFDE crece con el tiempo. Se puede ver que, si todos los transportistas de GNL usaran solo GNL de ebullición, esto por sí solo podría representar alrededor de 17 mtpa de demanda para 2030. Sin embargo, una política de combustible de solo GNL

Año	Buques tanque de GNL		Combustible total consumido en TM de LNGeq
	Flota total	De los cuales DFDE	
2015	478	230	13
2020	550	302	14
2025	600	352	15
2030	750	502	17
2035	850	582	19
2040	950	632	22

Tabla 11. Consumo aproximado de combustible de la flota de buques cisterna de GNL - Fuente: Cálculos del autor derivados de Rogers (2018) suponiendo: 55 toneladas / día de GNL equivalente para DFDE; 115 toneladas / día de GNL equivalente para ST - 300 días de vapor / año a una velocidad media de 16,5 nudos

También hay una serie de factores que podrían reducir las perspectivas a largo plazo para el GNL. Es muy probable que el fuel oil y el gas oil sigan desempeñando un papel importante en el transporte marítimo, especialmente si no se endurecen más las restricciones de la OMI.

Es probable que la industria reconozca que la forma más eficaz de eliminar el azufre es hacerlo en la etapa de refinación y, a medida que haya más LSFO disponible, podría ser muy competitivo con el GNL. Quizás lo más importante es que el GNL no proporciona una solución duradera a largo plazo para el transporte marítimo con bajas emisiones de carbono.

La OMI (2014) informa que las emisiones del transporte marítimo se ubicaron en la región de 1 Gt por año en 2012. Esto equivale a alrededor del 2,3 por ciento de las emisiones globales según un informe de Lloyds Register (2017) que señala que, dada la falta de progreso en la descarbonización, es probable que el transporte marítimo se convierta en una proporción cada vez mayor de las emisiones globales totales con el tiempo.

En abril de 2018, el Comité de Protección del Medio Marino de la OMI (MEPC) estableció un objetivo para reducir el promedio de las emisiones de CO₂ del transporte marítimo internacional en al menos un 50% para 2050.

Al comentar sobre esta decisión, varios estudios señalan que a partir de 2030 es muy poco probable que los nuevos buques oceánicos dependan de combustibles fósiles y las nuevas construcciones en la década de 2020 deberán poder cambiar a combustibles no fósiles más adelante. Este conocimiento también tendrá un impacto en las decisiones tomadas por las aseguradoras y los financiadores de envíos y, por lo tanto, podría restringir severamente el crecimiento en el uso de GNL después de 2030.

Los niveles de crecimiento de las emisiones podrían mitigarse y reducirse con el tiempo mediante la adopción de una gama de tecnologías innovadoras que incluyen baterías, amoníaco, hidrógeno y biocombustibles. Es posible que en algunos mercados se incluya GNL a partir de biogás, aunque hay una variedad de otras opciones de biocombustibles en el mar.

Estos incluyen biodiesel (de aceite de colza o lignocelulosa), biocombustible (de aceite de colza), biohidrógeno y biometanol (ambos de lignocelulosa o biomasa de madera). El GNL todavía tendría un papel que desempeñar, aunque hay dudas sobre si el crecimiento a largo plazo puede sostenerse. Algunos jugadores pueden ver al GNL como una especie de callejón sin salida y decidir quedarse con los combustibles a base de petróleo hasta que una opción totalmente cero carbono sea viable.

6.6. Infraestructura de reabastecimiento de GNL como combustible marino

La falta de infraestructura de reabastecimiento de combustible se ha identificado con frecuencia como una de las principales barreras para el desarrollo de este mercado. PWC (2018) estima que los gastos de inversión para el abastecimiento de combustible son de 30 a 60 millones de euros para una instalación de almacenamiento portuaria con una capacidad de 6.000 a 15.000 metros cúbicos, y de 30 a 40 millones de euros para una barcaza de abastecimiento de combustible con una capacidad de 3.000 a 10.000 metros cúbicos.

Esto puede impedir que los puertos más pequeños proporcionen instalaciones de abastecimiento de combustible marítimo, aunque el reabastecimiento de combustible por carretera seguiría siendo una opción. Los costos de capital para el transporte por carretera son relativamente más bajos en un Euros, estimado 600.000 para una estación de servicio.

Estos desafíos del desarrollo de infraestructura a menudo se conocían como el problema del "huevo y la gallina" por el cual el crecimiento del mercado se veía limitado por la falta de infraestructura de reabastecimiento de GNL y este bajo crecimiento inhibía a su vez las inversiones basadas en el riesgo en la infraestructura necesaria.

Sin embargo, se puede argumentar que es poco probable que esta cuestión sea una limitación importante en el futuro. La evidencia de Europa sugiere que, si hay suficiente potencial de mercado, la provisión de infraestructura será relativamente rápida y casi con certeza superará la acumulación de capacidad de demanda. Esto refleja:

- Las decisiones de cambiar los buques a GNL tienen un tiempo de espera relativamente largo y la infraestructura de reabastecimiento de combustible generalmente puede estar disponible con relativa rapidez, particularmente cuando existen instalaciones de manejo de GNL preexistentes.
- Es poco probable que los propietarios/operadores de buques de nueva construcción alimentados con GNL se comprometan sin tener un contrato de suministro de GNL a largo plazo. Lo más probable es que esto cubra tanto el precio como la entrega física, por lo que los proveedores de GNL se asegurarán de que haya capacidad para entregar en los puntos de reabastecimiento acordados.
- Las instalaciones se pueden construir gradualmente para adaptarse a los niveles probables de demanda. Esto puede implicar comenzar con el reabastecimiento de combustible de los remolques de carretera y cambiar a buques de abastecimiento de combustible a medida que aumenta el nivel de demanda.

- Los puertos están ansiosos por no perder negocios potenciales y, por lo tanto, estarán ansiosos por asegurarse de tener algo de capacidad de GNL, incluso si está infrautilizada a corto plazo. El puerto de Rotterdam es uno de los muchos que están interesados en enfatizar su voluntad y capacidad para manejar el reabastecimiento de GNL.
- Apoyo de los gobiernos para invertir, así como requisitos de algunas autoridades para proporcionar infraestructura como en el caso del proyecto Pasillos Azules de la UE.

La evidencia de Europa apoya esta afirmación. GIE mantiene una base de datos de infraestructura de GNL a pequeña escala 43 enumerar las instalaciones existentes y planificadas, como bunkers, plantas de licuefacción a pequeña escala e instalaciones de almacenamiento de GNL por satélite.

La base de datos ilustra que la presencia de terminales de importación de GNL a gran escala es un factor importante para respaldar el desarrollo de la infraestructura de reabastecimiento de combustible.

A fines de 2017, el 75% de las unidades operativas de pequeña escala se encontraban en países con importantes terminales de regasificación (GIE, 2018). Aquellos países con tales instalaciones (por ejemplo, Francia, Italia, España y el Reino Unido) vieron un aumento en las instalaciones a pequeña escala del 133 por ciento desde junio de 2016 hasta el final 2017.

La Tabla 12 resume la posición más reciente para Europa.

Instalaciones	Existente	En construcción	Planificado
Terminales de GNL con:			
➤ Recarga de GNL a pequeña escala	15	10	12
- Carga de camiones	25	7	7
- Carga ferroviaria	n/a	n/a	5
Plantas de licuefacción	21	n/a	4
Instalaciones de abastecimiento de combustible para buques	39	12	12
Estaciones de repostaje para camiones	167	8	63
Buques búnker	11	1	6
Almacenamiento satelital de GNL	>1000	n/a	n/a

Tabla 12. Infraestructura de repostaje de GNL en Europa - Fuente: GIE

Un aspecto interesante del desarrollo de la infraestructura es la construcción de lo que podría denominarse instalaciones de licuefacción basadas en el mercado, en las que el gas de la red se licúa específicamente para satisfacer las necesidades que el transporte demanda.

Parte de esta planta se construyó hace algún tiempo como instalaciones de afeitado máximo, aunque los ejemplos más recientes incluyen:

- Noruega: hay siete plantas de licuefacción, incluida la planta de 300.000 toneladas métricas / año operada por Skangas en Risavika y la planta de 200.000 toneladas métricas / año operada por Gasnor en Snurrevarden (Karmøy).
- En Dinamarca, Unioil ha anunciado planes para construir una planta de licuefacción con biogás en el puerto de Frederikshavn.
- El puerto de Jacksonville está construyendo dos instalaciones de licuefacción a pequeña escala capaces de producir 320.000 galones / día de GNL.
- American Gas & Technology tiene como objetivo proporcionar estaciones de reabastecimiento de GNL dedicadas para los operadores de flotas comerciales que utilizan gas de una red de distribución local. Los clientes deberán comprometerse a un acuerdo de compra o pago a largo plazo con un descuento del precio de mercado del diésel que incluirá los costos de capital y operativos de la instalación y el costo de conversión del vehículo a GNL.

