Estudio y análisis del gas natural como alternativa a combustibles con alto contenido en azufre en el transporte marítimo

Trabajo fin de grado

Facultad Náutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:

Sergio Barranco Godoy

Dirigido por:

Santiago Ordás Jiménez

Grado en Tecnologías Marinas

Barcelona, julio de 2019

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náutica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

Hoja de cortesía

Agradecimientos

Principalmente, quiero dar las gracias a Santiago Ordás por ser el tutor de mi trabajo fin de grado y por brindarme la ayuda necesaria para llevarlo a cabo.

También, me gustaría agradecer a toda mi familia por el apoyo moral que me han dado durante el transcurso de esta etapa de mi vida y en particular a mis padres por concederme la oportunidad de conseguir cumplir mis metas.

Finalmente, agradecer a todos mis compañeros por haber compartido esta etapa de mi vida, llena de emociones y días de duro trabajo. Asimismo, agradecer a todos los profesores con los que he tenido el placer de coincidir y que han compartido todos sus conocimientos conmigo haciendo de mí una persona con mayores facultades y más profesional.

Resumen

El propósito de este trabajo es estudiar la situación actual de los combustibles con alto contenido en azufre y analizar si la implementación del GNL como fuente alternativa de propulsión en buques es una opción válida para cumplir con las limitaciones impuestas por la OMI.

A lo largo del siguiente trabajo se estudiará la situación actual del uso de GNL para la propulsión en el transporte marítimo teniendo en cuenta la nueva regulación 14 del Anexo VI del MARPOL, la cual restringe el uso de combustibles con cierto porcentaje de azufre en su composición, que entrará en vigor el próximo 1 de enero de 2020. Así como, se analizará la legislación internacional, europea y nacional de la restricción de emisión de gases de efecto invernadero. Se comparará las emisiones de CO_2, NOx, SOx y materia particulada entre un motor convencional quemando MDO y un motor dual fuel funcionando con GNL. Se explicará el funcionamiento y características de los motores dual fuel y motores a gas. Se analizará la infraestructura portuaria existente, la que se encuentra bajo construcción y bajo discusión para realizar la operativa de bunkering de GNL. Se explicará un proyecto europeo llevado a cabo por diversas entidades, tanto privadas como públicas, para promover el GNL en transporte marítimo. Para finalizar, se tratarán los precios actuales de los combustibles marinos y se analizará un estudio en el cual se exponen seis posibles escenarios de la evolución, tanto de la demanda como del precio, del GNL.

Como resultado, tras haber realizado dicho trabajo he llegado a la conclusión de que el GNL tiene un potencial competitivo muy grande frente al resto de combustibles ya que tras la entrada en vigor de la regulación de la OMI será muy costoso a largo plazo seguir utilizando MDO y LSFO. Con el paso de los años, el uso GNL se irá normalizando a medida que aumente la infraestructura portuaria para abastecer a los buques y se estabilicen el precio del combustible en los mercados.

Abstract

The purpose of this paper is to study the current situation of fuels with high sulfur content and analyse whether the implementation of LNG as an alternative source of propulsion on ships is a valid option to comply with the limitations imposed by the IMO.

Throughout the following work will study the current situation of the use of LNG for propulsion in maritime transport taking into account the new regulation 14 of Annex VI of MARPOL, which limits the use of fuels with a certain percentage of sulfur in its composition , that will come into force on January 1, 2020. As well as, the international, European and national legislation of the emission restriction of greenhouse gases will be analyzed. It will compare the emissions of CO_2, NOx, SOx and particulate matter in a conventional engine burning MDO and a dual fuel engine running with LNG. The operation and characteristics of the dual fuel engines and gas engines will be explained. It will analyze the port infrastructure, which is under construction, which is under discussion to carry out LNG bunkering operation. A European project carried out by various entities, both private and public, to promote LNG in maritime transport will be explained. Finally, the current prices of marine fuels will be discussed, and a study will be explained in which there are six possible scenarios of the evolution, both of demand and price, of LNG.

As a result, after having done this work I have come to the conclusion that LNG has a very great competitive potential compared to other fuels since after the entry into force of the IMO regulation it will be very costly in the long term to continue using MDO and LSFO. Over the years, the use of LNG will be normalized as the port infrastructure increases to supply ships and stabilize the price of fuel in the markets.

Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS iii

RESUMEN v

LISTA DE FIGURAS ix

LISTA DE TABLAS x

LISTA DE ABREVIACIONES xi

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1. PROPIEDADES DEL GAS NATURAL LICUADO 5

1.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y COMPOSICIÓN DEL GAS NATURAL LICUADO 5

1.1.1. INFLAMABILIDAD 7

1.1.2. DENSIDAD Y PESO ESPECÍFICO 10

1.2. EMISIONES PRODUCIDAS POR EL GNL 11

1.2.1. EMISIONES DE CO_2 11

1.2.2. EMISIONES DE NOX 12

1.2.3. EMISIONES DE SOX 12

1.2.4. MATERIA PARTICULADA 13

CAPÍTULO 2. MARCO NORMATIVO 15

2.1. LEGISLACIÓN INTERNACIONAL 15

2.1.1. GUÍAS DE LA OMI 18

2.2. LEGISLACIÓN EUROPEA 20

2.2.1. DIRECTIVA 1999/32/EC 20

2.3. LEGISLACIÓN NACIONAL 23

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL USO DE GAS NATURAL 25

3.1. ANÁLISIS GLOBAL 25

3.2. EVOLUCIÓN DEL USO DEL GAS NATURAL EN LA FLOTA MERCANTE 28

CAPÍTULO 4. MOTORES PARA LA PROPULSIÓN GNL 33

4.1. MOTORES DE MEZCLA POBRE 33

4.1.1. MOTORES ROLLS-ROYCE 34

4.2. MOTORES DUAL FUEL 36

4.2.1. MOTORES WÄRTSILÄ 38

CAPÍTULO 5. BUNKERING DE GNL 43

5.1. OPERATIVAS DE BUNKERING 43

5.2. ESTACIONES DE BUNKERING DE GNL A NIVEL MUNDIAL 48

5.3. PRINCIPALES PUERTOS DE BUNKERING 49

5.3.1. PUERTO DE SINGAPUR 49

5.3.2. PUERTO DE ROTTERDAM 49

5.3.4. PUERTO DE FUJAIRAH 50

5.4. BUNKERING EN ESPAÑA 51

5.4.1. CORE LNGAS HIVE 52

5.5. RESERVAS DE GAS NATURAL 54

5.6. PRECIO DE LOS COMBUSTIBLES 55

5.7. FUTUROS ESCENARIOS DEL PRECIO DE COMBUSTIBLES 59

CAPÍTULO 6. COSTE ECONÓMICO DEL PROYECTO 63

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES 65

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA 69

8.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 69

8.2. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS 69

8.3. REFERENCIAS WEB 70

ANEXO A. LISTADO DE BUQUES OPERATIVOS PROPULSADOS POR GNL 73

ANEXO B. LISTADO DE BUQUES PROPULSADOS POR GNL ENCARGADOS 77

Lista de figuras

Ilustración 1. MF Glutra, el primer buque propulsado por GNL 1
Ilustración 2. Inflamabilidad del metano 8
Ilustración 3. Densidad y peso específico del metano a presión atmosférica 10
Ilustración 4. Emisiones de CO_2 12
Ilustración 5. Comparativa de emisiones entre el uso de GNL y HFO 13
Ilustración 6. Mapa de zonas ECA(s) 16
Ilustración 7. Incremento de la producción de gas natural 25
Ilustración 8. Incremento del consumo de gas natural 26
Ilustración 9. Producción de energía a nivel mundial desde 2010 a 2015 27
Ilustración 10. Buques propulsados por GNL 28
Ilustración 11. Aumento del porcentaje de buques según el tipo 29
Ilustración 12. Incremento del número de buques según tamaño 30
Ilustración 13. Incremento del número de buques según su antigüedad 31
Ilustración 14. Representación gráfica de las partes de un sistema de ignición de un motor de mezcla pobre 34
Ilustración 15. Motor Bergen B36:45 35
Ilustración 16. Motor Bergen C26:33 35
Ilustración 17. Representación gráfica del funcionamiento de un motor DF 37
Ilustración 18. Motor Wärstilä 50DF 40
Ilustración 19. Comparativa de emisiones entre un motor DF en modo gas y un motor diésel convencional 40
Ilustración 20. Operativa de bunkering PTS 43
Ilustración 21. Puerto de Hamina 44
Ilustración 22. Operativa de bunkering STS 45
Ilustración 23. Buque Kairos 46
Ilustración 24. Operativa de bunkering TTS 46
Ilustración 25. Etapas del bunkering TTS 47
Ilustración 26. Mapa de estaciones de bunkering de GNL 48
Ilustración 27. Mapa de los puertos de bunkering más importantes 50
Ilustración 28. Representación gráfica de la infraestructura del proyecto CORE LNGas Hive 52
Ilustración 29. Representación gráfica del proyecto CORE LNGas Hive 53
Ilustración 30. Reservas de gas natural a nivel mundial 54
Ilustración 31. Comparativa del precio del GNL de distintos continentes 55
Ilustración 32. Comparativa de los precios del MDO, LNG e IFO 56
Ilustración 33. Estimación del precio de bunkering de GNL en Norte América 57
Ilustración 34. Precio del GNL de distintas regiones (Fuente: Congressional Research Service) 58
Ilustración 35. Previsión de precios de los distintos combustibles del escenario "Stranded Fuels" 60
Ilustración 36. Previsión de los precios de los combustibles de los cinco escenarios 61

Lista de tablas

Tabla 1. Composición y propiedades del gas natural 6
Tabla 2. Inflamabilidad del gas natural 7
Tabla 3. Limitaciones sobre el uso de combustibles con contenido en azufre a nivel global y en zonas ECA(s) 16
Tabla 4. Limitación de emisiones de NOx dependiendo del año de construcción del buque 17
Tabla 5. Directivas europeas y fecha de implementación 20
Tabla 6. Modelo, tipo y características principales de los motores a gas de Rolls-Royce 34
Tabla 7. Modelo, tipo y características principales de los motores dual fuel de Wärtsilä 39
Tabla 8. Motor en función del tipo de buque 41
Tabla 9. Beneficios clave de cada tipo de motor 42
Tabla 10. Características de las plantas de regasificación de España 51
Tabla 11. Coste económico del trabajo 63

Lista de abreviaciones

ABS	American Bureau of Shipping
BP	British Petroleum
BV	Bureau Veritas
C	Carbono
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
DF	Dual Fuel
DNV-GL	Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd
ECA(s)	Emission Control Area(s)
FBOG	Forced Boil Off Gas
GNL	Gas Natural Licuado
GT	Gross Tonnage
H	Hidrógeno
HFO	Heavy Fuel Oil
HSFO	Heavy Sulphur Fuel Oil
IFO	Intermediate Fuel Oil
JKM	Japan/Korea Marker
LFL	Lower Flammability Limit
LNG	Liquefied Natural Gas
LR	Lloyd's Register
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
MDO	Marine Diesel Oil
MEPC	Maritime Environmental Protection Committee

MGO	Marine Gas Oil
NBOG	Natural Boil Off Gas
NBP	National Balancing Point
NOx	Óxido de nitrógeno
O_2	Oxigeno
OMI	Organización Marítima Internacional
PSV	Platform Supply Vessel
PTS	Pipe-to-Ship
RINA	Registro Italiano Navale
RoPax	Roll On-Roll Off Passenger
Ro-Ro	Roll On-Roll Off
RR	Romanian Register of Shipping
SOx	Óxidos de azufre
STS	Ship-to-ship
T	Toneladas
TTS	Truck-to-ship
UFL	Upper Flammability Limit
VLOC	Very Large Ore Carrier
VLSFO	Very Low Sulphur Fuel Oil

Introducción

El desarrollo del GNL como combustible para buques comenzó en la década de los 80 y no fue hasta el año 2000 cuando se implementó exitosamente en un buque, el MF Glutra, un ferry noruego de las compañías Fjord1 y Møre og Romsdal Fylkesbåtar con capacidad para transportar un total de 300 pasajeros y 100 coches.

Ilustración 1. MF Glutra, el primer buque propulsado por GNL (Fuente: Wärtsilä)

A lo largo de los últimos años ha habido un aumento en las necesidades por utilizar combustibles menos contaminantes y un crecimiento del suministro de gas natural licuado en el sector marítimo, lo cual desata un importante interés por el uso del GNL como combustible marítimo. Durante décadas, los buques gaseros que transportaban GNL han hecho uso del boil-off gas, se conoce como la evaporación del GNL debido a los cambios de temperatura, para la propulsión del buque.

El transporte marítimo es considerado un pilar fundamental en la economía mundial debido a que es el encargado del 90% comercio internacional. Siendo el método de transporte con mayor movimiento de mercancías global, no es tan contaminante como el resto de transporte de mercancías. Basándonos en un estudio del año 2015, el transporte marítimo es el responsable del 13% de las

emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global en el sector de transporte.

El hecho de tener tal impacto en la generación de gases de efecto invernadero, da como consecuencia restricciones y limitaciones en el uso de combustibles contaminantes como el HFO. La Organización Marítima Internacional (OMI) es el organismo encargado de llevar a cabo dichas limitaciones para reducir la generación de gases de efecto invernadero y que el transporte marítimo sea un método de transporte más respetuoso con el medio ambiente. Por ello, en 1978 creó el convenio internacional para prevenir la contaminación de los buques (MARPOL).

Por medio de la creación de este convenio, se crearon un total de seis Anexos para prevenir la contaminación de las distintas fuentes contaminantes producidas por los buques. El Anexo VI del convenio MARPOL recoge las limitaciones del contenido en azufre que puede contener el combustible para reducir las emisiones de SOx y regula las emisiones de NOx y de materia particulada.

Para llevar a cabo dicho trabajo se ha mantenido contacto con ingenieros navales especializados en el GNL y con una empresa de bunkering de GNL, la cual opera en el mar Báltico y es una de las zonas más afectadas por el uso de combustibles con alto contenido en azufre, con el propósito de recopilar información la cual ha sido de gran ayuda para elaborar el trabajo.

El objetivo principal de este trabajo es analizar y estudiar la viabilidad del uso de gas natural licuado para la propulsión en los buques de la marina mercante como alternativa a los combustibles con alto contenido en azufre.

En primer lugar, para conseguir llegar a una conclusión clara y concisa se estudiará la normativa vigente y la venidera del Anexo VI del convenio MARPOL,

la cual establece unos límites del contenido de azufre de los combustibles marinos para poder navegar a nivel global y, unas limitaciones más rigurosas cuando se quiere navegar por zonas ECA(s), las cuales están muy controladas ante las emisiones de gases nocivos para proteger el medioambiente y reducir los niveles de contaminación de las zonas ya que son muy sensibles.

En segundo lugar, se hará un análisis global de la situación del gas natural, es decir, como ha aumentado la demanda y consumo de gas natural a nivel mundial, que países son los mayores importadores y cuales los mayores exportadores de gas. Seguidamente, traspasaremos este contexto al sector naval y estudiaremos cómo ha evolucionado la situación del uso de GNL durante los últimos años, como han aumentado el número de buques propulsados por gas natural licuado y se comparará el aumento de la flota mercante clasificándolos por tipos de buques.

En tercer lugar, se tratarán las distintas operativas de bunkering que existen, aportando ejemplos de cada uno de los métodos empleado en la zona del mar Báltico, de todas las infraestructuras operativas que están dotadas de equipos e instalaciones necesarias para poder realizar las operativas de bunkering, así como, las que se encuentran bajo construcción y bajo decisión. A nivel nacional, se analizará el importante papel que tiene España en relación con el uso de GNL debido a su posición geoestratégica y la experiencia de más de 50 años en el sector gasista, la cual ha hecho posible que se esté llevando a cabo el proyecto “CORE LNGas Hive”. Dicho proyecto, tiene como principal objetivo la creación de una cadena logística integrada, segura y eficiente para el suministro de GNL como combustible en el sector marítimo.

En cuarto lugar, se analizarán las reservas actuales de gas natural y se comparará con las reservas de petróleo para comprobar cuál de los dos combustibles tiene un consumo más sostenible y garantizado.

En último lugar, se tratará uno de los puntos más importante del trabajo, los precios de los combustibles. En dicha parte se estudiarán las fluctuaciones de los precios de los últimos años y se analizarán los futuros escenarios sobre las tendencias de dichos precios.