El desarrollo de la infraestructura será un componente clave para permitir aplicaciones terrestres para el GNL y esto se considera brevemente en el próximo capítulo.

7. Evaluación de los combustibles (Well - To - Propeller)

Los combustibles alternativos pueden contribuir significativamente a reducir la huella de carbono del transporte marítimo. Para poder comentar sobre la sostenibilidad de los combustibles, se requieren datos cuantitativos para poner las cosas en perspectiva. [13]

Esto se puede hacer mediante la realización de evaluaciones del ciclo de vida (LCA) de los combustibles marinos, que permiten la comparación entre diferentes rutas de combustibles a lo largo de la cadena de valor de la energía. Los resultados de un LCA se pueden utilizar para evaluar la huella ambiental de cada combustible. Este tipo de evaluaciones son complejas y los escenarios elegidos influyen en gran medida en los resultados.

Mientras que los ACV de combustibles alternativos para el sector de la automoción, o los denominados estudios Well-To-Wheel se han realizado desde hace mucho tiempo los ACV de combustibles alternativos para el sector del transporte marítimo, o los estudios denominados Well- To-Propeller (WTP) son relativamente nuevos. Esto se debe en parte al reciente enfoque en las emisiones de GEI de las actividades de transporte marítimo y las próximas regulaciones más restrictivas sobre la calidad del aire y los GEI.

Entre los estudios recientes de WTP disponibles se encuentran los realizados en la Universidad Tecnológica de Chalmers, para HFO, MGO, GTL FT diésel, LNG y LBG, en TNO para LNG, HFO, MGO / MDO y EN590, así como el modelo de Análisis de Emisiones y Energía Total de WTP para el Modelo de Sistemas Marinos (TEAM) del Instituto de Tecnología de Rochester para Aceite Residual, diésel convencional, diésel bajo en azufre, GNC, GTL, FT diésel y biodiésel de soja. Los resultados de estos estudios muestran que existen posibilidades de reducir las emisiones de GEI desde la perspectiva del ciclo de vida, dependiendo de la elección del combustible.

Algunos combustibles, como el GNC o el diésel FT, podrían, dependiendo de sus métodos de producción, ser peores que el diésel convencional en lo que respecta a las emisiones de gases de efecto invernadero. El actual estudio Well-To-Propeller de combustibles alternativos para el transporte marítimo evalúa los posibles impactos climáticos de los sistemas de combustibles alternativos en todas las etapas de su ciclo de vida, desde los pozos de petróleo y gas (o desde la agricultura) hasta la hélice.

Los límites del sistema y los combustibles estudiados

Los límites del sistema incluyen el ciclo de producción de combustible y el uso de combustible a bordo del buque. Los combustibles considerados en este informe, así como los escenarios para cada combustible se resumen en la Tabla 1. Se hacen los siguientes supuestos:

- Los límites entre lo el sistema tecnológico y el sistema del mundo natural comienzan en el punto de extracción de los hidrocarburos y materias primas. La etapa final es la combustión del combustible.
- Los límites geográficos del sistema varían dependiendo de la cadena de valor del combustible. Por lo general, incluyen escenarios con combustible extraído y producido en ubicaciones remotas y transportado miles de kilómetros al mercado relevante.
- Los límites cronológicos son inmediatos a los de corto plazo, con tecnologías y escenarios factibles hoy o en los próximos 5 años. El análisis WTP se lleva a cabo para evaluar los impactos actuales de los combustibles alternativos existentes. Las tecnologías especulativas y los escenarios inverosímiles se han evitado en la medida de lo posible.

Durante el inventario del ciclo de vida, el único producto considerado son las emisiones de GEI (cantidad de CO₂ equivalente), normalizado con el contenido energético del combustible (Mega Joule de combustible - 1 MJf).

La contribución de varios GEI, para diferentes horizontes temporales, se puede tener en cuenta convirtiéndola en emisiones de CO₂ equivalente, aquí en gramos (gCO₂eq), como se presenta en la Tabla 2 en este estudio, la evaluación del ciclo de vida se limita al potencial de calentamiento global, con un horizonte de 100 años (GWP100).

Campos estudiados	Escenarios y límites del sistema*
HFO, MGO, MDO y diésel con bajo contenido de azufre	Petróleo crudo transportado desde la región petrolera a Europa (8000 km), refinado y distribuido allí.
GNL	<ul style="list-style-type: none"> ➤ GNL producido en tierra en Qatar y transportado a Europa a través de un transportista de GNL. ➤ Instalaciones de FLNG en la costa de Australia y transporte de GNL al mercado a través de un transportista de GNL a 10000 km de distancia.
GNC	El gas licuado se canaliza desde Rusia a Europa (7000 km), donde se comprime utilizando la combinación de electricidad de la Unión Europea.
GLP	GLP como subproducto de la producción remota de gas natural y enviado a Europa (10000 km) a través de un transportista de gas.
Metanol	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Metanol producido cerca de un campo de gas natural remoto y transportado a Europa en camión cisterna de metanol (10000 km). ➤ Metanol producido a partir de licor negro y transportado a Europa.
Etanol	Etanol producido a partir de caña de azúcar en Brasil y enviado a Europa (10000 km).
DME	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DME producido cerca de un campo de gas natural remoto y enviado a Europa a través de un transportista de gas ➤ DME producido mediante gasificación de licor negro cerca de una planta de celulosa y transportado a Europa.
FT diésel	Planta de diésel FT cerca de un campo de gas natural remoto y transportado al mercado con un camión cisterna especializado.
Biodiesel	Producción europea de aceite de colza y producción de biodiesel en la zona.
Petróleo crudo vegetal	Producción de aceite de colza y utilizado directamente como combustible.
Biogás licuado	Biogás producido en Europa a partir de residuos municipales y licuado in situ
Propulsión nuclear	Suministro de combustible nuclear (U238) y su uso a bordo
Hidrógeno líquido	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Hidrógeno líquido a partir de energías renovables y distribuidas en la zona. ➤ Hidrógeno líquido procedente del reformado del gas natural ruso.

Tabla 13. Límites del sistema en los combustibles alternativas - Fuente: DNV

*La mayoría de las rutas marítimas de este estudio suponen una distancia de unos 10.000 km, a menos que se indique lo contrario.

Emisiones	Potencial de calentamiento global para un Horizonte temporal dado.		
	20 años	100 años	500 años
CO₂			
Biogás licuado	1	1	1
Propulsión nuclear	72	25	7.6
Hidrógeno líquido	289	298	153

Tabla 14. Potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero considerados en este informe, en relación con el CO₂ - Fuente: DNV

Las emisiones de GEI asociadas con la combustión de combustibles renovables no se contabilizan en el balance total de GEI. Esta es una práctica estándar en evaluaciones de ciclo de vida publicadas similar.

Los resultados WTP y de tanque a hélice para las emisiones de GEI en gCO₂eq / MJf relacionados con las diferentes vías para los combustibles alternativos de transporte marítimo considerados aquí se muestran en la Figura 3.

Se observa que para el GNL los cálculos se han realizado asumiendo un motor de combustible dual de 4 tiempos, lo que da como resultado una cierta cantidad de deslizamiento de metano, reduciendo así sus beneficios de GEI. Se espera que cuando se use GNL en motores modernos de 2 tiempos, se elimine el deslizamiento de metano, lo que lleva a reducciones más fuertes de GEI.

Algunos de los combustibles considerados parecen muy atractivos desde el punto de vista de las emisiones de GEI; sin embargo, es importante recordar que no todos los combustibles son iguales en cuanto a cuánto cuestan a los precios actuales del mercado. Muchos combustibles alternativos pueden ser competitivos en términos de precios con el diésel bajo en azufre.

El GNL parece ser el más atractivo en cuanto a precio, pero los costos de modernización o compra de nuevos tanques y motores de GNL no son insignificantes y deben tenerse en cuenta. Un combustible caro puede ser más adecuado para su uso en otros sectores, como el de la automoción, donde las condiciones del mercado podrían hacerlo más atractivo.

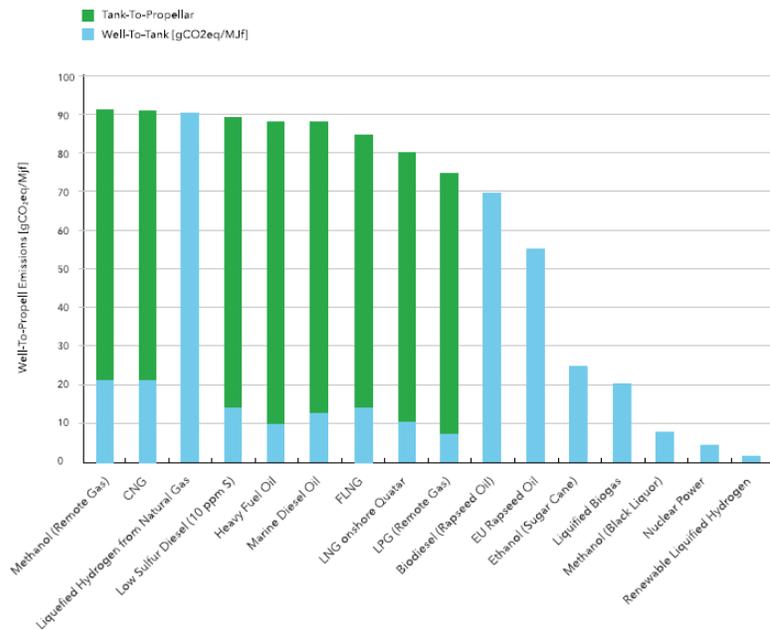


Figura 16. Resultados de las emisiones de GEI de WTP para combustibles alternativos marinos - Fuente: DNV



Figura 17. Ingeniero ensayando – Fuente: Google imágenes

7.1. Incertidumbres

Existen muchas fuentes de incertidumbre para cada uno de los combustibles considerados. Estos están relacionados con diferencias en los límites fronterizos (producción de combustible y combustión / uso de combustible a bordo de un buque) y con diferencias en la cadena de valor (diferentes métodos de producción, transporte y distribución).

Aquí se proporcionan algunos ejemplos específicos de incertidumbres para WTT:

- Para los combustibles a base de aceite de colza, los gases de efecto invernadero las emisiones están dominadas por el paso de producción de semillas, principalmente a través de las emisiones de N_2O . Esto se debe en gran parte al hecho de que los cultivos de colza requieren una gran cantidad de fertilizantes a base de nitrógeno, cuyas emisiones relacionadas son muy inciertas. Esto puede dar lugar a variaciones de -7% a + 43% en las emisiones de GEI WTT.
- Para materia prima a base de madera, el fertilizante y las necesidades de energía son menores, por lo que la incertidumbre se reduce a -5% de variación en las emisiones de WTT para DME de licor negro.
- Para procesos relacionados con el petróleo y el gas, cuando la electricidad se produce in situ, como en el caso de la licuefacción, los datos del proceso están mejor documentados y no están sujetos a una gran incertidumbre.
- En el caso de procesos futuros o de vanguardia como Tecnología GTL, la incertidumbre WTT para las emisiones totales de GEI está en el rango de -10% a + 15%.

La incertidumbre relacionada con la combustión (Tank To Propeller) de los combustibles alternativos es baja; sin embargo, diferentes tipos de motores (2 tiempos frente a 4 tiempos) pueden conducir a resultados finales diferentes. El trabajo adicional que utilice diferentes sistemas de propulsión y perfiles operativos, incluidos los sistemas híbridos, podría dar lugar a mayores variaciones en los resultados.

Teniendo una visión más amplia

Se puede realizar una comparación más completa si se incluye en la evaluación del ciclo de vida el equipo necesario para producir y utilizar los combustibles considerados. Un ejemplo podría ser la huella medioambiental de producir y desechar una pila de combustible, en comparación con un motor de combustión interna.

Se han llevado a cabo algunos ACV para aplicaciones de pilas de combustible marines. Aunque la tecnología de pilas de combustible es relativamente nueva y los volúmenes de producción son bajos, en comparación con los motores de combustión interna, las LCA muestran que las pilas de combustible pueden ser competitivas desde el punto de vista de las emisiones de GEI.

Además, se deben considerar más emisiones contaminantes (NOx, SOx, PM) y otros efectos secundarios del uso de combustibles alternativos (como el uso de la tierra y el cambio de uso de la tierra, el uso de fertilizantes, etc.).

Algunos estudios han desarrollado una metodología para realizar un ACV, que incluye una serie de indicadores. Esta metodología introduce el concepto de un ACV integrado para facilitar la integración del diseño basado en el riesgo y el diseño ecológico de los buques.

Para que esto sea eficiente, se propone monetizar los valores de todos los indicadores relevantes de dichas evaluaciones. Se han identificado los indicadores de dimensionamiento correspondientes al diseño de buques y se han propuesto valores reales para monetizar los distintos indicadores, es decir, convertir eficientemente todos los indicadores al denominador común.

Un ejemplo de esta metodología se muestra en la Figura 18.

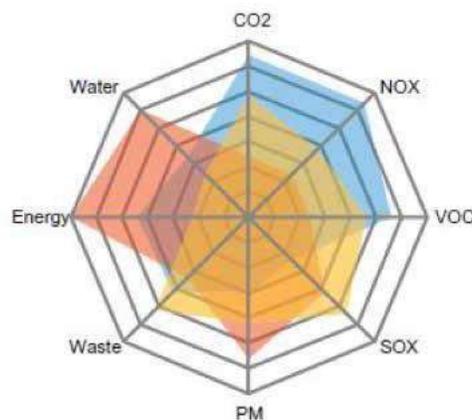


Figura 18. Resultados de un LCA (Diagrama de araña) – Fuente: DNV

Una preocupación importante al considerar los combustibles alternativos está relacionada con la disponibilidad de combustible y la seguridad del suministro.

Según la US EIA International Energy Outlook actualmente se utilizan 2.500 millones de toneladas de petróleo en el sector del transporte, y el resto se utiliza para la generación de energía y la industria petroquímica.

Es obvio a partir de la Tabla 15 que la mayoría de los combustibles alternativos no se producen en volúmenes suficientes para su aplicación a gran escala en el transporte marítimo. Esto significa que inicialmente se podrían utilizar varios combustibles alternativos diferentes para el transporte marítimo de corta distancia en los mercados locales, donde se puede garantizar el suministro a largo plazo.

Esto también ofrece una forma relativamente económica de probar estos combustibles en embarcaciones pequeñas. Un ejemplo representativo reciente es el plan de Stena Line para utilizar metanol como combustible para los transbordadores que operan cerca de Suecia.

Sin embargo, es muy improbable que cualquier combustible nuevo sea introducido en los buques, si no se cuenta con una infraestructura de suministro global.

Combustible	Consumo total (millones de TOE/año)	Consumo para transporte marítimo (millones de TEP/año)
Petróleo	4028	>> 330 HFO/MDO: >>280/50
Gas natural	2858 de los cuales, entre 250 y 280 son GNL	0
GLP	275	0
Etanol	58	0
DME	>> 3 – 5	0
Fischer-Tropsch	15	0
Biodiesel	18 – 20	0
Biogás licuado	Muy bajo	0
Nuclear (uranio)	626	Muy bajo
Hidrógeno	Muy bajo	0
Metanol	23	0
Aceite de colza	5	0

Tabla 15. Volúmenes de consumo mundial de diversos combustibles. Todas las cifras están en Toneladas Equivalentes de Petróleo (TOE) - Fuente: BP

8. Visión para el futuro

La introducción de cualquier fuente de energía alternativa se llevará a cabo a un ritmo muy lento inicialmente a medida que las tecnologías maduren y se disponga de la infraestructura necesaria. Además, lo más probable es que la introducción de cualquier combustible nuevo se lleve a cabo primero en regiones donde el suministro de combustible será seguro a largo plazo.

Debido a la incertidumbre relacionada con el desarrollo de la infraestructura adecuada, los nuevos transportadores de energía se utilizarán primero en buques de corta distancia más pequeños. A medida que las tecnologías maduran y la infraestructura comienza a desarrollarse, cada nuevo combustible se puede utilizar en embarcaciones más grandes y, eventualmente, en embarcaciones oceánicas, siempre que se disponga de infraestructura global.

En la actualidad, el GNL representa el primer combustible alternativo y más probable que se considere un reemplazo genuino del HFO para los buques construidos después de 2020. La adopción del GNL estará impulsada por la evolución del precio del combustible, la tecnología, la regulación, la mayor disponibilidad de gas y el desarrollo de la infraestructura adecuada.

La introducción de baterías en los barcos para ayudar a la propulsión y las demandas de energía auxiliar también es una fuente de energía prometedora con bajas emisiones de carbono. Los tipos de barcos involucrados en operaciones transitorias frecuentes (como posicionamiento dinámico, maniobras frecuentes, etc.) pueden beneficiarse más de la introducción de baterías a través de una configuración híbrida.