Capítulo 1. Propiedades del gas natural licuado

1.1. Propiedades físicas y composición del gas natural licuado

El gas natural licuado se considera una mezcla de diversos hidrocarburos que son incoloros, inodoros, no tóxicos y no corrosivos. Se almacena y transporta en estado líquido, a temperaturas próximas a la de evaporación a presión atmosférica, aproximadamente -160 ºC, y se consigue alcanzar dicha temperatura por medio de ciclos de criogenia. Asimismo, al transportar el gas natural a temperaturas tan bajas se consigue reducir su volumen unas 600 veces, con la finalidad de transportar una mayor cantidad de producto en una sola travesía y sea más económico.

El gas natural no se inflama por sí mismo, es necesario que este en estado gaseoso y esté mezclado con aire para conseguir una combustión. Para poder usarse como combustible se establece un rango del 5% al 15% del volumen concentrado en aire. En el caso que se quisiera conseguir una autoinflamación con gas natural se debe de alcanzar una temperatura de 599 ºC.

La composición del gas natural licuado depende de la fuente de la que proviene y de la forma de licuefacción que se ha usado para extraerlo. El principal componente por el que está compuesto es el metano (CH_4), aunque también está compuesto por pequeñas cantidades de otros hidrocarburos como el etano, propano, butano, pentano y nitrógeno.

		Alaska	Baltimore	Argelia	Estándar
Metano	CH_4	99.70%	93,30%	86,90%	89,63%
Etano	C_2H_6	0.06%	4,65%	9,35%	6,32%
Propano	$n\text{-}C_3H_8$	0,00%	0,84%	2,33%	2,16%
Butano	$n\text{-}C_4H_{10}$	0,00%	0,18%	0,63%	1,20%
Iso-butano	$i\text{-}C_4H_{10}$	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Pentano	$n\text{-}C_5H_{12}$	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Iso-pentano	$i\text{-}C_5H_{12}$	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Nitrógeno	N_2	0,20%	1,01%	0,63%	0,69%
Peso molecular promedio		17,88	18,05	18,56	18,12
Temperatura de ebullición a presión atmosférica (ºC)		-160,5	-160,7	-161,3	-160,9
Densidad (kg/m³)		462,2	460,9	457,8	459,4
Energía específica (kJ/kg)		54,454	54,289	54,031	54,090

Tabla 1. Composición y propiedades del gas natural (Fuente: elaboración propia)

Durante la navegación, debido al calentamiento del tanque de carga provoca que parte del gas natural que se encuentra en estado líquido se evapore y forme el *"NBOG" (natural boil off gas)*, el cual se debe de introducir en una planta de relicuado para devolver esa parte de la carga de estado gaseoso a estado líquido y así mantener la temperatura adecuada en el interior del tanque. Por otro lado, se puede producir *"FBOG" (forced boil off gas)* mediante evaporadores para posteriormente usarlo en el motor en caso de que no hubiera suficiente *"NBOG"* para el funcionamiento del motor.

1.1.1. Inflamabilidad

El GNL se considera una fuente de combustible alternativa más limpia que las que se usan actualmente, aun así, si no se manipula de manera adecuada pueden surgir graves problemas como por ejemplo el riesgo de inflamación. Para que se produzca una inflamación se deben de cumplir diversos factores como la presencia de un comburente, un combustible y una fuente de ignición. Sin embargo, el combustible se puede autoinflamar, sin la existencia de una fuente de ignición, una vez se alcanza su temperatura de autoinflamación que dependerá de la composición del combustible. Como podemos observar en la siguiente tabla la temperatura de autoinflamación del gas natural es de unos 595 ºC debido a que su composición es en mayor parte metano (90%).

	Metano CH_4	**Etano C_2H_6**	**Propano C_3N_8**	**Butano C_4N_{10}**	**Pentano C_5H_{12}**	**Nitrógeno N_2**
Peso molecular	16,042	30,068	44,094	58,120	72,150	28,016
Temperatura de ebullición a 1 bar (ºC)	-161,5	-88,6	-42,5	-5	63,1	-196
Densidad en estado líquido a temperatura de ebullición (kg/m³)	426,0	544,1	580,7	601,8	610,2	808,6
Densidad del vapor a 15 ºC y 1 bar	0,554	1,046	1,540	2,07	2,49	0,97
Proporción de volumen de gas / volumen de líquido a 1 bar		619	413	311	311	205
Límites de inflamabilidad en aire por volumen (%)	5,3 a 14	3 a 12,5	2,1 a 9,5	2 a 9,5	3 a 12,4	No inflamable
Temperatura de autoinflamación (ºC)	595	510	510/583	510/583		
Calor de vaporización a la temperatura de ebullición (kJ/kg)	510,4	489,9	426,2	385,2	357,5	199,3

Tabla 2. Inflamabilidad del gas natural (Fuente: elaboración propia)

El rango de inflamabilidad del metano en aire es aproximadamente de un 5,3 a 14% del volumen total, siendo el límite inferior de inflamabilidad y el límite superior de inflamabilidad respectivamente. Por lo tanto, por encima o por debajo de estos valores no hay riesgo de inflamabilidad. Para reducir este rango, se diluye nitrógeno en el aire hasta lograr disminuir la cantidad de oxígeno que contiene el aire hasta un 2% de oxígeno. Por temas de seguridad, se establece que la cantidad de oxígeno en el aire debe ser inferior a 2% ya que por encima de un 13% de oxígeno en el aire hay riesgo de que se provoque una explosión.

Mediante el siguiente diagrama triangular podemos comprobar los límites superior e inferior de inflamabilidad dependiendo las concentraciones de oxígeno, nitrógeno y metano. Asimismo, vienen representadas una línea azul y una línea roja. La línea azul representa la máxima concentración de O_2 que puede haber dentro del tanque de forma natural, es decir, con el propio aire de la atmósfera y dicha línea no se puede sobrepasar a no ser que se introduzca O_2 puro en su interior para aumentar la concentración lo cual es contraproducente ya que aumenta el área de inflamabilidad del metano. Por otro lado, la línea roja representa la mezcla estequiométrica de CH_4:O_2 que es 2:1.

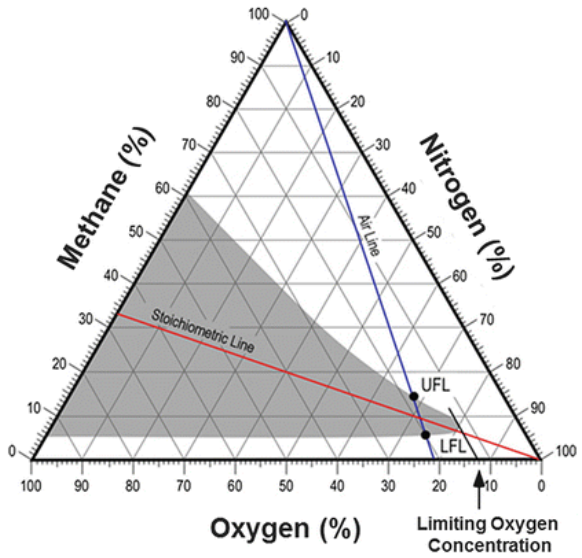


Ilustración 2. Inflamabilidad del metano (Fuente: GIIGNL)

El área que hay representada de color gris indica el área de peligro de inflamación de la mezcla de nitrógeno, metano y oxígeno. Además, también podemos ver representados los puntos UFL (upper flammability limit) y LFL (lower flammability limit) que establecen el límite superior e inferior de inflamabilidad a una concentración de O_2 del 21%.

Para mantener una concentración de metano, oxígeno y nitrógeno segura y sin riesgo de inflamabilidad la concentración de O_2 jamás puede estar por encima del 12% del volumen total ya que si superamos este valor entraríamos a la zona de mezclas inflamables y es peligroso. Por ello, durante la operativa de carga, en teoría, se debe reducir la concentración de O_2 hasta el 12% introduciendo nitrógeno. Sin embargo, en la práctica, se reduce este valor hasta el 2% ya que el nitrógeno no se diluye de forma homogénea con el aire.

1.1.2. Densidad y peso específico

La densidad del GNL varía ligeramente ya que no es una sustancia pura, es decir, depende de las concentraciones de los distintos hidrocarburos que lo componen. Del mismo modo, la densidad está comprendida entre los 430 kg/m^3 y los 470 kg/m^3. El GNL es aproximadamente una tercera parte de la densidad del aire, por ello, en el caso que se produjera un derrame, este al ser menos denso que el propio aire, flotaría e iría directamente hacia la atmósfera.

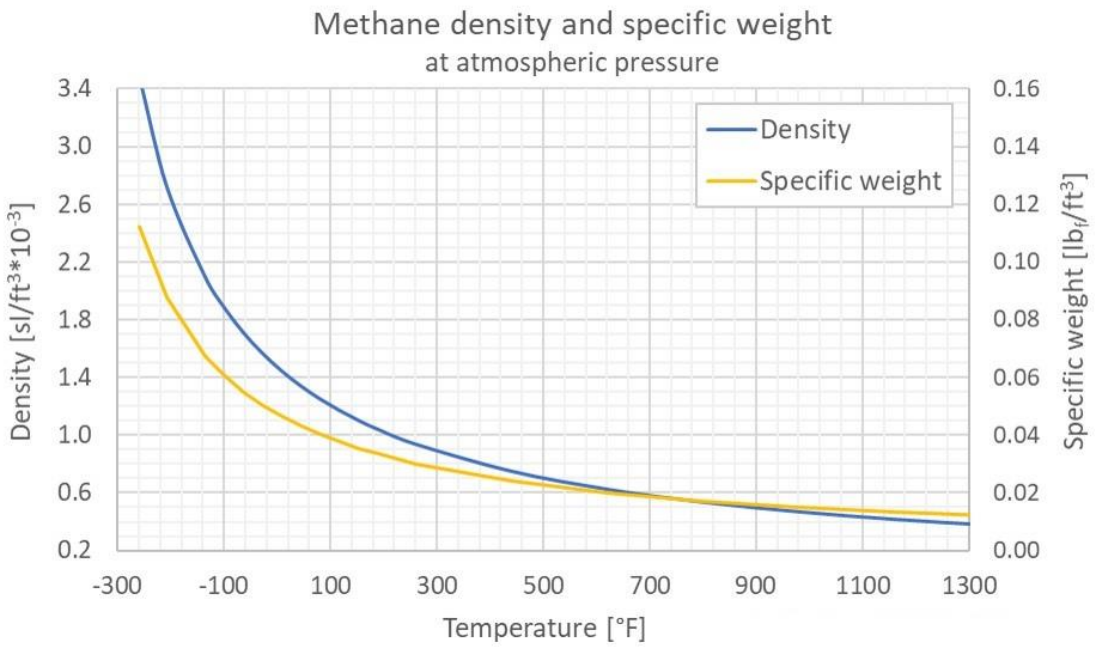


Ilustración 3. Densidad y peso específico del metano a presión atmosférica (Fuente: GIIGNL)

Como podemos observar en el diagrama anterior uno de los parámetros que más influyen en la densidad del metano es la temperatura a la cual se encuentra. La densidad y el peso específico tienden a disminuir contra mayor sea la temperatura. Por ello, se tiende a enfriar el GNL hasta la temperatura próxima de evaporación (aproximadamente -160 ºC) para aumentar su densidad, disminuir su volumen y poder transportar mayores cantidades de producto.

1.2. Emisiones producidas por el GNL

El gas natural es una alternativa para reducir los gases de efecto invernadero ya que produce menos emisiones gracias a su alta relación de hidrógeno-carbono (25% H y 75% C) en su composición, esto lo hace el combustible fósil más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

1.2.1. Emisiones de CO_2

El gas natural como cualquier otro tipo de combustible produce CO_2 pero en distinta proporción. La cantidad de CO_2 producido cuando el combustible es quemado es funcion de la cantidad de carbono por la que esta compuesto dicho combustible. La cantidad de energia o calor producido viene determinada por el contenido de carbono (C) e hidrógeno (H) del combustible. En el caso del gas natural esta compuesto principalmente por metano (CH_4) que tiene una mayor cantidad de energía respecto a otros combustibles, por ello, la relación de energía producida y generación de CO_2 es menor. Gracias a esta composición el GNL es capaz de reducir hasta un 30% la cantidad de CO_2 que produce respecto al resto de combustibles.

Según un estudio reciente que compara las emisiones de CO_2 de los buques indica que incrementarán un 250% en los próximos 35 años, lo que podría representar el 14% de emisiones de CO_2 a nivel mundial en el año 2050. En relación a esto, la OMI ha exigido que la eficiencia energética de los nuevos buques a partir del año 2025 debe ser un 30% mayor que los construidos a día de hoy.

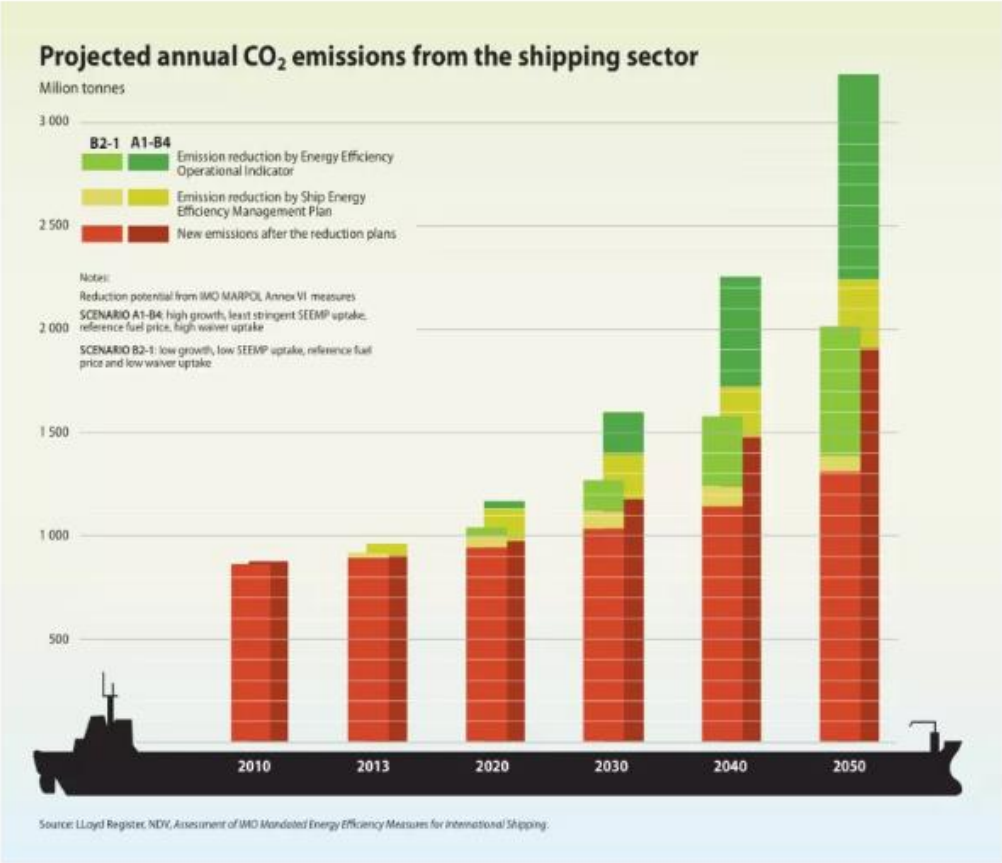


Ilustración 4. Emisiones de CO_2 (Fuente: OECD Insights)

1.2.2. Emisiones de NOx

El GNL en comparación con los combustibles derivados del petróleo, como el HFO, producen una cantidad mucho menor de gases NOx, alrededor de un 80% menos que el HFO. Esta reducción se produce gracias a la naturaleza del gas que se usa en estado gaseoso durante la combustión y se mezcla con el aire de forma más homogénea, lo que da resultado a una combustión completa y más eficiente.

1.2.3. Emisiones de SOx

Las emisiones de SOx quedan totalmente eliminadas ya que el azufre no es un elemento que se encuentre en la composición del gas natural.

1.2.4. Materia particulada

Gracias a la eficiencia de combustión del gas natural logra reducir la materia particulada en el proceso de combustión en un 95%.

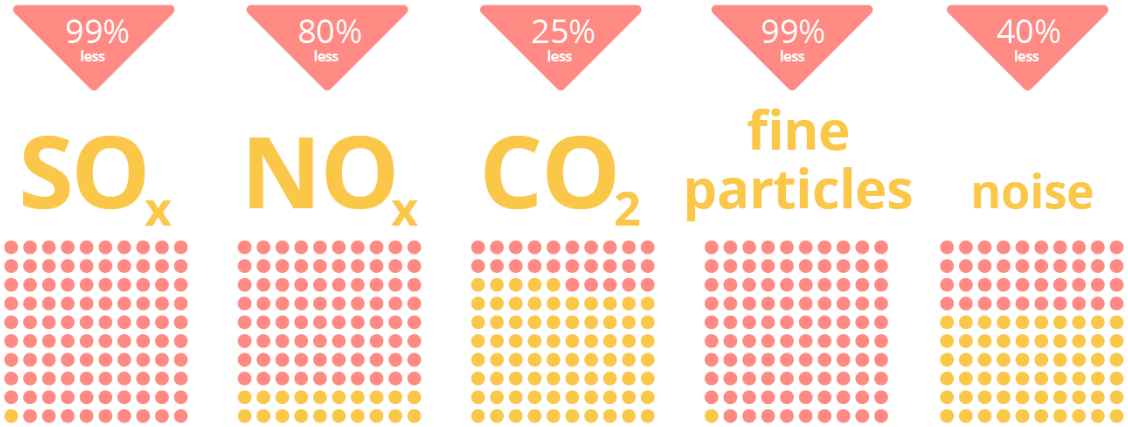


Ilustración 5. Comparativa de emisiones entre el uso de GNL y HFO

(Fuente: Elenger)

Capítulo 2. Marco normativo

2.1. Legislación internacional

En el frente internacional, el Comité de Protección de Medio Marino (MEPC) de la Organización Marítima Mundial (OMI) es el organismo encargado de la prevención y contención de la contaminación del medio marino proveniente de los buques.

El Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL) es el principal convenio encargado de establecer restricciones y limitaciones para prevenir y reducir la contaminación del medio marino producido por buques. El convenio MARPOL está compuesto por seis anexos, los cuales regulan las distintas fuentes contaminantes proveniente de buques por medio de regulaciones, y entró en vigor el 2 de octubre de 1983. Los comités de la OMI se reúnen periódicamente para debatir y adoptar revisiones sobre los anexos del MARPOL y sobre tratados relacionados.

El Anexo VI (Prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques) entró en vigor el 19 de mayo de 2005, y establece los límites de las emisiones de óxidos de sulfuro (SOx) y óxidos de nitrógeno (NOx) y materia particulada de los gases de escape de los buques.

Los estándares de emisiones se pueden agrupar en tres grupos: Nivel I, Nivel II, Nivel III. El Nivel I entró en vigor en el año 1997, mientras que los Niveles II/III fueron introducidos en el Anexo VI por medio de enmiendas en el año 2008. El Anexo VI se aplica a todos los nuevos motores con una potencia útil mayor de 130 kW instalados en buques construido a partir del 1 de enero de 2000 o posteriormente. Las enmiendas de los Niveles II/III aprobadas en octubre de 2008 fueron ratificadas por 53 países que representaban el 81,88 % del tonelaje mundial. Dichas enmiendas entraron en vigor el 1 de julio de 2010, las cuales establecían:

- Mayor calidad de los combustibles a partir del julio de 2010.
- Estándares de Nivel II y Nivel III en emisiones de NOx para nuevos motores.

- Restricciones de emisiones del Nivel I de NOx para motores previos al año 2000.

Además, en este anexo también se designan las zonas denominadas ECA, en las cuales las restricciones de emisiones de SOx, NOx y materia particulada son más exigentes.

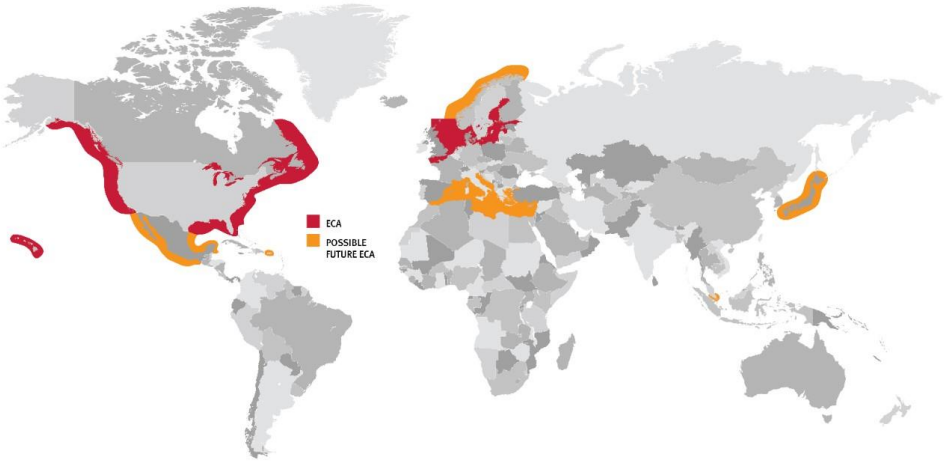


Ilustración 6. Mapa de zonas ECA(s) (Fuente: DNV-GL)

Según la regulación 14 del Anexo VI del MARPOL, el contenido de azufre de todo combustible usado a bordo a nivel global y en las zonas denominadas ECA no podrá superar el límite establecido que queda representado en la siguiente tabla.

Global		Zonas ECA(s)	
Fecha de entrada en vigor	**Porcentaje azufre masa/masa**	**Fecha de entrada en vigor**	**Porcentaje azufre masa/masa**
Antes del 1 de enero de 2012	4,50%	Antes del 1 de enero de 2012	1,50%
Del 1 de enero de 2012 y posteriormente	3,50%	Del 1 de enero de 2012 y posteriormente	1,00%
Del 1 de enero de 2020 y posteriormente	0,50%	Del 1 de enero de 2020 y posteriormente	0,10%

Tabla 3. Limitaciones sobre el uso de combustibles con contenido en azufre a nivel global y en zonas ECA(s)

(Fuente: elaboración propia)

Para poder cumplir con las exigencias que impone la OMI hay diversas alternativas, como el uso de combustibles con menor contenido en azufre que cumplan con dichos límites o el uso de sistemas de lavado de gases de escape, como scrubbers, para reducir las emisiones de SOx.

Del mismo modo, según la regulación 13 del Anexo VI del MARPOL, regula los límites de emisiones de NOx calificándolo en tres niveles dependiendo el año de construcción del buque.

Nivel	Fecha de construcción del buque	Límite de emisiones de NOx (g/kWh) n = régimen de trabajo del motor (rpm)		
		Rpm n < 130	**Rpm 130 ≤ n < 2000**	**Rpm n ≥ 2000**
I	Entre el 1 de enero de 2000 y el 1 de enero de 2011	17,00	$45 \cdot n^{-0,2}$	9,80
II	El 1 de enero de 2011 o posteriormente	14,40	$44 \cdot n^{-0,2}$	7,70
III	El 1 de enero de 2016 o posteriormente	3,40	$9 \cdot n^{-0,2}$	2,00

Tabla 4. Limitación de emisiones de NOx dependiendo del año de construcción del buque

(Fuente: elaboración propia)

El nivel III sólo se aplica a buques específicos mientras navegan por las zonas de control de emisiones (ECA) impuesta para reducir las emisiones de NOx; en el resto de las zonas se aplica el nivel II.

2.1.1. Guías de la OMI

See MEPC.1/Circ.875 of 2018-04-26 *Guidance on best practice for fuel oil purchasers/users for assuring the quality of fuel oil used on board ships*.

1.3

Guía destinada a los compradores de combustible para garantizar la calidad de los combustibles suministrados y usados a bordo, que cumplan con los requisitos MARPOL y el funcionamiento seguro y eficiente del buque.

See res. MEPC.280(70) of 2016-10-28 *Effective date of implementation of the fuel oil standard in regulation 14.1.3 of MARPOL Annex VI*, which confirms that the fuel oil standard in regulation 14.1.3 shall become effective 2020-01-01.

1 & 4

Guía que decide la fecha de implementación de la regulación 14.1.3 del Anexo VI del MARPOL que establece el límite del contenido de azufre en los combustibles en un 0.50% m/m a partir del 1 de enero de 2020.

See res. MEPC.259(68) of 2015-05-15 - *2015 Guidelines for exhaust gas cleaning systems*.

2

Requisitos para las pruebas, certificación de inspecciones y verificación de los sistemas de lavado de los gases de escape regulado por la regulación 4 del Anexo VI del MARPOL para garantizar que cumplen con los límites de las regulaciones 14.1 y 14.4 (restricción de las emisiones de SOx a nivel global y en zonas ECA) del Anexo VI del MARPOL.

See res. MEPC.192(61) of 2010-10-01 - *2010 Guidelines for monitoring the worldwide average sulphur content of fuel oils supplied for use on board ships*.

Uso de un método acordado para controlar el contenido de azufre que contienen los combustibles suministrados para su uso a bordo de los buques, teniendo en cuenta los diferentes límites de azufre que establece la regulación 14 del Anexo VI del MARPOL.

See res. MEPC.1/Circ.864 of 2016-12-09 *Guidelines for onboard sampling for the verification of the sulphur content of the fuel oil used on board ships*.

3 & 7

Uso de un método acordado para la toma de muestras que permita un control y aplicación efectivos para el uso de combustibles líquidos a bordo de los buques conforme el Anexo VI del MARPOL.

See MEPC.1/Circ.756 of 2011-08-10 - *Date of taking effect of the amendments to regulations 13 and 14 of MARPOL Annex VI adopted by resolution MEPC.202(62)*.

Enmienda en la que se define la fecha de entrada en vigor de las regulaciones 13 (restricción de las emisiones de NOx) y 14 (restricción de las emisiones de SOx) del Anexo VI del MARPOL.

3

See MEPC.1/Circ.755 of 2011-11-02 - *Information on the United States Caribbean sea emission control area under MARPOL ANNEX VI*.

Sexagésima segunda reunión (del 11 al 15 de julio de 2015) del Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) para designar el mar Caribe de los Estados Unidos como una zona ECA ante emisiones NOx, SOx y materia particulada, enmienda recogida en el Anexo VI del MARPOL.

See MEPC.1/Circ.723 of 2010-05-13 - *Information on North American Emission Control Area (ECA) under MARPOL Annex VI*.

Sexagésima reunión (del 22 al 26 de marzo de 2010) del Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) para designar Norteamérica como una zona ECA ante emisiones de NOx, SOx y materia particulada, enmienda recogida en el Anexo VI del MARPOL.

2.2. Legislación europea

En la Unión Europea el contenido de azufre del combustible viene establecido por la Directiva 1999/32 del 26 de abril de 1999 relativo a la reducción del contenido de sulfuro en ciertos combustibles líquidos, la cual se ha visto modificada cuatro veces entre los años 1999 y 2014.

Directiva	Tiempo límite de incorporación
1999/32/CE	1 de julio de 2000
2005/33/CE	11 de agosto del 2006
2009/30/CE	31 de diciembre d 2010
2012/33/EU	18 de junio de 2014
2016/802	11 de mayo de 2016

Tabla 5. Directivas europeas y fecha de implementación (Fuente: elaboración propia)

2.2.1. Directiva 1999/32/EC

La Comisión Europea se reunió para adoptar la Directiva 1999/32/CE el 26 de abril de 1999 en Luxemburgo. En esta directiva se habla de las medidas que se tomarán para reducir las emisiones de óxidos de azufre provenientes de la combustión de ciertos tipos de combustibles líquidos y de ese modo reducir los efectos nocivos sobre la vida humana y el medio ambiente en la Unión Europea.

La Comisión Europea plantea un plan de acción para reducir las emisiones dióxidos de azufre producidas por la combustión de determinados combustibles líquidos derivados del petróleo que consiste en establecer unos límites al contenido de azufre de dichos combustibles como condición para su uso en el territorio de los Estados miembros. En el caso de fuelóleos pesados, los Estados miembros deben garantizar que no se utilizan, en todo su territorio, dichos combustibles cuyo contenido en azufre supere los siguientes valores:

- En un 1,00% en masa, a partir del 1 de enero de 2003.
- Entre el 1,00% y el 3,00% en masa, siempre que respeten las normas comunitarias de calidad del aire establecidas en la Directiva 80/799/CEE.

Los Estados miembros deben garantizarán que en su territorio no se usan gasóleos cuyo contenido en azufre supere los siguientes valores:

- En un 0,20% en masa, el 1 de julio de 2000.
- En un 0,10% en masa, el 1 de enero de 2008.

Para comprobar si estas medidas daban resultado, todos los Estados miembros debían de presentar ante la Comisión Europea, el 30 de junio de cada año, un breve informe en el cual quedaba reflejado la cantidad de azufre de los combustibles líquidos contemplados en la presente Directiva y comercializados en su territorio durante el año anterior.

Como consecuencia, la Comisión Europea fue realizando modificaciones a la Directiva expuesta anteriormente para reducir cada vez más los límites hasta la última enmienda, la Directiva 2016/802 del 11 de mayo de 2016.

En esta enmienda de la directiva, se han visto modificados varios apartados para continuar con la disminución del contenido en azufre en los combustibles líquidos derivados del petróleo para conseguir reducir las emisiones de dióxido de azufre y los efectos nocivos sobre la vida humana y el medio ambiente. Por ello, los Estados miembros deben garantizar que se cumplan las siguientes medidas en su territorio:

- Que no se utilicen fuelóleos pesados cuyo contenido en azufre supere el 1,00% en masa.
- Que no se utilicen gasóleos pesados cuyo contenido en azufre supere el 0,10% en masa.
- Que no se utilicen combustibles para uso marítimo cuyo contenido de azufre exceda el 3,50% en masa, excepto los destinados al aprovisionamiento de buques que utilicen métodos de reducción de emisiones contemplados en el artículo 8.
- Que no se comercialice combustible diésel para uso marítimo con un contenido en azufre superior al 1,50% en masa.
- Que los buques atracados en los puertos de la Unión Europea no utilicen un combustible cuyo contenido en azufre supere el 0,10% en masa.

Igualmente, los Estados miembros deben tomar medidas para garantizar que, en sus aguas territoriales y zonas económicas exclusivas no se utilicen combustibles cuyo contenido de azufre en masa supere:

- El 3,50% en masa, excepto los destinados a aprovisionamiento de buques que utilicen los métodos de reducción de emisiones de SOx.
- El 3,50% en masa, a partir del 18 de junio de 2014.
- El 0,50% en masa, a partir del 1 de enero de 2020.
- El 1,50% en masa, hasta el 1 de enero de 2020 en buques de pasajeros en servicios regulares efectuados desde o hacia cualquier puerto de la Unión Europea.

De la misma forma, los Estados miembros deben tomar medidas para garantizar que, en sus aguas territoriales, zonas económicas exclusivas y zonas ECA situadas dentro de las zonas ECA de SOx no se utilicen combustibles cuyo contenido en azufre no supere:

- El 1,00% en masa, hasta el 31 de diciembre de 2014.
- El 0,10% en masa, a partir del 1 de enero de 2015.

2.3. Legislación nacional

España es uno de los países con mayor potencial de la Unión Europea para promover el suministro de gas natural licuado como combustible en el transporte marítimo gracias a su posición geoestratégica. Asimismo, es el país que está a la cabeza de la Unión Europea en infraestructura y capacidad de almacenaje de gas natural licuado, siendo el país europeo con mayor número de plantas de regasificación.

El Estado español aprobó el Real Decreto 335/2018 el 25 de mayo de 2018, con el cual establece unas medidas para impulsar el uso del gas natural como combustible.

En este real decreto, se aprueban una serie de medidas para impulsar el bunkering de GNL en los puertos españoles y la utilización de las infraestructuras del sector gasista, como sigue:

- Adaptar el marco regulatorio para facilitar la contratación de nuevos servicios en instalaciones gasistas y hacer un uso más eficiente de las existentes.
- En la operativa de bunkering, se dé un mayor uso a las plantas de gas natural licuado y se permita que los puertos españoles puedan suministrar el GNL para la navegación más fácilmente, lo cual hace que aumente la competitividad entre los puertos españoles y la calidad del aire.
- Agilizar el procedimiento para inhabilitar a las comercializadores fraudulentas, a la vez que ampara a los consumidores afectados que podrán continuar con su suministro por medio de un comercializadora de último recurso.
- Establecer una serie de estructuras de peaje de inyección de biogás/biometano desde las plantas de tratamiento de residuos, para progresar en descarbonización de la economía española. Este peaje se realiza en función de la cantidad de GNL que va a ser cargada, menos de 5.000, entre 5.000 y 15.000 y más de 15.000 m^3 y de acuerdo con cuatro tipos de servicios dependiendo el número de cargas a realizar:

  - Servicio de corto plazo. Contratación de una carga.
  - Servicio durante 30 días. Contratación de al menos 3 cargas durante el periodo acordado.
  - Servicio 90 días. Contratación de al menos 5 cargas durante el periodo acordado.
  - Servicio 365 días. Contratación de al menos 12 cargas durante el periodo acordado.
- Se regulan los procedimientos de baja de las instalaciones de la red básica y ajustan las obligaciones de desmantelar la infraestructura del sistema para garantizar la seguridad y protección del medio ambiente.