Además, los dispositivos de almacenamiento de energía se pueden utilizar en combinación con los sistemas de recuperación de calor residual para optimizar el uso de la energía a bordo. El planchado en frío podría convertirse en un procedimiento estándar en muchos puertos del mundo.

El ritmo de desarrollo de otros combustibles alternativos, en particular los biocombustibles producidos a partir de biomasa residual disponible localmente, se acelerará y pronto podrá complementar el GNL y los combustibles a base de petróleo.

De hecho, es probable que varios biocombustibles diferentes estén disponibles en diferentes partes del mundo después de 2030. Sin embargo, la aceptación de los biocombustibles en el transporte de aguas profundas solo puede tener lugar si estos combustibles pueden producirse en grandes volúmenes y a un precio competitivo en todo el mundo.

Las aplicaciones marítimas para las energías renovables (solar, eólica) ciertamente continuarán desarrollándose, pero no está claro si estos tendrían un impacto significativo en las emisiones de carbono. No es probable que la energía nuclear sea un combustible alternativo preferido más allá de unos pocos segmentos de nicho, por lo que no se espera que desempeñe un papel importante en la reducción de las emisiones de carbono.

Sin embargo, en el caso de que el impacto del cambio climático se eleve a un nivel en el que las reducciones requeridas en las emisiones de GEI sean sustancialmente mayores, estas tecnologías podrían desempeñar un papel.

Hay muchas soluciones posibles para mejorar la sostenibilidad del transporte marítimo en el futuro, pero todavía existen importantes barreras tecnológicas. Es muy probable que en el futuro haya una combinación de combustibles más diversa en la que el GNL, los biocombustibles, la electricidad renovable y tal vez el hidrogeno desempeñen un papel importante.

La electrificación y el almacenamiento de energía permiten utilizar una gama más amplia de fuentes de energía. La energía renovable, como la eólica y la solar, se puede producir y almacenar para su uso en barcos, ya sea en baterías o como hidrógeno.

Además de las reglas de la OMI y las normas ISO, es necesario el desarrollo de reglas y prácticas recomendadas apropiadas para la implementación segura de cualquiera de estas tecnologías en el futuro. Para lograr esto, el papel de las Sociedades de Clases será crucial.

Es probable que la adopción de nuevas tecnologías sea una posición incómoda para los armadores. Para garantizar la confianza de que las tecnologías funcionarán según lo previsto, es probable que también se utilice más ampliamente la calificación de tecnología de terceros neutrales, como las sociedades de clasificación.

J. Sterling, Director de Clima y Medio Ambiente de Maersk Line: *“La industria del transporte marítimo necesita reducir drásticamente el efecto invernadero intensidad del gas en las próximas décadas. A corto plazo, podemos ganar mucho si nos concentramos en mejorar la eficiencia energética. A más largo plazo, digamos 15 años o más, nos gustaría que los biocombustibles sostenibles se convirtieran en un combustible bajo en carbono disponible comercialmente”.*



Figura 19: Campo de aerogeneradores – Fuente: Google imágenes

9. Conclusiones

No hay duda de que el creciente interés mostrado por el GNL como combustible marino está justificado. El nivel de uso seguramente crecerá, impulsado tanto por las restricciones ambientales como por el atractivo económico.

Sin embargo, hay menos certeza sobre el ritmo y la escala del crecimiento de la demanda. Esto se debe en parte a la calidad relativamente pobre de los datos sobre el uso de combustibles marinos, pero principalmente a un reflejo de la naturaleza aún temprana del desarrollo del mercado y las incertidumbres sobre las opciones de combustibles alternativos.

La experiencia hasta la fecha sugiere que la adopción de GNL es más probable cuando se presentan algunas o todas las siguientes condiciones:

- Los buques operan principal o exclusivamente en áreas sujetas al límite de la OMI de azufre del 0,1 por ciento.
- Los buques son grandes y los costos de combustible representan una alta proporción de los costos operativos.
- Los buques tienen patrones de viaje regulares y predecibles. Los operadores también son propietarios de sus embarcaciones.
- Los buques siguen rutas que permiten un fácil acceso a las instalaciones de abastecimiento de combustible de GNL.
- Hay un nivel relativamente alto de rotación de buques, en otras palabras, una alta frecuencia de nuevas construcciones o reacondicionamientos importantes.
- Existe un nivel relativamente alto de demanda de energía auxiliar.
- Hay altos niveles de apoyo gubernamental para nuevas inversiones que favorezcan el GNL.

Estas condiciones indican que hay algunos sectores de transporte que probablemente sean más prometedores para el GNL que otros.

Por ejemplo, transbordadores ro-ro, cruceros, graneleros, grandes buques portacontenedores y, por supuesto, buques cisterna de GNL. Debido a los costos de la modernización, la mayoría de los barcos alimentados con GNL serán de nueva construcción y es poco probable que los propietarios / operadores se comprometan sin firmar un contrato de suministro a largo plazo que cubra tanto el precio como la entrega física.

Los proveedores de GNL que estén dispuestos a celebrar dichos contratos proporcionarán un estímulo importante al mercado. Los tiempos de espera involucrados y el costo de capital relativamente bajo de la infraestructura sugieren que es poco probable que la capacidad de reabastecimiento de combustible sea una limitación. La mayoría de los pronósticos sugieren que la demanda global debería estar en el rango de 25 a 30 mtpa de GNL para 2030.

Esto requeriría que, muy aproximadamente, entre 2.000 y 6.000 buques nuevos o convertidos serían alimentados con GNL para entonces. Alcanzar una flota de este tamaño parecería un desafío en el nivel actual de nuevas construcciones.

Por lo tanto, se considera que un nivel de demanda de alrededor de 15 mtpa para 2030 es una perspectiva más realista.

Sin embargo, esta perspectiva podría cambiar rápidamente si varias grandes compañías navieras se comprometieran con el GNL. Todos estos pronósticos excluyen a los transportistas de GNL. Si todos estos se cambiaran exclusivamente a GNL, esto por sí solo podría representar alrededor de 17 mtpa de demanda para 2030. Sigue habiendo una serie de posibles obstáculos para la adopción. Estos incluyen el continuo excedente de capacidad de envío en muchos sectores, la incertidumbre sobre los precios futuros del petróleo y el gas y los desafíos logísticos.

Sin embargo, quizás lo más importante es que el gas no es una solución de carbono cero. Dada la presión continua sobre el sector marino para mejorar su huella ambiental, los propietarios de barcos pueden verse tentados a esperar a que surjan nuevas opciones con menos emisiones de carbono, como baterías y biocombustibles.

El uso de biogás como fuente de GNL es una posibilidad, aunque probablemente existen opciones de biocombustibles más realistas que serían preferibles. Donde hay ejemplos de biogás en la cadena de suministro de transporte, por ejemplo, automóviles y camiones alimentados con GNC, es necesario un apoyo estatal significativo.

El GNL es una respuesta a algunos de los problemas a los que se enfrenta el transporte marítimo. Es demasiado pronto para decir si es la respuesta. Hasta la fecha, solo una pequeña cantidad de los principales operadores de transporte marítimo se han comprometido claramente a construir buques de nueva construcción alimentados con GNL.

Si otras grandes empresas comienzan a seguir su ejemplo, será una indicación clave de que el GNL será un combustible importante en el transporte marítimo durante los próximos veinte años.