Capítulo 3. Análisis del uso de gas natural

3.1. Análisis global

Durante los últimos años la demanda de gas natural ha tenido una tendencia alcista. Gracias a los siguientes gráficos podemos observar como en los últimos, la producción de gas natural, así como su consumo, se han visto incrementados debido al aumento de la demanda. Los principales factores que han influenciado en este incremento son:

- Que la república de China sea el mayor importador de gas natural a nivel mundial. Debido a su crecimiento económico y su estricta política para reducir la contaminación del aire, China acumula el 37% del incremento del consumo global entre los años 2017 y 2023.
- Que Estados Unidos sea el principal productor y exportador de gas natural. Representa casi el 45% del crecimiento de la producción del y aproximadamente tres cuartas partes del crecimiento de las exportaciones de GNL.
- Que el sector industrial lidere la generación de energía como motor principal del crecimiento de la demanda mundial de gas natural.

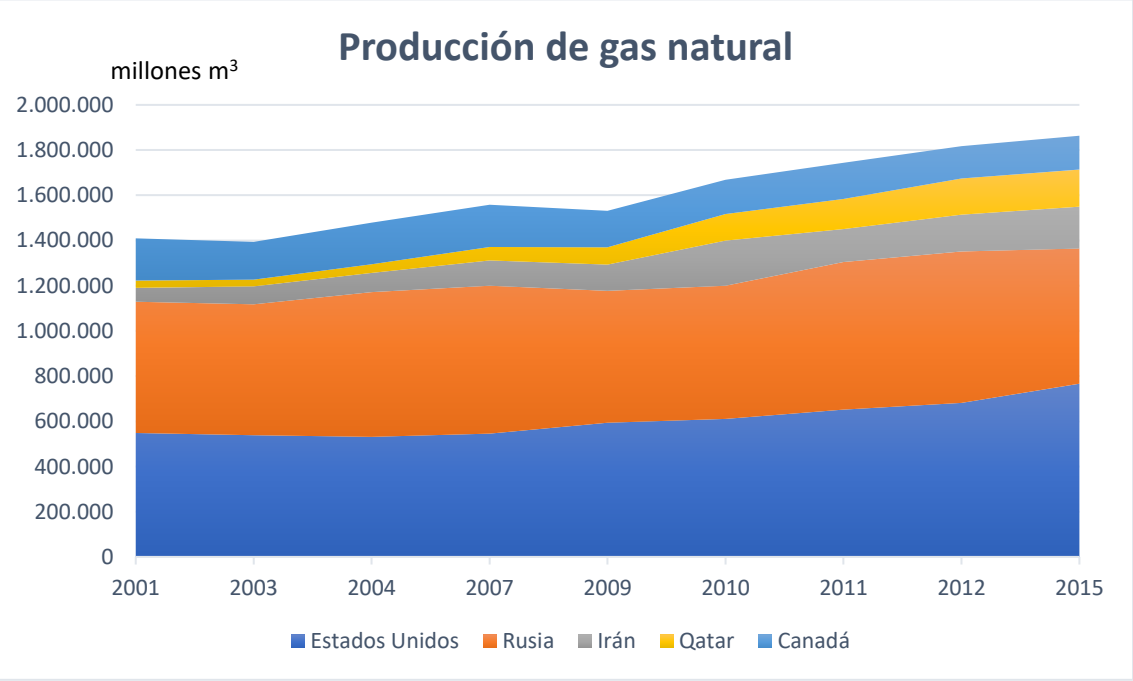


Ilustración 7. Incremento de la producción de gas natural (Fuente: elaboración propia)

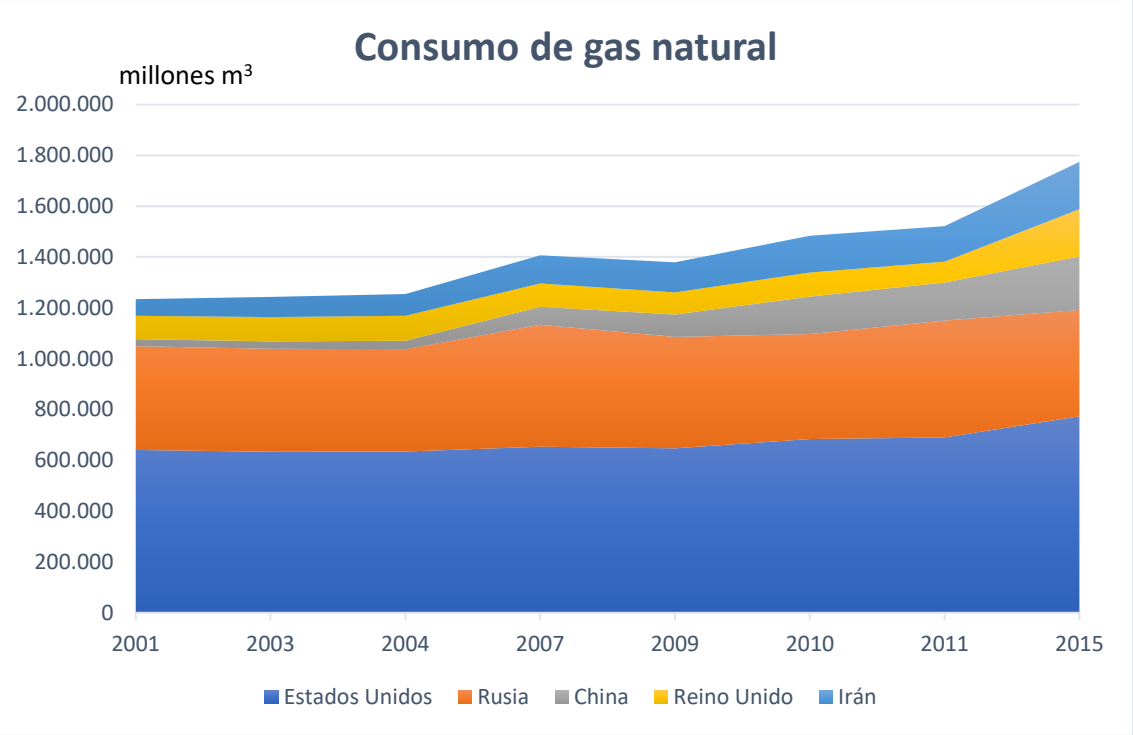


Ilustración 8. Incremento del consumo de gas natural (Fuente: elaboración propia)

En el año 2017, el consumo se ha visto incrementado en un 3% a nivel global, algo por encima del 1,5% de los años anteriores. China ha sido el país principal consumidor con un incremento anual del 14,5% debido al cambio de producción energética proveniente del carbón al gas natural. La mayor parte de este crecimiento del consumo de gas natural es debido al incremento de la demanda del sector industrial, así como la contribución del aumento del consumo en los hogares.

Asia y la zona del pacífico agrupan más del 50% de este crecimiento de la demanda de gas natural, siendo China una tercera parte del crecimiento. Asimismo, India comprende un 7% mientras que el resto de las regiones asiáticas acumulan el 11% restante.

La demanda global de gas natural proveniente del sector industrial, el cual crece anualmente un 2.8% de promedio. Se consume más de un 40% de todo el consumo de gas para producir energía eléctrica.

Como podemos observar en el siguiente gráfico, durante el período entre los años 2010 y 2015 la generación de energía ha aumentado en un 2.4% por año. Además, durante este periodo la energía producida por carbón, gas natural y energías renovables se ha visto incrementada, mientras que la generación por combustible se mantiene estable y la energía nuclear se ve disminuida. Las energías renovables han sido las que más han aumentado durante este periodo, gracias a los respaldos políticos y mejoras económicas.

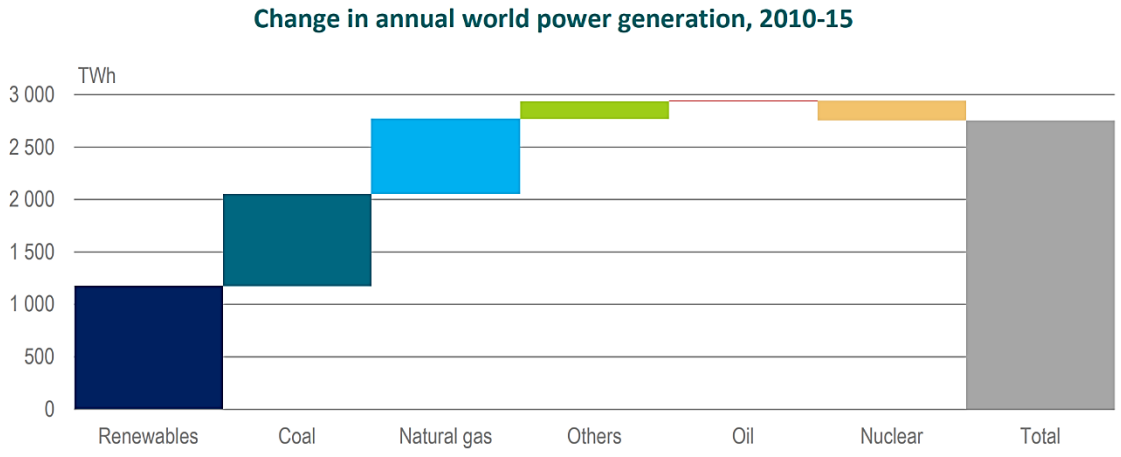


Ilustración 9. Producción de energía a nivel mundial desde 2010 a 2015 (Fuente: International Energy Agency)

Se prevé que el mercado global de gas natural supere la marca de 4 billones de metros cúbicos marcados por los pronósticos, con un aumento anual del 1.6%, lo que se traduce en un aumento de 376 mil millones de metros cúbicos a la demanda anual para 2023.

3.2. Evolución del uso del gas natural en la flota mercante

Durante los últimos años los buques propulsados con GNL han aumentado a nivel global. En 2017 había un total de 118 buques mientras que en 2018 ha crecido hasta un total de 143. Además, hay un total de 135 que se encuentran en construcción, de distintos tipos: petroleros, portacontenedores, cruceros, Ro-Ro y VLOC, y hay otros 135 listos para funcionar con propulsión GNL.

En cuanto a la empresa española Balearia, cabe destacar, que durante los próximos tres años está entre sus objetivos tener como mínimo la mitad de su flota de ferris navegando con propulsión GNL. A fin de cumplir estos objetivos, durante el año 2018, Balearia ha comenzado la remotorización de seis de sus buques que se añadirán a los tres que actualmente se están construyendo.

Este crecimiento por la propulsión GNL a nivel mundial se enfoca principalmente porque éste es el único combustible fósil fiable y sostenible que cumple con los límites del contenido de azufre presente en los combustibles, que es un 0,5% para el año 2020 establecidos por la OMI y está recogido en la regulación 14 del Anexo VI del MARPOL.

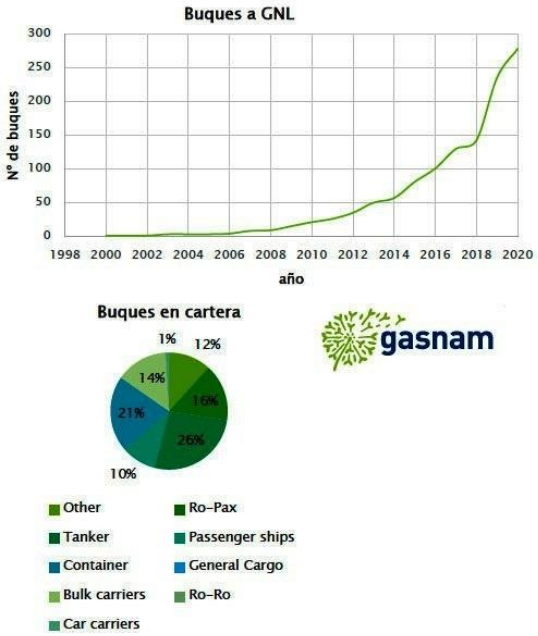


Ilustración 10. Buques propulsados por GNL (Fuente: Gasnam)

Mediante la siguiente gráfica se ha analizado cómo ha evolucionado la flota mercante entre los años 2012 y 2017, según cuatro tipos de buques: petroleros y quimiqueros, portacontenedores, carga general y gaseros. Vemos como los buques gaseros son el tipo de buque que más ha incrementado el número durante este intervalo de tiempo, seguido por los buques petroleros y quimiqueros. Este aumento en la flota de gaseros nos indica que hay un aumento en la oferta y la demanda de gas natural lo cual es un dato positivo para el futuro del GNL. Cabe decir que los gaseros son el único tipo de buque tiene una linealidad ascendente con un aumento de la flota del 23.22% y un promedio anual del 4.64%. Mientras que los buques de carga general son el tipo que menos ha aumentado en este periodo siendo un 1.16% y un promedio anual de 0.23%.

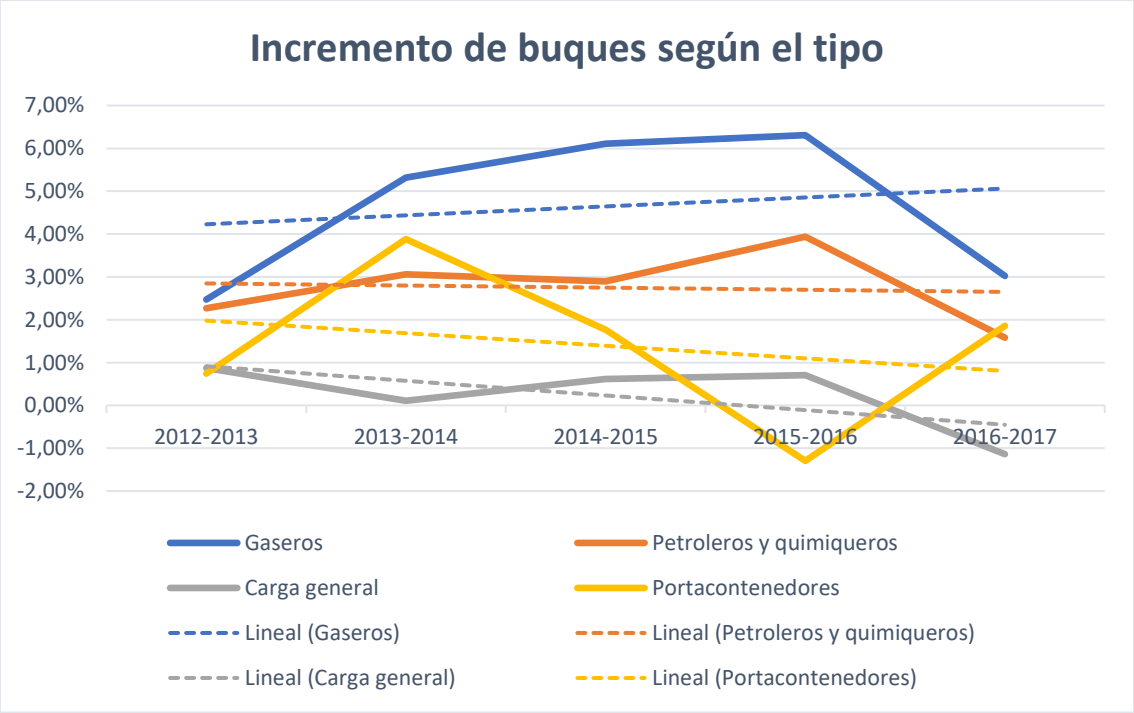


Ilustración 11. Aumento del porcentaje de buques según el tipo (Fuente: elaboración propia)

En cuanto a la clasificación de los buques gaseros, se ha estudiado el número de buques operativos dependiendo el tamaño del buque, clasificándolo en cuatro tipos expuestos en la gráfica a continuación.

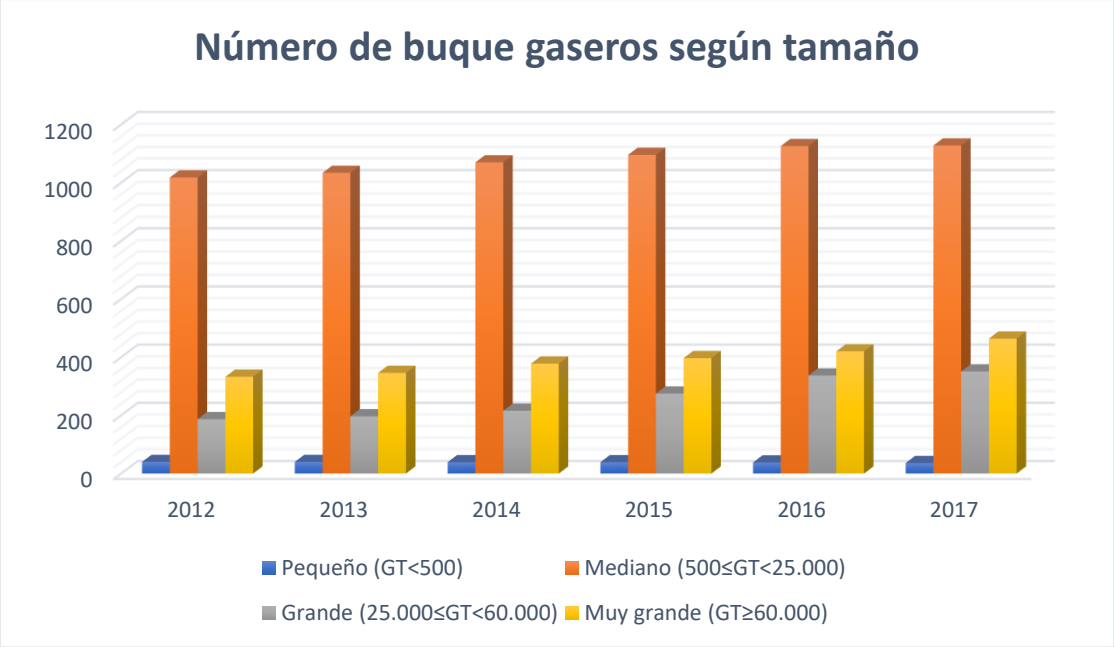


Ilustración 12. Incremento del número de buques según tamaño (Fuente: elaboración propia)

Según los datos analizados en la gráfica, podemos observar como la mayor parte de los buques gaseros que se utilizan son los que tienen un peso muerto comprendido entre 500 y 25.000 T o buques de tamaño mediano. Los buques medianos, son más versátiles que el resto ya que están diseñados para que puedan entrar en cualquier puerto, tengan una buena capacidad de carga y naveguen a una velocidad óptima.

Otro de los datos estudiados ha sido la clasificación de los buques gaseros dependiendo la antigüedad de estos. Estudiando los buques dependiendo cuatro intervalos de tiempo, se ve claramente que los buques de entre 5 y 14 años son los predominantes, seguidos por los buques con una antigüedad de entre 0 y 4 años. La suma de buques de estos dos intervalos supone un total de 1230 buques y un 62.15% de la flota total gaseros, con esto podemos concluir diciendo que la flota mercante activa de buques gaseros es relativamente joven.

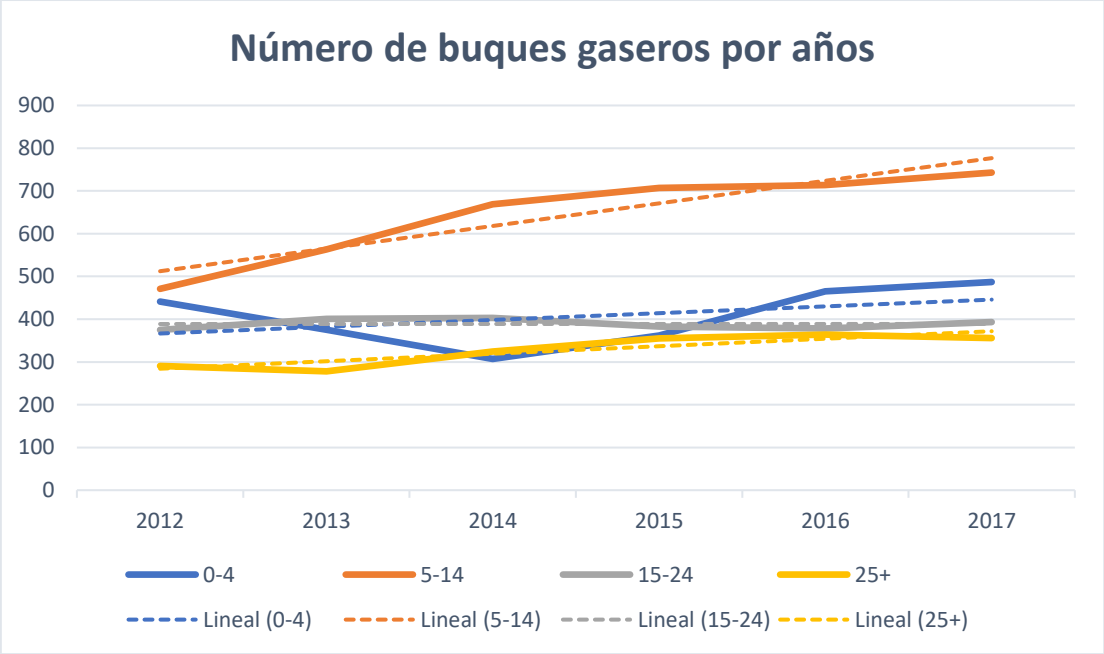


Ilustración 13. Incremento del número de buques según su antigüedad (Fuente: elaboración propia)

Capítulo 4. Motores para la propulsión GNL

Actualmente, los buques propulsados por GNL pueden estar equipados con dos tipos de motores: los motores de mezcla pobre o los motores dual fuel. Los motores de mezcla pobre cumplen con la regulación de la OMI de Nivel III, mientras que los motores dual fuel cumplen con la regulación de Nivel II cuando queman combustibles líquidos y cumplen con la regulación de Nivel III si queman combustible gaseoso como el gas natural.

4.1. Motores de mezcla pobre

Los motores de mezcla pobre están diseñados para funcionar con GNL y trabajar por medio del ciclo Otto. Estos tipos de motores usan una mezcla pobre no estequiométrica, es decir, usan una mayor parte de comburente (aire) y una pequeña parte de combustible (gas). Gracias a esto la temperatura que se alcanza en la cámara de combustión es menor que los motores de combustión convencionales y esto contribuye a una reducción en la formación de NOx. Dicha mezcla pobre es necesaria para prevenir la autoignición de la mezcla. Debido a los altos rangos de compresión y al óptimo tiempo de inyección del combustible se consigue una mayor eficiencia y una reducción de las emisiones de NOx.

Estos tipos de motores cumplen con la regulación de Nivel III de OMI sobre las emisiones de óxidos de azufre, tienen una alta eficiencia a altas cargas en comparación con motores diésel, trabajan a bajas presiones (4-5 bares) y utilizan una bujía para producir la combustión.

En cuanto al funcionamiento es muy similar al de un motor de combustión interna, la premezcla pobre de aire y gas se introduce en la cámara de combustión a baja presión (4-5 bares), dicha presión se consigue gracias al turbocompresor que nos incrementa la presión del aire de entrada, a través del conducto de admisión y seguidamente entra en el cilindro por medio de la válvula de admisión durante la etapa de admisión. Una vez ha entrado toda la mezcla en la cámara de combustión se comienza a comprimir hasta alcanzar el punto

muerto superior y se produce la combustión, por medio de una chispa creada por la bujía.

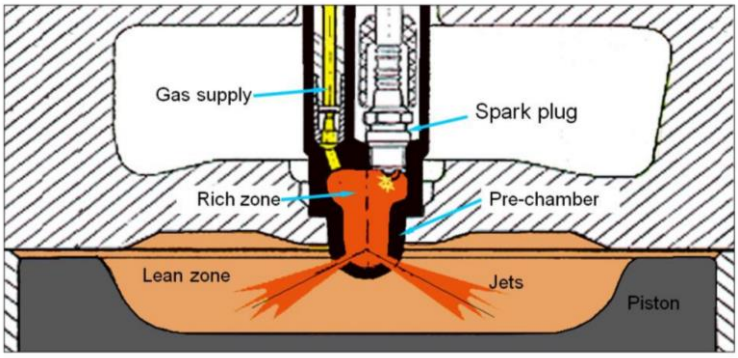


Ilustración 14. Representación gráfica de las partes de un sistema de ignición de un motor de mezcla pobre (Fuente: On The MoS Way)

4.1.1. Motores Rolls-Royce

Rolls-Royce es uno de los principales productores de motores de mezcla pobre del sector marítimo. Actualmente, ha desarrollado dos tipos de motores de gas: el Bergen B36:45 y el Bergen C26:33, poseen distintas configuraciones, son motores de velocidad media y se caracterizan por tener una gran eficiencia, bajo coste operacional, una reducción de las emisiones de SOx y materia particulada del 100% y una reducción de emisiones de NOx del 90%, que les permite cumplir con la regulación de Nivel III de la OMI.

Modelo	Tipo	Configuración	Potencia (kW)	Velocidad (rpm)
Bergen C26:33	C26:33L6PG	6 cilindros en línea	1.460/1.620	900/1000
	C26:33L8PG	8 cilindros en línea	1.940/2.160	900/1000
	C26:33L9PG	9 cilindros en línea	2.190/2.430	900/1000
Bergen B36:45	B36:45L6P	6 cilindros en línea	3.600	750
	B36:45L8P	8 cilindros en línea	4.800	750
	B36:45L9P	9 cilindros en línea	5.400	750
	B36:45L12P	12 cilindros en V	7.200	750
	B36:45L16P	16 cilindros en V	9.600	750

Tabla 6. Modelo, tipo y características principales de los motores a gas de Rolls-Royce (Fuente: elaboración propia)

En el modelo Bergen B36:45 los cilindros tienen un diámetro de 350mm y una carrera de 400mm, está equipado con un turbocompresor de geometría variable, una válvula de tiempo variable para una óptima respuesta y aumento de carga.

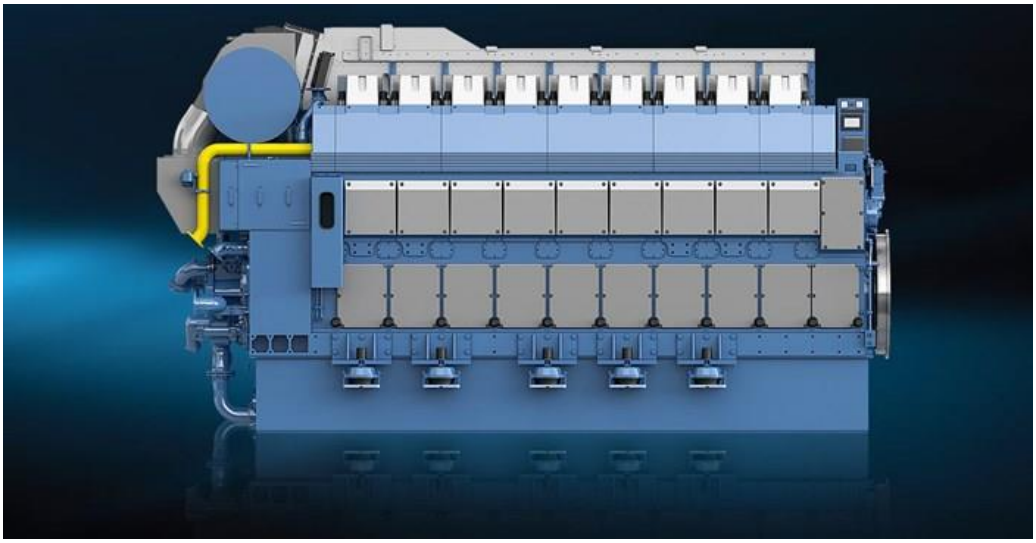


Ilustración 15. Motor Bergen B36:45 (Fuente: Rolls-Royce)

En el modelo Bergen C26:33 los cilindros están fabricados con un diámetro de 260mm y una carrera de 330mm, está equipado con un turbocompresor de geometría variable lo que le permite una óptima respuesta en cualquier régimen de carga y se caracteriza por tener un bajo consumo.

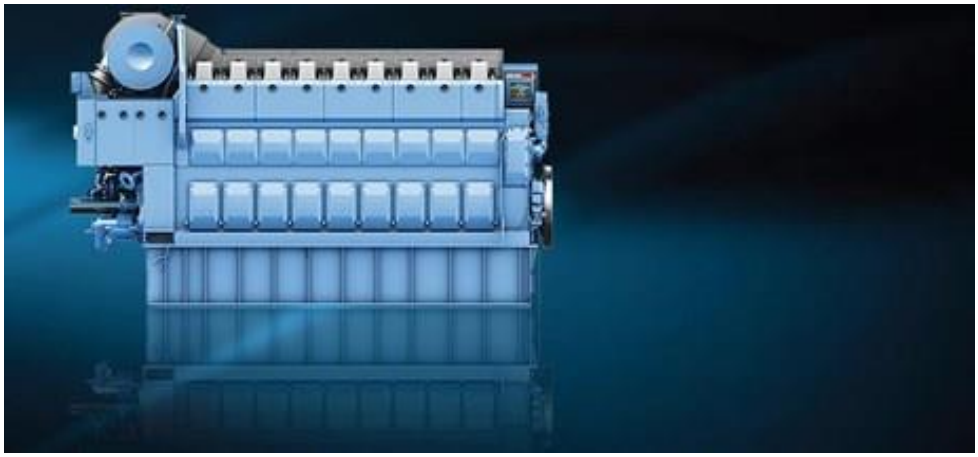


Ilustración 16. Motor Bergen C26:33 (Fuente: Rolls-Royce)

4.2. Motores dual fuel

Los motores dual fuel están diseñados para trabajar con dos tipos de combustibles, los combustibles líquidos, diésel marino o fuelóleo pesado, y el combustible gaseoso, el gas natural licuado. Cuando los motores utilizan combustible diésel marino o fuelóleo pesado trabajan de acuerdo con el ciclo Diesel y el combustible se inyecta en la cámara de combustión por medio de un sistema de inyección. En cambio, cuando trabajan con gas lo hacen de acuerdo con el ciclo Otto, con una mezcla empobrecida de aire y gas en la cámara de combustión, y para producir la combustión, debido que el gas natural tiene una alta temperatura de autoinflamación (599 ºC), se utiliza una pequeña cantidad (<5%) de combustible diésel marino como llama piloto lo que produce una combustión controlada.

Cabe decir, que en el caso de que un buque quiera pasar de motores diésel a motores dual fuel no es necesario cambiar toda la sala de máquinas para poder adaptar el buque a los motores dual fuel, se puede hacer una remotorización de los motores que ya posee el buque y convertirlos en motores dual fuel con la ventaja de poder cumplir con las regulaciones de la OMI.

Los motores dual fuel trabajan a bajas presiones (4-5 bares), con una alta eficiencia a altas cargas, con la posibilidad de trabajar con dos combustibles y con el cumplimiento de la regulación de Nivel II cuando trabajo con diésel marino y con la regulación de Nivel III cuando trabaja con gas.

En el caso de los motores dual, cuando el motor opera con combustible líquido el funcionamiento es igual al de un motor diésel marino convencional, el aire entra a la cámara de combustión a través del conducto de admisión y la válvula de admisión durante la carrera de admisión del pistón, y durante la carrera de compresión se introduce el combustible a alta presión a través de un inyector provocando la combustión del combustible debido a la alta temperatura resultante de la compresión. En cambio, cuando opera en modo combustible

gaseoso, el aire pasa a través del conducto de admisión y se inyecta el combustible a baja presión (4-5 bares) a través de un inyector, formando una premezcla de aire y gas natural en el conducto de admisión, que se introduce en la cámara de combustión a través de la válvula de admisión y durante la carrera de admisión, se comienza a comprimir la mezcla en la carrera de compresión y se inyecta una pequeña de combustible diésel marino como llama piloto para completar la combustión de una forma controlada y eficiente.