10. Bibliografía

- [1]Bureau Veritas. Un transporte marítimo sostenible. [Página consultada el 6 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://www.bureauveritas.es/magazine/un-transporte-maritimo-sostenible-para-un-planeta-sostenible>
- [2]OMI. Convenios Internacionales para la prevención de la contaminación. [Página consultada el 8 de marzo de 2021].
Disponible en: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx#:~:text=El%20Convenio%20MARPOL%20fue%20adoptado,ocurridos%20entre%201976%20y%201977.](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx#:~:text=El%20Convenio%20MARPOL%20fue%20adoptado,ocurridos%20entre%201976%20y%201977.)
- [3] Legislación Europea sobre la contaminación marítima. [Página consultada el 11 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/ALL/?uri=CELEX:32016L2284>
- [4]Legislación española sobre contaminación marítima. [Página consultada el 1 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/normativa/normativa-europea.aspx>
- [5]Plan Ribera. [Página consultada el 3 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/default.aspx>
- [6] Legislación marítima sobre prevención de la contaminación. [Página consultada el 4 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-%28MARPOL%29.aspx>
- [7] Áreas de Control de Emisiones. [Página consultada el 7 de abril de 2021]. Disponible en: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2012/2012_noviembre_3537_05.pdf
- [8]Emisiones de CO₂ procedentes de los buques. [Página consultada el 16 de abril de 2021].
Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2019/10/25/co2-emissions-from-ships-council-agrees-its-position-on-a-revision-of-eu-rules/>

- [9] Combustibles marinos alternativos. [Página consultada el 20 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.energias-renovables.com/movilidad/asi-son-los-combustibles-del-transporte-maritimo-20201123>
- [10] ¿Qué es el GNL?. [Página consultada el 6 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.ham.es/que-es-el-gnl/>
- [11] Límites de contaminación de los buques. [Página consultada el 12 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://theicct.org/>
- [12] Transporte marítimo global. [Página consultada el 16 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.dhl.com/es-es/home/nuestras-divisiones/transporte-global/transporte-maritimo.html>
- [13] Well – To – Propeller. [Página consultada el 19 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719312260>
- [14] Goddard Institute for Space Studies. [Página consultada el 1 de junio de 2021]. Disponible en: <https://www.giss.nasa.gov/>

ANEXO 1. Impacto medioambiental: Cambios de temperatura y gases de efecto invernadero

A pesar de las emisiones de CO₂ más bajas en términos de carga útil por unidad de milla, el comercio y el transporte marítimo es responsable de aproximadamente mil millones de toneladas de emisiones de CO₂ por año, lo que supone aproximadamente un 2,7 % de las emisiones de dióxido de carbono globales totales. [14]

Para mantener la temperatura de la superficie de la Tierra por debajo de los +2 °C críticos, la OMI (Organización Marítima Internacional) está trabajando con métodos alternativos a los combustibles fósiles para reducir las emisiones de CO₂ existentes.

Según el acuerdo general alcanzado por los principales expertos en meteorología del mundo, la temperatura de la superficie de la tierra ha aumentado 0,6 °C en los últimos 100 años. Según el trabajo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la temperatura media de la superficie mundial ha aumentado en 0,74 °C desde finales del siglo XIX, y en el año 2100 estará entre 1,8 °C y 4 °C a menos que se tomen las medidas necesarias. Se estima que habrá un aumento mayor de lo esperado en cualquier periodo de 100 años.

En la economía mundial, la cual está en proceso de globalización, la necesidad de transporte aumenta constantemente, y como resultado de la dependencia de los combustibles fósiles, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero provoca muchos impactos ambientales como el calentamiento global, el cambio climático y la acidificación de los océanos.

El modo de transporte más respetuoso con el medio ambiente por unidad de carga transportada por tonelada de gas por tonelada es el transporte marítimo.

Sin embargo, debido al hecho de que el 90% de la demanda comercial global del comercio mundial se ha realizado por mar y la creciente demanda comercial mundial también aumenta la demanda del transporte marítimo en los siguientes años, las limitaciones y sanciones sobre el carbono, las emisiones de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero provocadas por el hombre, así como de otros sectores, tienen la necesidad de tomar el control y es necesario que salgan a la luz.

Hasta el año 2050, si no se aplica ningún control de emisiones y no se establecen políticas de mitigación, los escenarios de emisiones a medio plazo de la OMI predicen que, en 2050, las emisiones de los buques aumentarán del 150% al 250% como resultado del crecimiento del comercio mundial.

Se prevé que el comercio mundial representará el 6% del total del dióxido de carbono mundial al superar los 1,4 millones de toneladas para el año 2022 y aumentar las emisiones de CO₂ de origen marítimo en consonancia con el aumento de las capacidades de transporte en un 90% y el aumento de las capacidades de transporte. Como resultado del estudio realizado sobre un enfoque estadístico sobre el consumo de combustible y las emisiones de la flota de comercio marítimo, se informó que las emisiones antropogénicas globales totales eran del 2,7% de CO₂, 11% NO_x y 2% SO_x.

Como se indica en el informe de las Naciones Unidas preparado en el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de 2007 en París, el informe de la ONU declaró que el mundo será un lugar más cálido en el año 2100; el aumento de las temperaturas y sus posibles efectos se enumeran a continuación.

- +2,4 grados: Comenzará la escasez de agua y en América del norte las tormentas de arena pueden destruir cierta parte de la agricultura. El nivel del mar aumentará y aproximadamente 10 millones de personas en Perú sufrirán escasez de agua. Los arrecifes de coral desaparecerán. El 30% de las especies del planeta estarán en peligro de extinción.
- +5,4 grados: El nivel del mar será de 70 metros. Las existencias de alimentos del mundo se agotarán.
- +6,4 grados: Comienzan las migraciones. Cientos de millones de personas caerán en las rutas migratorias con la esperanza de vivir en unas condiciones climáticas adecuadas.

Para reducir el calentamiento global, las emisiones de dióxido de carbono de los buques comerciales deben reducirse urgentemente.

Aunque la OMI define claramente las reglas para los dióxidos de azufre emitidos por la maquinaria de los barcos, las reglas para el dióxido de carbono aún están en desarrollo. La razón principal es que las reglas relacionadas con los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno se deben a sus efectos negativos sobre la salud de las personas que viven en el entorno cercano; es decir, en las regiones costeras, pero las reglas sobre su emisión al medio ambiente global, tales como dióxido de carbono, no se priorizan.

Sin embargo, a pesar de que el dióxido de azufre ha permanecido en la atmósfera durante unos 10 días y el clima global ha respondido y reparado durante muchas décadas, el dióxido de carbono se ha recuperado durante cientos de años y la atmósfera se ha vuelto vieja.

Como el porcentaje de azufre en la atmósfera es bajo, el dióxido de azufre combinado con el agua de la lluvia desciende a la tierra en forma de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Sin embargo, dado que el contenido de CO_2 en la atmósfera es mucho más alto que el del sulfuro, se necesita mucha más lluvia y tierra para reducir la cantidad de CO_2 en la atmósfera como el ácido carbónico (H_2CO_3) a la tierra, en este contexto se necesitan cientos de años para limpiar la atmósfera.

Los gases de efecto invernadero naturales más importantes son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el monóxido de diazot (N_2O) y la troposfera (ozono (O_3)) gases en la estratosfera, que es la principal contribuyente de vapor de agua (H_2O).

El aumento observado de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero en la atmósfera ha continuado desde la revolución industrial. Especialmente, considerando el tiempo de acumulación y residencia en la atmósfera, el CO_2 emerge entre estos gases de efecto invernadero. De los gases más importantes que causan el efecto invernadero, el dióxido de carbono es el más abundante y dominante.

El nivel de acumulación de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera ha aumentado rápidamente desde la revolución industrial.

El aumento de la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera ha llevado al uso de combustibles fósiles, la deforestación y otras actividades humanas. El crecimiento económico y el crecimiento de la población han acelerado aún más este proceso.

El dióxido de carbono (CO_2) ha alcanzado el valor más alto de los últimos 420000 años e incluso de los últimos 20 millones de años con un valor de aproximadamente 375 ppm (partes por millón).

En el caso de que los aumentos en las emisiones de CO_2 inducidos por el hombre se mantengan al ritmo actual, se proyecta que la acumulación de CO_2 , que fue de alrededor de 280 ppm en el periodo preindustrial, 368 ppm en el año 1998 y de 375 ppm en el año 2007, alcanzará las 500 ppm para finales del siglo XXI.

Estos aumentos en las acumulaciones de gases de efecto invernadero debilitan la eficiencia de enfriamiento de la tierra a través de la radiación de onda larga, lo que resulta un forzamiento radiactivo positivo para calentar aún más la tierra.

Esta contribución positiva al equilibrio energético de la tierra y el sistema atmosférico se denomina fortalecimiento del efecto invernadero. Es decir, el efecto invernadero natural, que funciona desde hace cientos de millones de años con la ayuda de los gases de efecto invernadero naturales (H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O y O_3) en la atmósfera terrestre, en otras palabras.

La magnitud del calentamiento global, que puede ser causado por el fortalecimiento del efecto invernadero, depende de la extensión del aumento en la acumulación de cada gas de efecto invernadero, las propiedades radiactivas de estos gases, la vida útil atmosférica y la acumulación de otros gases de efecto invernadero en el país.

La temperatura media de la superficie terrestre cerca de la atmósfera aumentó $0,6 (\pm 0,2) ^\circ\text{C}$ en el siglo XX. La opinión científica generalizada sobre el cambio climático es que el aumento de la temperatura durante los últimos 50 años tiene efectos notables en la vida humana, y se indica en las siguientes figuras.