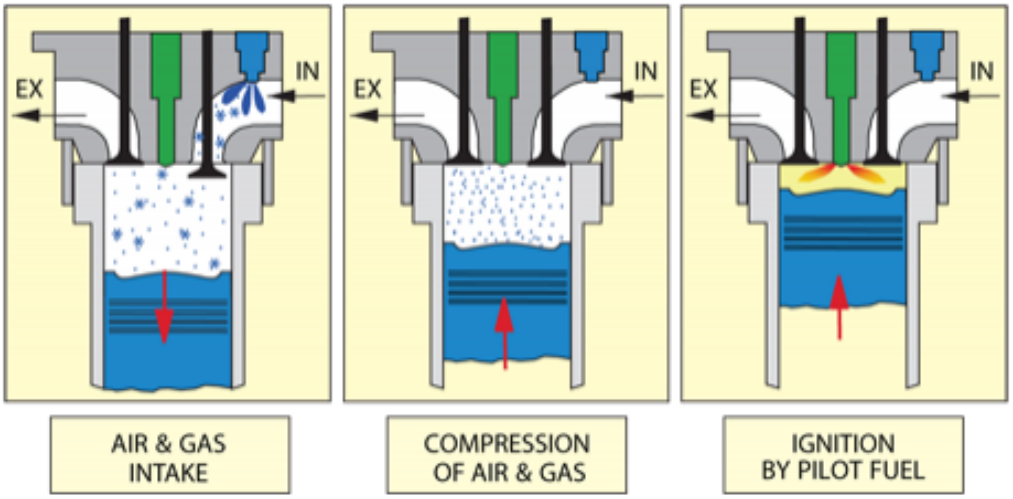


Ilustración 17. Representación gráfica del funcionamiento de un motor DF

(Fuente: Target Global Energy Training)

4.2.1. Motores Wärtsilä

Wärtsilä es uno de los fabricantes de motores marinos más conocidos a nivel mundial y ha desarrollado distintos modelos de motores dual fuel de cuatro tiempos: Wärtsilä 20 DF, Wärtsilä 31DF, Wärtsilä 34DF, Wärtsilä 46DF y Wärtsilä 50DF. Todos los modelos están disponibles en diversas configuraciones y diseñados para que cuando consuman combustible líquido puedan cumplir con la regulación de Nivel II y cuando consuman combustible en estado gaseoso cumplan con la regulación de Nivel III sin necesidad de un sistema de postratamiento de los gases de escape.

El gas se suministra al motor a través de unas válvulas donde se filtra y se controla su presión. Los motores están dotados de un sistema de apagado y válvulas de venteo para garantizar un suministro de gas a baja presión de forma segura. Cuando trabaja con gas, la premezcla de aire y gas es combustionada por una pequeña cantidad de diésel marino, menos del 1% del consumo total a plena carga, que hace la función de llama piloto. La cantidad de la llama se regula por medio de un sistema de control y monitorización de la velocidad y carga del motor para producir una combustión óptima y eficiente.

Los motores dual fuel de Wärtsilä se caracterizan por su ahorro de combustible durante todo el régimen de trabajo del motor, los largos periodos de tiempo entre revisiones, las bajas emisiones de gases de escape, el sistema de automatización integrado y la fiabilidad de la tecnología dual. Estos motores están diseñados para cambiar el consumo de combustible de diésel marino a gas natural, y viceversa, de forma gradual mientras el motor sigue en funcionamiento. Durante el consumo de gas natural, cambia automáticamente a combustible líquido si el suministro de gas se viera interrumpido o hubiera algún fallo en algún componente. El periodo de tiempo para realizar el cambio de combustible es menos de un segundo y no supone ninguna variación en el régimen de trabajo del motor ni en la potencia que entrega.

Modelo	Tipo	Configuración	Velocidad (rpm)	Potencia (kW)
Wärtsilä 20DF	6L20DF	6 cilindros en línea	1000/1200	960/1110
	8L20DF	8 cilindros en línea	1000/1200	1280/1480
	9L20DF	9 cilindros en línea	1000/1200	1440/1665
Wärtsilä 31DF	8V31DF	8 cilindros en V	750	4400
	10V31DF	10 cilindros en V	750	5500
	12V31DF	12 cilindros en V	750	6600
	14V31DF	14 cilindros en V	750	7700
	16V31DF	16 cilindros en V	750	8800
Wärtsilä 34DF	6L34DF	6 cilindros en línea	750	3000
	8L34DF	8 cilindros en línea	750	4000
	9L34DF	9 cilindros en línea	750	4500
	12V34DF	12 cilindros en V	750	6000
	16V34DF	16 cilindros en V	750	8000
Wärtsilä 46DF	6L46DF	6 cilindros en línea	600	6870
	7L46DF	7 cilindros en línea	600	8015
	8L46DF	8 cilindros en línea	600	9160
	9L46DF	9 cilindros en línea	600	10305
	12B46DF	12 cilindros en V	600	13740
	14V46DF	14 cilindros en V	600	16030
	16V46DF	16 cilindros en V	600	18320
Wärtsilä 50DF	6L50DF	6 cilindros en línea	500/514	5700/5850
	8L50DF	8 cilindros en línea	500/514	7600/7800
	9L50DF	9 cilindros en línea	500/514	8550/8775
	12V50DF	12 cilindros en V	500/514	11400/11700
	16V50DF	16 cilindros en V	500/514	15200/15600
	18V50DF	18 cilindros en V	500/514	17100/17550

Tabla 7. Modelo, tipo y características principales de los motores dual fuel de Wärtsilä

(Fuente: elaboración propia)

Los modelos Wärtsilä 46DF y Wärtsilä 50DF son los motores dual fuel más potentes de la compañía y poseen un historial excelente, con más de 700 motores en funcionamiento y 9 millones de horas de funcionamiento con la tecnología dual fuel de Wärtsilä.

Ilustración 18. Motor Wärstilä 50DF (Fuente: Wärtsilä)

En la siguiente gráfica podemos ver la comparativa de emisiones de gases de escape en un buque RoPax entre un motor diésel convencional y el motor Wärtsilä 46DF. Con el motor de dual fuel se logra una reducción de emisiones de gases nocivos, como sigue:

- 30.000 toneladas/año menos de emisiones de CO2.
- 1.800 toneladas/año menos de emisiones NOx.
- 75 toneladas/año menos de emisiones de SOx.
- 25 toneladas/año menos de emisiones de materia particulada.

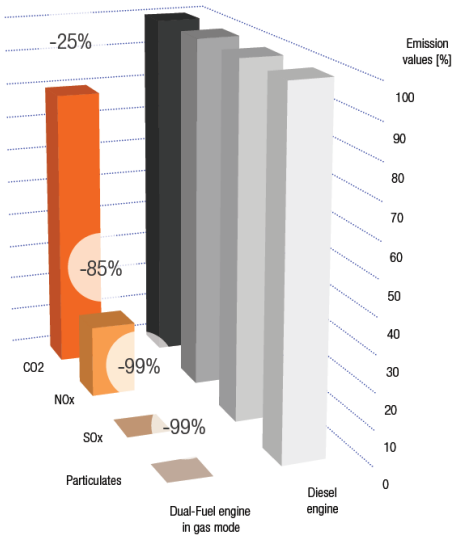


Ilustración 19. Comparativa de emisiones entre un motor DF en modo gas y un motor diésel convencional (Fuente: Wärtsilä)

A continuación, se muestra una tabla elaborada con todos los datos analizados anteriormente en la cual vienen representados los distintos tipos de motores y para qué tipo de buque están diseñados y son más eficientes instalarlos:

	Motores dual fuel					**Motores a gas**	
	Wärtsilä 20DF	Wärtsilä 31DF	Wärtsilä 34DF	Wärtsilä 46DF	Wärtsilä 50DF	Bergen C26:33	Bergen B36:45
Portacontenedor		X					
Petrolero		X				X	X
Gasero	X		X	X		X	X
Carga general	X	X			X	X	X
RoPax	X	X		X			
Remolcador	X		X		X	X	X
Ferri	X	X	X	X	X	X	X
Crucero				X		X	X
Offshore			X			X	X

Tabla 8. Motor en función del tipo de buque

(Fuente: elaboración propia)

Asimismo, se ha elaborado una tabla adicional en las cual vienen recogidos los beneficios clave del diseño de cada tipo de motor estudiado durante el transcurso de este trabajo, como sigue:

	Beneficios clave
Wärtsilä 20DF	- Flexibilidad de combustible - Flexibilidad de aplicación - Tecnología de combustible dual probada y fiable - Largos intervalos de revisión - Baja emisión de gases de escape. - Baja presión de alimentación del gas - Sistema de automatización integrado
Wärtsilä 31DF	- Mínimo consumo de combustible en un amplio rango de operación - El cilindro con mayor potencia de su gama, 610 kW / cilindro - Disponible en versiones diésel, dual fuel y gas - Cumple con la regulación IMO de Nivel III cuando opera con gas y con combustible diésel cuando usa un SCR (Selective Catalytic Reduction)
Wärtsilä 34DF	- Flexibilidad para operar con gas natural y combustibles líquidos - Alta eficiencia - Bajas emisiones - Baja presión de gas - Combustible piloto para el encendido del gas - Control avanzado - Funcionamiento en modo gas (0-100%)
Wärtsilä 46DF	- Cumple con la regulación IMO de Nivel III - El consumo más bajo de combustible de gas y fuelóleo del sector - El motor a gas de 4 tiempos más potente del mercado - Flexibilidad de combustible - Tecnología de combustible dual probada y fiable - Intervalos largos de revisión - Bajas emisiones de gases de escape - Baja presión de alimentación del gas - Sistema de automatización integrado
Wärtsilä 50DF	- Tecnología de combustible pesado probada y fiable - Instalación fácil y rentable - Largos intervalos de revisión - Baja emisión de gases de escape - Ahorro de combustible en todo el rango de operación del motor - Consumos mínimos gracias al diseño modular - Sistema de automatización integrado
Bergen C26:33	- Compacto y potente - Emisiones excepcionalmente bajas de NOx, CO2, SOx y partículas - Bajo consumo de energía - Respuesta óptima en todos los puntos de carga del motor (VTG)
Bergen B36:45	- Diseño compacto y modular - Cumple con la regulación OMI de Nivel III - En caso de vertido, no produce tanto impacto ambiental - Cumplimiento a largo plazo de las regulaciones portuarias locales - Misma potencia que la versión diésel: 600 kW / cilindro. - VVT - sincronización variable de válvulas para una respuesta óptima y aumento de carga - VTG - Turbo de Geometría Variable

Tabla 9. Beneficios clave de cada tipo de motor

(Fuente: elaboración propia)

Capítulo 5. Bunkering de GNL

5.1. Operativas de bunkering

Uno de los principales factores que influyen en la implementación de GNL como combustible es el proceso de bunkering, que consiste en el suministro de GNL al buque. Se puede considerar diversas vías para lograr realizar dicho suministro, como:

Pipe-to-ship (PTS): consiste en el suministro de GNL desde la terminal por medio de una infraestructura necesaria para dicha transferencia de combustible. Esta infraestructura está compuesta por el tanque de almacenamiento de GNL, el muelle de carga dedicado para el suministro de GNL (como brazos de carga, conectores y sistemas de carga) y una tubería para el suministro del combustible desde los tanques de almacenamiento hasta el buque. Este es el procedimiento de trasiego más seguro de los que se exponen ya que se puede ubicar el tanque de almacenamiento a cierta distancia del muelle.

Ilustración 20. Operativa de bunkering PTS (Fuente: Gasnam)

Escandinavia ha comenzado a invertir en la construcción de nuevas terminales de GNL, buques tanque de pequeña escala y buques para el suministro de GNL debido al aumento de la demanda de GNL para la propulsión y generación de energía en la zona del mar Báltico.

La compañía de motores marinos Wärtsilä es uno de los principales inversores de la construcción de la nueva terminal de GNL en el puerto de Hamina, Finlandia. Ésta terminal es uno de los proyectos que se están llevando a cabo

consecuencia de la creciente demanda del uso de energías más respetuosas con el medio ambiente y con el suministro de GNL.

La terminal primeramente tendrá una capacidad total de 30.000 m^3, una expansión posterior de la terminal podría aumentar su capacidad en 20.000 m^3 adicionales, para el almacenaje de GNL y capacidad de regasificación para distribuirlo por una red de conductos existentes a nivel nacional e internacional. Además, la terminal podrá cargar camiones, buques de bunkering y pequeños transportes propulsados con GNL.

Ilustración 21. Puerto de Hamina (Fuente: Port of Hamina)

Ship-to-ship (STS): consiste en el suministro de un buque a otro, previamente diseñados para dicho propósito. Existen dos tipos de buques en el mercando para llevar acabo el suministro de GNL:

- **Gabarra multicombustible:** se resume en equipar una gabarra con tanques cisternas sobre cubierta en los que va almacenado el GNL y los distintos tipos de sistemas necesarios para hacer la transferencia de GNL como mangueras, bombas, etc.
- **Buque específico de suministro de GNL:** son buques diseñados para tal fin y suelen tener una capacidad de entre 5.000 y 10.000 m^3.

El uso de esta alternativa para realizar el bunkering tiene mayor flexibilidad a la hora suministrar GNL respecto a los otros métodos ya que puede abastecer a cualquier buque en cualquier muelle. Asimismo, tampoco impiden que cesen la operativa de carga mientras se está realizando el bunkering ya que se realiza por la banda de mar.

Ilustración 22. Operativa de bunkering STS (Fuente: Sector Marítimo)

Kairos es un buque tanque diseñado para el suministro de combustible GNL a otros buques. Fue construido en 18 de mayo de 2018 por la compañía Hyundai Mipo Dockyard en Corea del Sur. Está equipado con un sistema de doble propulsión con dos propulsores azimutales Wärtsilä 9L20DF con una potencia de 1665 kW cada uno y un sistema de trasiego para transferir 1.250 m^3/hora. Actualmente, es el buque de suministro de GNL más grande y con mayor capacidad construido hasta la fecha, con unas dimensiones de 117 m de eslora y 20 m de manga, un peso muerto 4.376 T y con una capacidad de almacenaje total de 7.500 m^3.

Se ha diseñado para que suministre GNL a todos los buques que lo necesiten por la zona del mar Báltico. Su principal puerto de atraque es Oxelosund situado en el país nórdico de Suecia.

El 21 de abril de 2019 el buque Wes Amelie, el primer buque portacontenedores remotorizado para la propulsión GNL, fue abastecido por medio de la operativa STS por el buque Kairos en la zona de fondeo frente a Visby, Suecia.

Gracias a la nueva incorporación de este buque marcará un punto de inflexión en el suministro de GNL a gran escala en la zona del mar Báltico ya que asegurará un precio más competitivo en la cadena de suministro de GNL. Además, garantizará un servicio más fluido y fiable para los usuarios de la estación de distribución de Klaipėda.

Ilustración 23. Buque Kairos (Fuente: MarineTraffic)

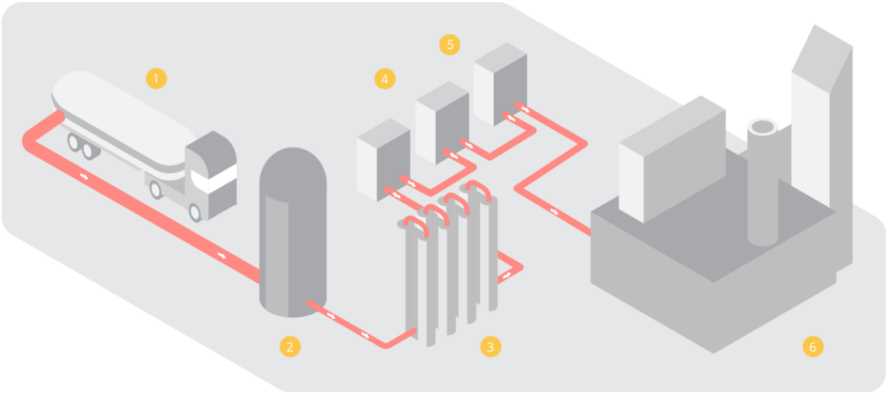
Truck-to-ship (TTS): consiste en el suministro de GNL desde uno o varios camiones cisternas situados en el muelle de carga hasta el buque atracado. Este es el método más barato para la operativa de bunkering ya que no es necesario infraestructura para lograr hacer la transmisión del GNL. Sin embargo, tiene el inconveniente de que es un proceso lento, aunque se puede aumentar la velocidad agregando un mayor número de camiones cisterna. Además, este método suele ocupar una amplia zona del muelle de carga y se exige cierto nivel de seguridad cuando se está realizando dicha operativa.

Ilustración 24. Operativa de bunkering TTS (Fuente: LNG World Shipping)

Elenger es la única compañía especializada con un suministro fiable y flexible de GNL mediante el método de bunkering TTS en la zona del Mar Báltico. El GNL que utilizan proviene principalmente de Rusia, Polonia, Finlandia y Lituania por medio de camiones especializados.

Durante un mes, suministran aproximadamente un total de 1300 T de GNL y llevan a cabo una media de 65 operativas de bunkering. Los camiones están equipados con potentes bombas con un flujo de transferencia de 1000 L/min haciendo posible que la operativa de combustible se realice en 45 minutos. Además, dependiendo del tipo de buque pueden acoplar más de un camión simultáneamente durante el suministro de combustible para reducir los tiempos de la operativa.

Dicha compañía es el principal proveedor de combustible del buque Tallink Megastar, el cual es un buque tipo ferry Ro-Ro y navega entre Tallinn y Helsinki, suministrando GNL seis veces diarias. Del mismo modo, están llevando a cabo un proyecto que es la construcción de un buque para el suministro de GNL en la zona nordeste del Mar Báltico. Está establecido que dicho buque estará operativo el otoño de 2020.