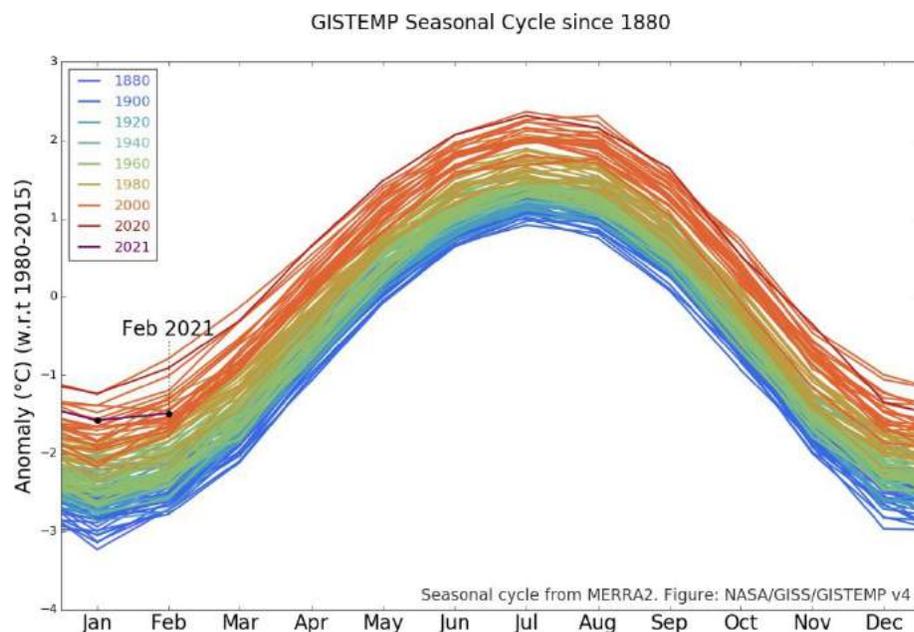


Figura 20. Ciclo estacional GISTEMP - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies).

Derivado del re análisis de MERRA-2 (Análisis retrospectivo de la era moderna para investigación y aplicaciones, versión 2) durante el periodo 1880-2021, esta figura muestra cuánto más cálido es cada mes, basándose en los datos de GISTEMP, que la media global anual.

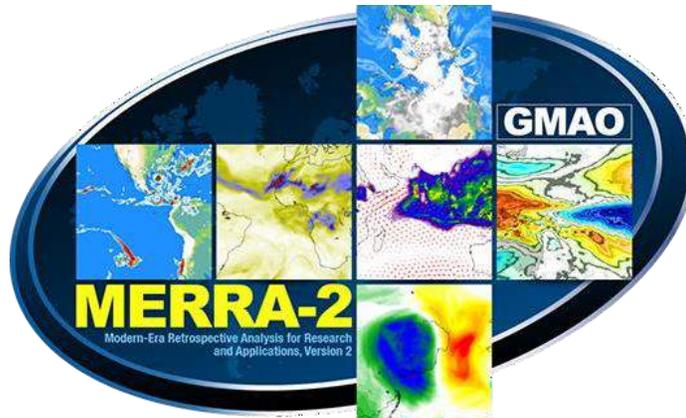


Figura 21. MERRA-2 – Fuente: NASA

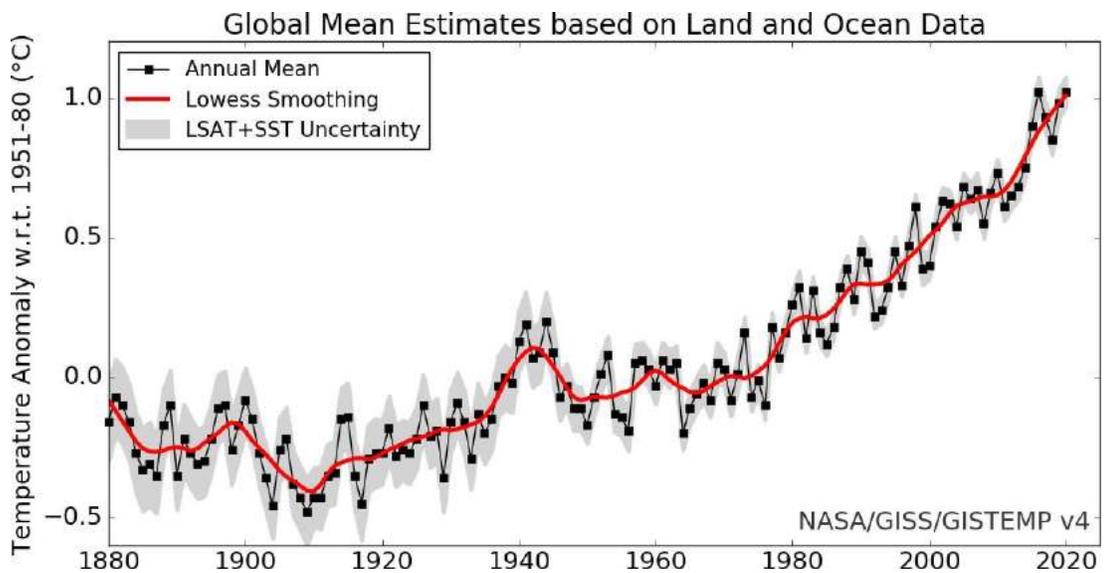


Figura 22. Estimaciones medias globales basadas en datos terrestres y oceánicos - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies

En esta figura observamos el índice de temperatura terrestre-oceánica, des del año 1880 hasta el presente.

La línea negra continua es la media anual global, y la línea roja continua es la media quinquenal más suave. El sombreado gris representa la incertidumbre anual total en un intervalo de confianza del 95%.

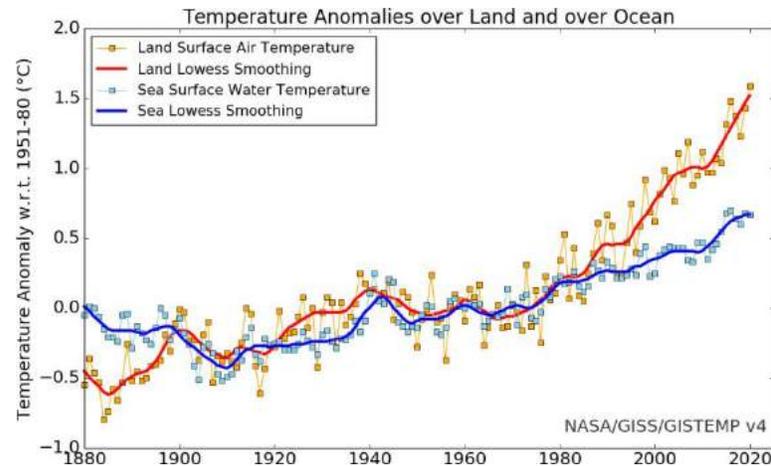


Figura 23. Cambio de temperatura media anual sobre la tierra y el océano - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies

En esta figura podemos observar los cambios de temperatura media anual sobre la tierra y el océano, dónde las líneas finas representan las anomalías de temperatura promediadas des del año 1880 hasta el presente (anualmente), sobre el área terrestre de la Tierra y sobre la parte del océano que está libre de hielo en todo momento (océano abierto).

Las líneas gruesas representan las mismas magnitudes en el rango quinquenal suave.

Las siguientes figuras (Figura 24, Figura 25 y Figura 26) representan los cambios de temperatura anuales (líneas gruesas) y quinquenales más suaves (líneas finas), con el período base 1951-1980, para tres bandas de latitud que cubren el 30%, 40% y 30% del área global.

Las líneas azules (barras de incertidumbre) tienen un límite de confianza del 95% y se basan en un análisis de muestreo espacial. Estas estimaciones utilizan datos terrestres y oceánicos.