1. **Cryogenic tank trailer** LNG is delivered to the station in special cryogenic tank trailers where the gas will be held under low pressure. Average trailer holds up to 18,5 tons of LNG which gives 25 600 m3 of gaseous natural gas upon re-gasification.
2. **Cryogenic containers** These are used to store LNG. The design of the container allows storing the fuel in low temperatures up to -162 degrees. Containers come in different sizes but the average is around 40-60 m3. One station can hold several containers.
3. **Regasification unit**
4. **Natural gas regulating station**Lowering the pressure of natural gas before it reaches the consumption point.
5. **Boiler room, odorising** Natural gas is odourless. Adding odour to the gas will help detect potential leakages more easily.
6. **Plant boiler room**

Ilustración 25. Etapas del bunkering TTS. (Fuente: Elenger)

5.2. Estaciones de bunkering de GNL a nivel mundial

A lo largo de estos últimos años se han ido construyendo diversas infraestructuras para el suministro del GNL lo cual ha hecho posible el uso de GNL como combustible para la propulsión en la flota mercante. Del mismo modo, se está aumentando y discutiendo las futuras construcciones de nueva infraestructura para el apoyo de este nuevo como combustible. Gracias a una plataforma virtual denominada “Alternative Fuels Insight” de la compañía DNV-GL, podemos observar las distintas infraestructuras de suministro de GNL a nivel internacional que hay operativa en la actualidad, las que se encuentran en construcción y las que se encuentran bajo discusión. Hay un total de 88 terminales y buques que se encuentran operativos hoy en día, un total de 42 terminales y buques que se encuentran bajo construcción y/o se han decidido y un total de 42 que se encuentran bajo discusión.

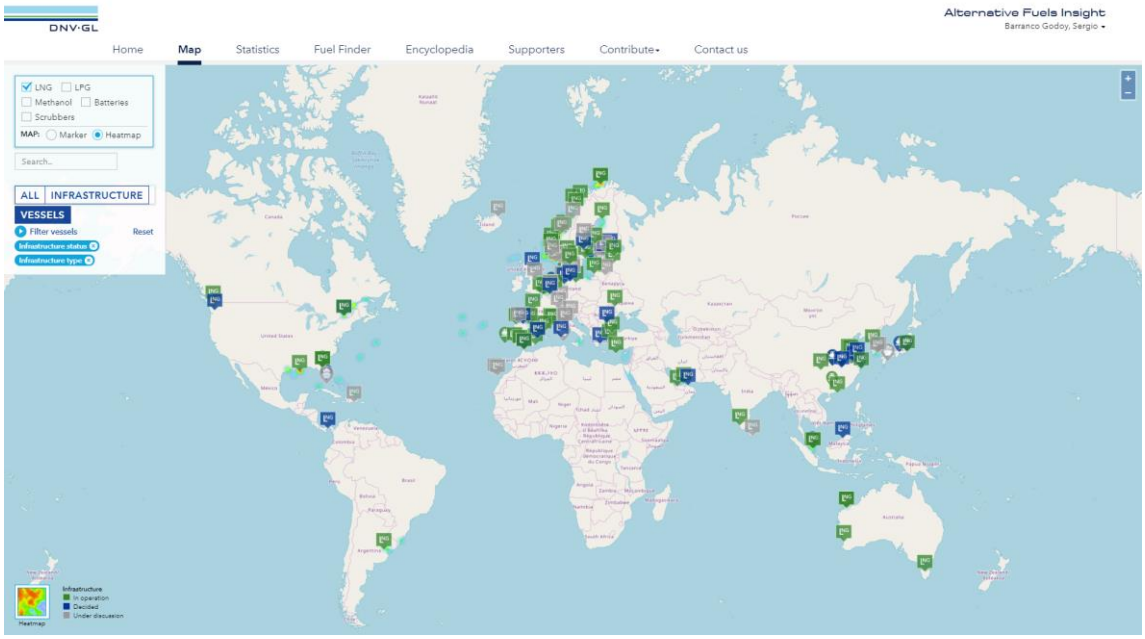


Ilustración 26. Mapa de estaciones de bunkering de GNL (Fuente: DNV-GL)

5.3. Principales puertos de bunkering

Los tres puertos de bunkering más grandes del mundo son el puerto de Singapur, el puerto de Rotterdam y el puerto de Fuijarah. El conjunto de las operativas de bunkering de estos tres puertos supone un tercio de todo el combustible marino que se consume alrededor del mundo.

5.3.1. Puerto de Singapur

El puerto de Singapur es considerado uno de los puertos con mayor tráfico de buques al año. Durante el año 2018 ha realizado servicios de bunkering con más de 49,8 millones de toneladas de combustible suministradas. Posee dos muelles dedicados al suministro de GNL, en los cuales ofrece servicios de carga y descarga tanto de buques como camiones de GNL, almacenaje y el envío de GNL regasificado a la red de gas de Singapur. Está dotado de cuatro tanques de almacenaje, tres de ellos con una capacidad de 188.000 m^3 cada uno y uno con una capacidad de 260.000 m^3.

5.3.2. Puerto de Rotterdam

La ciudad holandesa es una de las pioneras en el uso de GNL y se está planteando convertir el puerto de Rotterdam en una instalación de GNL. Durante el año 2018 suministro un total de 9,5 millones de toneladas de combustible, de las cuales 9.500 toneladas fueron de combustible GNL. Posee tres tanques de almacenaje con una capacidad de 180.000 m^3 cada uno, dando la posibilidad de realizar grandes descargas de GNL. Se puede realizar el suministro por medio de los tres distintos métodos: PTS, STS y TTS.

5.3.4. Puerto de Fujairah

El puerto de Fujairah es uno de los más importantes para el transporte de mercancías vía marítima de los Emiratos Árabes Unidos. Durante el año 2018 realizó operativas de bunkering por un total de 9 millones de toneladas de combustible suministrada. En la actualidad el puerto de Fujairah no posee infraestructura para el bunkering de GNL, pero hay un proyecto enfocado a ello. El proyecto está dividido en dos fases, en la primera fase se construirá una planta de regasificación de 9 millones toneladas/año de GNL y un tanque de almacenaje de 14.150 m^3/hora, en la segunda fase se construirá otra planta de regasificación y tanque de almacenaje de 6 millones toneladas/año de GNL.

Ilustración 27. Mapa de los puertos de bunkering más importantes (Fuente: IAMA Marine)

5.4. Bunkering en España

La península ibérica dispone de una posición geográfica, debido al cruce de rutas marítimas, idónea para promover el bunkering y uso de gas natural licuado gracias a las plantas de regasificación, los gaseoductos y las infraestructuras de las que dispone.

Planta de regasificación	**Capacidad total GNL**		**Capacidad de carga en cisternas**	**Atraques**	
	No. tanques	m^3 GNL	GWh/día	No. atraques	m^3 GNL
Barcelona	8	840.000	15	2	80.000 – 266.000
Huelva	5	619.500	15	1	140.000
Cartagena	5	587.000	15	2	40.000 – 266.000
Sagunto	4	600.000	11	1	260.000
Bilbao	2	300.000	-	1	270.000
Murgados	2	300.000	7	1	216.000
Total	26	3.246.500	63	8	40.000 – 270.000

Tabla 10. Características de las plantas de regasificación de España (Fuente: elaboración propia)

A lo largo del año 2018 se han realizado diversos proyectos para mejorar la infraestructura de bunkering de GNL (suministro de combustible para buques) en los puertos españoles. Las plantas de regasificación que más preparas están son la de Barcelona y Bilbao ya que cuentan con pantalanes preparados para hacer las operaciones del bunkering “PTS”. De igual modo, las plantas de regasificación de Cartagena y Murgados están en el proceso de adaptación. Las adaptaciones de las plantas de Huelva y Sagunto se llevarán en el proyecto Core LNGas Hive. Este proyecto está pensado ser ejecutado durante el plazo hasta 2022 y consiste en adaptar dichas plantas para que puedan abastecer a los buques con GNL.

5.4.1. CORE LNGas Hive

Tras los más de 50 años de innovación en alternativas logísticas en el sector gasista y gracias a que el estado español es el primer país en infraestructura surgió el proyecto CORE LNGas Hive. Este proyecto consiste en una cadena logística para el suministro de gas natural licuado de forma eficiente y segura. Está impulsado por 42 empresas, 21 privadas y 21 públicas, con un presupuesto de 33,3 millones de euros, de los cuales, 16,65 millones son financiados por la UE con el principal objetivo de crear una cadena logística integrada, segura y eficiente para el suministro de GNL como combustible en el sector marítimo, en la Península Ibérica. Asimismo, gracias a la creación de esta cadena logística se pretende conseguir los siguientes propósitos:

- Contribuir en la reducción de emisiones contaminantes en el transporte marítimo.
- Avanzar en el proceso de descarbonización de la península ibérica.
- Fomentar el uso de GNL en la industria marítima.
- Dar a conocer el sector de GNL de la península ibérica a nivel europeo.

Ilustración 28. Representación gráfica de la infraestructura del proyecto CORE LNGas Hive (Fuente: Enagas)

Es un proyecto que consta de 25 estudios, 14 de los cuales son el software del proyecto y tienen como función identificar los estándares necesarios para un desarrollo del GNL como combustible. Los 11 restantes son estudios con proyectos piloto, en los cuales se llevarán a cabo pruebas en partes reales de la cadena logística de GNL necesarias para la operativas de suministro de GNL a buques, donde se incluye la adaptación de las terminales para ofrecer el servicio a pequeña escala, el desarrollo de barcos para el suministro y promover el uso

de GNL en el sector portuario (grúas portacontenedores, generadores eléctricos con GNL y remolcadores). También, por medio de este proyecto se facilita unas directrices “know-how” que ofrece el desarrollo de procedimientos, legislación y el establecimiento de actividades de formación para el resto de los países europeos, con el fin de fomentar la expansión del uso de GNL a nivel internacional.

En el programa del proyecto viene recogido la adaptación de las plantas de regasificación de Huelva y Sagunto para que puedan ofrecer servicios de suministro de GNL como combustible. Además, está previsto la introducción del GNL en el “Corredor ferroviario verde” entre el puerto de Huelva y la terminal ferroviaria de Majarabique (Sevilla). En concreto, el proyecto establece la construcción de una estación de suministro de GNL en dicha terminal y la conversión de una locomotora de tracción diésel a GNL. El proyecto puso como plazo de ejecución hasta el año 2022.

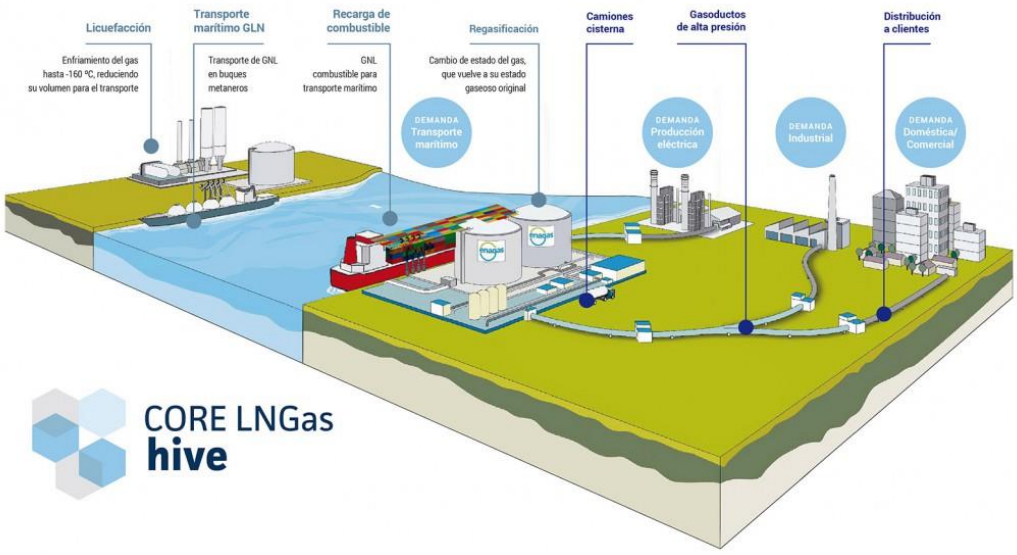


Ilustración 29. Representación gráfica del proyecto CORE LNGas Hive (Fuente: Enagas)

5.5. Reservas de gas natural

Durante los últimos años se han hallado reservas de gas natural lo cual hace superar a las reservas de petróleo, esto da pie a que el gas natural sea el combustible fósil con mayor esperanza de vida. Gracias al volumen total de reservas de gas natural que hay actualmente, puede garantizar un desarrollo sostenible para su consumo durante aproximadamente 60 años, mientras que las reservas de petróleo están estimadas en una duración total de unos 40 años según la Agencia Internacional de la Energía.

Por medio de los datos anuales de la empresa BP, el año 2016 había un total de 186,6 billones de metros cúbicos de reservas de gas natural. De dichas reservas, el 42.5% se encuentran en Oriente medio y el 30.4% en Rusia y Europa, de tal forma, estás tres zonas acumulan más del 70% de las reservas totales. Asimismo, Rusia, Irán y Qatar son considerados los principales países en reservas de gas natural ya que contemplan aproximadamente el 54% del volumen total.

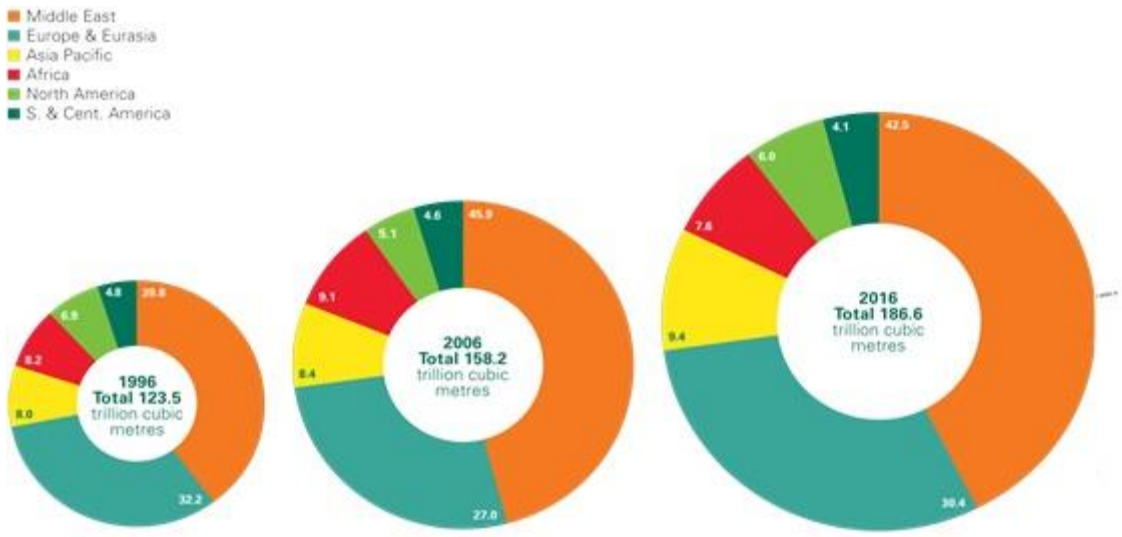


Ilustración 30. Reservas de gas natural a nivel mundial (Fuente: British Petroleum)

5.6. Precio de los combustibles

El mercado globalizado del GNL y la volatilidad de los mercados de suministro de combustibles nos conducen a un futuro imprevisible sobre el precio de los combustibles. El precio del combustible GNL puede convertirse más competitivo frente a los combustibles con bajo contenido en azufre a medida que entre en vigor las regulaciones de la OMI sobre el contenido en azufre de los combustibles en el año 2020.

El aumento de la demanda de GNL es un aspecto muy importante ya que esto repercutirá favorablemente en el precio de este. No obstante, el precio actual del GNL varía según las regiones mientras que el mercado de petróleo es igual a nivel mundial. Muchas compañías navieras son operadores globales encargados de la búsqueda de combustibles baratos en todo el mundo, pero a diferencia del mercado mundial del petróleo, los mercados del GNL son regionales. Debido que el precio del GNL puede variar de forma significativa de una región a otra, la economía relativa del GNL puede variar frente la de otros combustibles.

Como podemos observar en la siguiente gráfica, viene representado una comparativa de la fluctuación de los precios en el transcurso de 2009 hasta 2020, de los tres principales índices de suministro de GNL, de las regiones más importantes del bunkering de GNL: Europa (NBP), Estados Unidos (Henry Hub) y Japón/Corea (JKM).