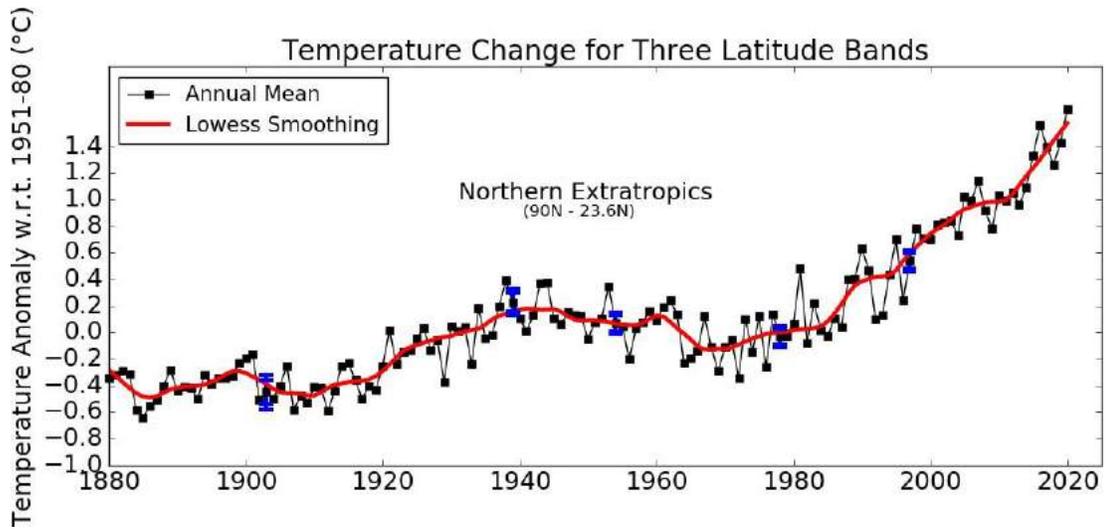


Figura 24. Cambio de temperatura en la zona norte de los trópicos - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies

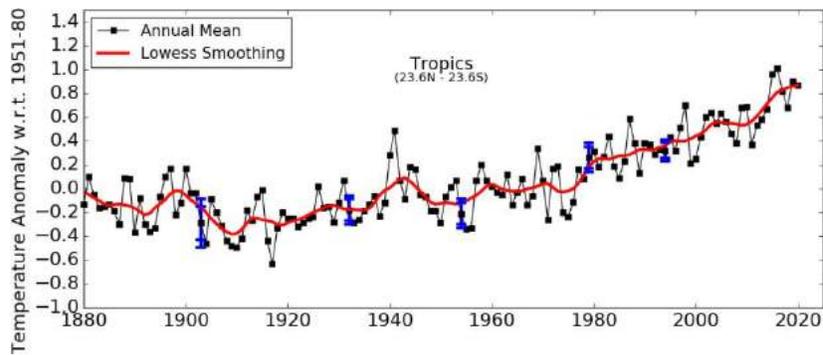


Figura 25. Cambio de temperatura en la zona de los trópicos - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies

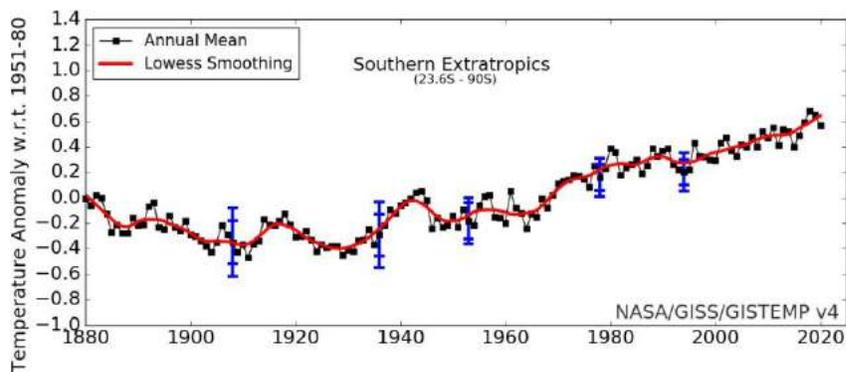


Figura 26. Cambio de temperatura en la zona sur de los trópicos - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies

La figura 27 representa los cambios de temperatura anuales (líneas gruesas) y quinquenales más suaves (líneas finas), para los hemisferios norte (color rojo) y sur (color azul).

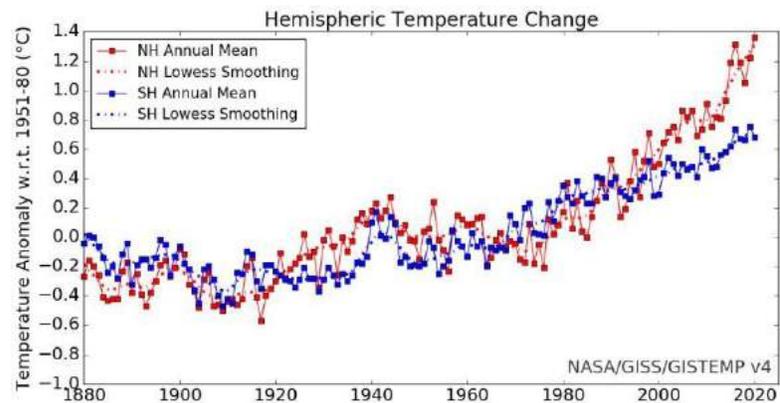


Figura 27: Cambios de temperatura en los hemisferios - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies

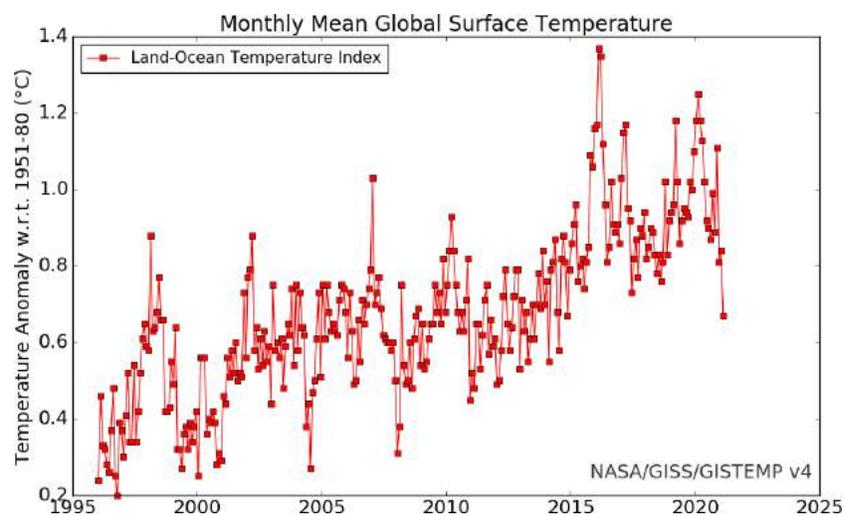


Figura 28. Media mensual de la temperatura media global - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies

La figura 28 representa anomalías de temperatura superficial global mensual. La línea roja muestra estimaciones que utilizan datos de estaciones meteorológicas y datos de temperatura del océano de barcos y boyas.

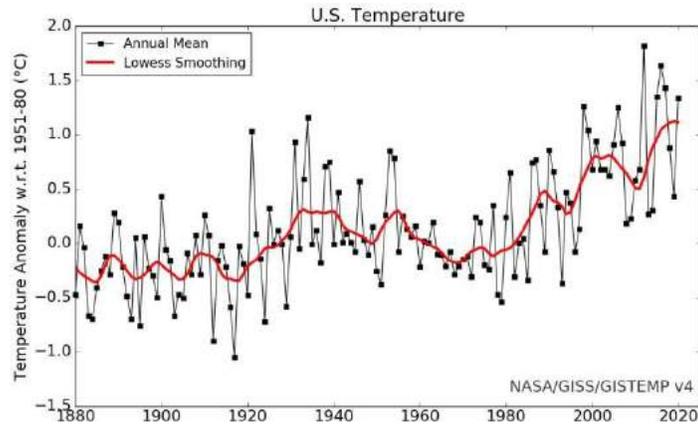


Figura 29. Media de temperatura en los Estados Unidos - Fuente: GISS (NASA): Goddard Institute for Space Studies

La figura 29 representa la temperatura media del aire anuales (línea negra) y quinquenales más suaves (línea roja) en los Estados Unidos (representan el 1,6% de la superficie de la Tierra).

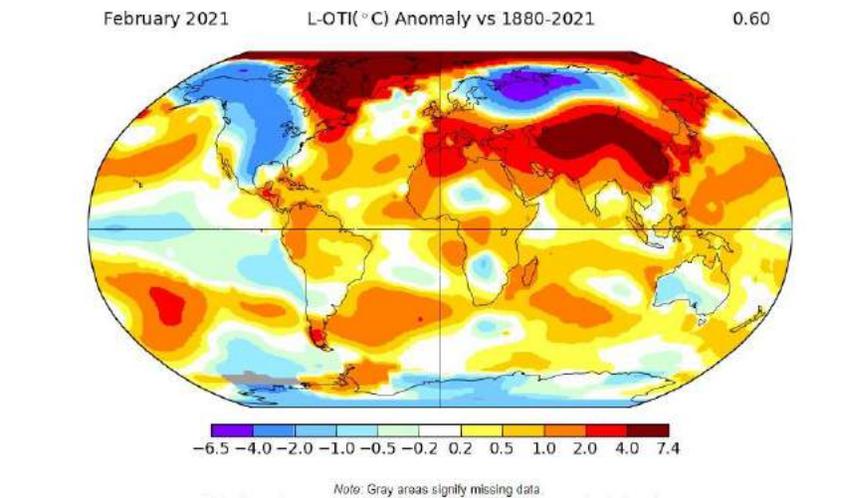


Figura 30. Cambios de temperatura en la Tierra (1880-2021) – Fuente: NASA

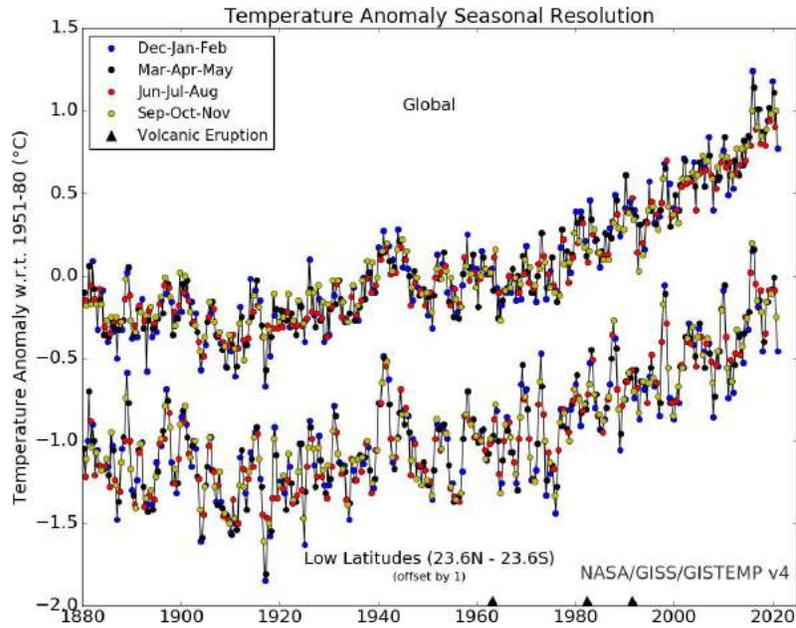


Figura 31. Cambios de temperatura según la estación del año – Fuente: NASA

En la figura 31 se representan los cambios de temperatura des del año 1880 hasta el año 2020, dónde los puntos azules representan el invierno, los puntos negros representan la primavera, los puntos rojos representan el verano y los puntos amarillos representan el otoño. Este gráfico se basa en los datos tomados en las latitudes bajas de la Tierra.

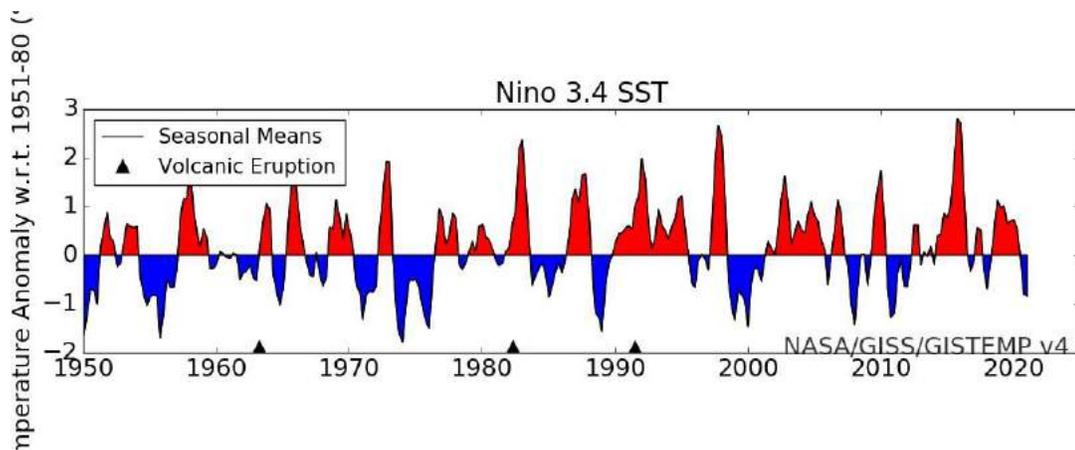


Figura 32. Cambios de temperatura de El Niño – Fuente: NASA

Los triángulos negros representan erupciones volcánicas. Estas erupciones tuvieron lugar en marzo del año 1963, abril del año 1982 y junio del año 1991.

ANEXO 2. Amoníaco como combustible marítimo

El amoníaco, también llamado gas de amonio o formulado como trihidruro de nitrógeno, es un compuesto químico que habitualmente relacionamos con la limpieza por su potente poder desengrasante. Sin embargo, sus peculiares características sitúan al amoníaco como un potencial combustible eficiente para buques y embarcaciones, aunque a día de hoy sigue siendo testado por investigadores de navieras alrededor del mundo.

La creciente preocupación por el avance del cambio climático afecta ya a todas las industrias. Mientras que buena parte de grupos ecologistas consideran el famoso Acuerdo de París contra el calentamiento global como insuficiente, muchos sectores están viviendo una transición energética sin precedentes.

La Organización Marítima Internacional (OMI) adoptó en 2018 dos medidas obligatorias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de los buques, en virtud del tratado para prevenir la contaminación del mar (Convenio MARPOL): el índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI), de carácter obligatorio para los buques nuevos y el Plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP).

Con todo ello, la OMI declara que la implementación de nuevos biocombustibles o fuentes de energía alternativos, fase que actualmente se encuentra en plena investigación, es un paso clave para reducir las emisiones de GEI del transporte marítimo internacional.

Se pretende conseguir buques sin emisiones gracias al amoníaco.

El amoníaco ha sido reconocido como uno de los posibles combustibles del futuro para el transporte marítimo, junto con el biodiésel, el hidrógeno y el bioetanol, todos ellos neutros en carbono.

Según los investigadores, el uso de amoníaco como combustible para buques es ambientalmente viable y, además, no requiere de un alto nivel de experiencia técnica para su uso como energía renovable en comparación con otras alternativas.

Con la combustión de amoníaco puro, de igual forma que sucede con la generación de energía eléctrica en una pila de combustible de hidrógeno, las emisiones se limitan a los vapores de agua y aire caliente en ambos casos, aunque el amoníaco presente varias ventajas con respecto al hidrógeno; no es explosivo, tiene una densidad de energía volumétrica más alta y es significativamente más fácil de licuar para su almacenamiento y transporte, convirtiéndolo en una alternativa más rentable.

A2.1. Proyecto ShipFC, primera prueba de fuego

El proyecto ShipFC, que recibió apoyo financiero con 10 millones de euros procedentes de la UE, tiene como misión instalar la primera pila de combustible basada en amoníaco en un buque. Coordinado por la organización noruega NCE Maritime CleanTech, el proyecto consiste en transformar un buque off-shore, el Viking Energy, instalando una gran pila de combustible de amoníaco de 2 MW, lo que debería permitir al buque navegar durante 3.000 horas anuales.

Esto es algo tremendamente positivo, pues la modularidad de los motores modernos permite que las conversiones para el uso de cada combustible pueden llevarse a cabo con intercambio de pocas piezas. Esto facilita de forma considerable la transición energética del transporte marítimo desde los combustibles fósiles convencionales a los biocombustibles y sintéticos.

ANEXO 3. Propiedades físicas y químicas de los combustibles alternativos.

La siguiente tabla resume todas las características físicas y químicas más importantes de los combustibles alternativos mencionados en el apartado 5 del presente trabajo.

Propiedad	Diésel	Metanol	Etanol	GNL	Hidrógeno	Amoníaco
Densidad (Kg/m ³)	833-881	798	794	450	74	59
T ^a de autoignición (K a 1 bar)	530	743	635	810	858	934
Límites de inflamabilidad (%volumen)	0.7 - 5	6 - 36	3 - 19	4 - 16	4 - 75	15 - 28
Relación másica estequiométrica aire-combustible	14.5	6.5	9.1	17.2	34.3	29.5
Poder calorífico (MJ/kg)	42.5	20.1	27	46 – 50.2	119.9	12.052
Velocidad de llama	30	50	41	380	265 - 325	143
T ^a de llama (K a 1 bar)	2327	2163	2193	2233	2318	
Nº de octano	30	109	109		130	130
Nº de catano	40 - 55	<5	8			41
% de carbono	85	38	52		0	
% de hidrógeno	15	12	13	25	100	
% de oxígeno	0	50	35	0	0	0
% de azufre	<350 ppm	0	0	0	0	0

Tabla 16. Propiedades físicas y químicas de los combustibles alternativos – Fuente: Google