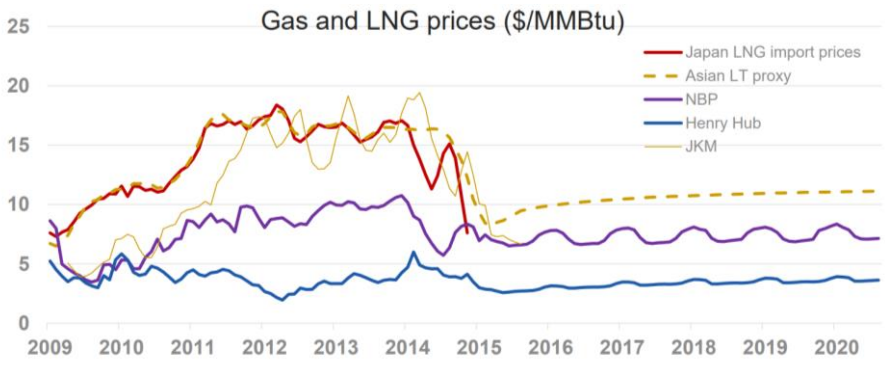


Ilustración 31. Comparativa del precio del GNL de distintos continentes (Fuente: DNV-GL)

En la siguiente gráfica viene representado los distintos precios entre el combustible GNL, LSGO y HSFO. Los precios son establecidos por medio de la cantidad de energía del combustible, lo cual es más relevante que la cantidad.

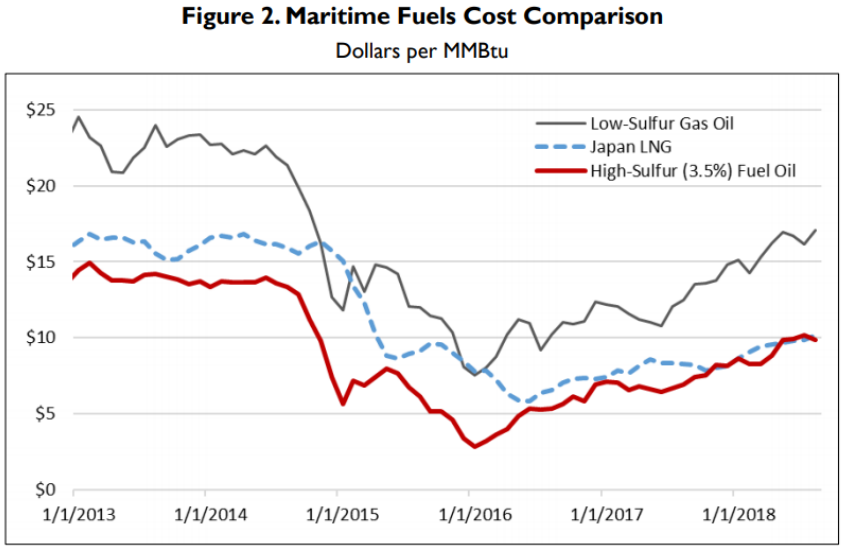


Ilustración 32. Comparativa de los precios del MDO, LNG e IFO (Fuente: OMI)

Aunque los precios de los combustibles indican una economía favorable para el GNL frente al combustible con bajo contenido en azufre (LSGO), si el precio del combustible con alto contenido en azufre (HSFO) disminuye drásticamente, como algunas personas esperan después de la entrada en vigor de la regulación de la OMI de 2020, cabe la posibilidad que el GNL pierda esa ventaja de precio respecto a los otros combustibles. Asimismo, la diferencia de precios el LSGO y el HFO puede incentivar el uso de scrubbers para todos aquellos armadores que prefieren ahorrar dinero y seguir apostando por el inferior precio del HSFO.

Sin embargo, para realizar la comparación del precio del combustible entre LSGO y GNL hay que tener en cuenta un número de variables que deben ser analizadas para hacer una estimación sobre el precio del suministro de GNL. Los aspectos que influyen más sobre el precio del GNL son el proceso de licuefacción y el coste de bunkering. El coste de licuefacción depende del coste capital de la planta de licuefacción, de los costes operacionales y de la media de uso de la capacidad de la planta.

En la siguiente tabla se muestra un análisis de estimación sobre el precio de bunkering de GNL en Norte América. Este análisis se basa en el supuesto coste capital y operacional de una planta de licuefacción a pequeña escala, así como el coste de distribución por conductos y transporte por medio de camiones. Además, se establece un margen de ganancias de $5.00 para la industria.

Price Estimate for LNG Bunker		
Cost of gas: $/mmbtu (Henry Hub)	$4.00	mmBTU
Pipeline charge: 0.5	$0.50	mmBTU
Liquefaction Cost	$5.09	mmBTU
Trucking @ $7/load mile: 0.9	$0.90	mmBTU
Total at dock:	$10.49	mmBTU
Bunkering:	$5.00	mmBTU
Total at sea:	$15.49	mmBTU

Ilustración 33. Estimación del precio de bunkering de GNL en Norte América (Fuente: OMI)

Estados Unidos es el líder en la producción mundial de gas natural, desde el año 2009, tras superar a Rusia. Durante el transcurso de 2017, los incrementos de la producción de gas natural superaron los incrementos del consumo doméstico, lo que dio como resultado que Estados Unidos se convirtiera en un exportador de gas natural por primera vez en casi 60 años

Norte América tiene previsto aumentar de forma innovadora la capacidad de producción de GNL hasta el año 2030 por medio de proyectos, que se encuentran en construcción. Este objetivo ha sido incentivado principalmente por el aumento de las exportaciones en la terminal de Sabine Pass, la única terminal de exportación de Estados Unidos.

La siguiente figura muestra los precios del GNL en varias regiones del mundo en 2018. Como podemos observar, el precio del GNL es significativamente más bajo en América del Norte que en Asia, Europa y América del Sur. A pesar de tener un gasto de 1 a 2 $/MMBtu para trasportar el GNL a puertos extranjeros, el GNL producido en Estados Unidos compite al precio del resto de regiones. Actualmente, hay más de 400 puertos para el abastecimiento de petróleo en el mundo, pero el 60% del abastecimiento total de los últimos años se han producido en cinco países: Singapur, Estados Unidos, China, Emiratos Árabes y Corea del Sur. De los países mencionados anteriormente, el único importante productor de GNL es Estados Unidos. Por ello, Estados Unidos es un país autosuficiente para el abastecimiento de GNL de su flota y puede ser influyente para abastecer al resto de puertos principales.

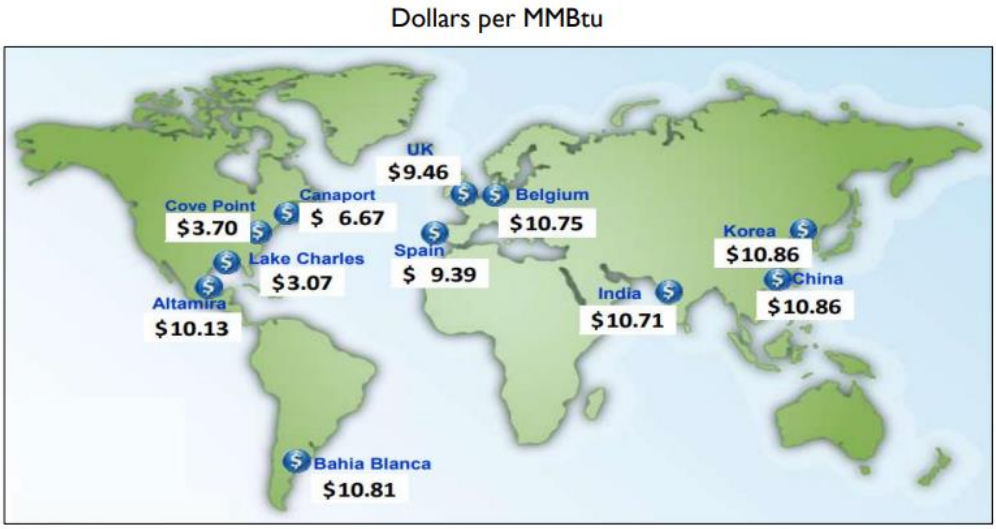


Ilustración 34. Precio del GNL de distintas regiones (Fuente: Congressional Research Service)

5.7. Futuros escenarios del precio de combustibles

El precio de los combustibles y la tecnología de coste operacional son unos de los puntos más importantes para llevar a cabo un estudio de este tipo. Predecir el futuro del transporte depende en gran medida de hacer suposiciones sobre los futuros precios y plantear cómo evolucionarán las distintas tecnologías para que sea más rentable.

El precio del GNL está siendo sometido a diferentes presiones. Actualmente, la mayoría de los precios del GNL en el continente asiático siguen al precio del petróleo, con un atraso de unos cinco meses y una disminución de los precios en los últimos años, aproximadamente de un 14%. No obstante, esta fluctuación ha estado disminuyendo hasta un 11%, debido a la firma de contratos.

Mediante un estudio realizado por la compañía Sea-LNG sobre el futuro del GNL, se compara el precio de cuatro tipos de combustibles: LNG, HSFO, MGO y VLSFO, teniendo en cuenta seis posibles escenarios:

- ***"Stranded fuels":*** El precio del HSFO cae en picado, a causa de la entrada en vigor de la regulación de Nivel III sobre el contenido en azufre de los combustibles en el año 2020, seguido de años de recuperación. Hay que tener en cuenta que no es razonable que el precio del HSFO no se mantenga a precios bajos ya que su demanda será mínima y tan solo los buques que dispongas de scrubbers podrán utilizar este combustible.
- ***"Business as usual (BaU)":*** Se mantienen los precios relativos como estaban a partir del 3Q del año 2018.
- ***"Tight supply for distillates":*** El precio del MGO aumenta en un 20% debido al aumento de la demanda de combustibles con bajo contenido en azufre en el año 2020.
- ***"LNG economies of scale":*** Se reducen los costes de licuefacción y distribución de GNL en un 20% a causa de una mayor adaptación y economía de escala.
- ***"LNG liquefaction technology improvements"*:** El precio del proceso de licuefacción disminuye un 20% debido a las mejoras en la tecnología a pequeña escala.

- ***"Tight MGO, unavailable HSFO, improve LNG":*** El precio del MGO se incrementa a causa de la alta demanda por combustibles con bajo contenido en azufre. El precio de HSFO aumenta un 20% debido a que no está disponible de manera generalizada. Los procesos de licuefacción de GNL y su distribución se ven reducidos en un 20% debido a la economía de escala.

El escenario de *"stranded fuels"* que plantea este estudio conlleva una dinámica compleja en la cual el HSFO quedará abandonado debido a la baja influencia de los scrubbers a partir del año 2020. A causa de la entrada en vigor de la regulación sobre las limitaciones de contenido en azufre de los combustibles, aumenta la demanda del MGO y los destilados. El precio del MGO y del VLSFO se verá disminuido a medida que el uso GNL y scrubbers aumente y vayan construyendo nuevas refinerías. A medida que van apareciendo nuevas mezclas de combustible en el mercado y se produce un desequilibrio de los precios. El precio del GNL disminuye debido a la mejora en tecnología de licuefacción hasta el año 2025. Después de 2025, las energías renovables comienzan a sustituir el GNL y su uso se ve desplazado hacia aplicaciones terrestres, por ello, el precio del GNL se estiliza.

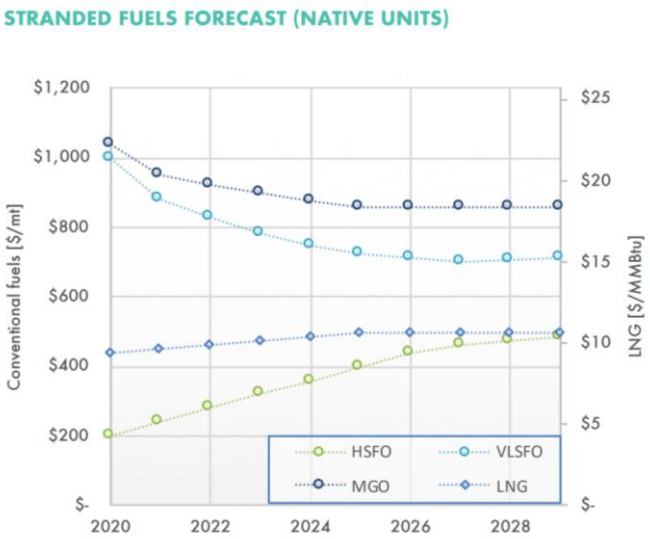


Ilustración 35. Previsión de precios de los distintos combustibles del escenario "Stranded Fuels" (Fuente: Sea/LNG)

En los otros cinco escenarios se pronostica que el precio de los combustibles aumentará con la inflación después de 2020.

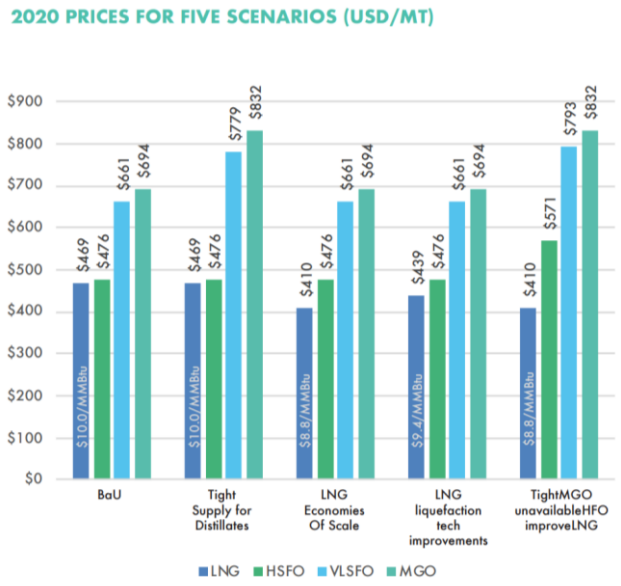


Ilustración 36. Previsión de los precios de los combustibles de los cinco escenarios (Fuente: Sea/LNG)

Capítulo 6. Coste económico del proyecto

Para hacer posible la elaboración de este proyecto no ha hecho falta ninguna inversión de capital sino una inversión de horas de trabajo para el estudio, análisis y redacción de todo el contenido. La mayor parte del tiempo invertido ha sido en la fase de análisis documental y redacción del contenido. A continuación, se expone una tabla resumen de las horas empleadas y coste que tendría el proyecto:

Fase del trabajo	Precio la hora	Horas	Precio
Elección del tema	30 €	10	300,00 €
Definición del objetivo		20	600,00 €
Análisis bibliográfico		80	2.400,00 €
Análisis documental		140	4.200,00 €
Redacción de contenido		160	4.800,00 €
Trabajo de campo		10	300,00 €
Extracción de conclusiones		30	900,00 €
Tutorías		4	120,00 €
Total, horas y precio		**454**	**13.620,00 €**

Tabla 11. Coste económico del trabajo (Fuente: elaboración propia)

Para poder hacer un cálculo del precio por cada hora de trabajo, se ha consultado diversas entidades consultoras y se ha realizado un promedio, el cual ha sido de 30 € por hora trabajada. La realización del trabajo se estima en una inversión total de 454 horas y un importe total de 13.620€.

Capítulo 7. Conclusiones

Durante el transcurso de este trabajo se han estudiado principalmente las limitaciones que ha impuesto la OMI sobre el uso de combustibles fósiles con alto contenido en azufre y las venideras, enfocándonos principalmente sobre la regulación 14 del Anexo VI del MARPOL, la cual establece un límite del contenido en azufre de un 0,50% masa/masa a nivel global y un 0,10% en zonas ECA(s). Asimismo, se han considerado las restricciones de emisiones NOx establecidas por medio de la regulación 13 del Anexo VI del MARPOL, la cual establece una limitación de emisiones de NOx dependiendo del año de construcción del buque. Además, se ha analizado el impacto ambiental que causan los motores debido a las emisiones nocivas que producen, centrándonos en las más importantes como el CO_2, el gas de efecto invernadero más perjudicial, el NOx y el SOx, gases causantes de la lluvia ácida, y la materia particulada.

No cabe duda de que el transporte marítimo tiene un gran potencial en la economía mundial debido a que transporta más del 90% de todas las mercancías que se transporta a nivel global. De igual modo, el transporte marítimo es el método de transporte de mercancías que menos emisiones nocivas produce por tonelada/milla recorrida. No obstante, el transporte marítimo tiene una gran influencia ambiental sobre la situación del cambio climático, por ello, se tienen que tomar medidas antes que se alcance un punto de no retorno sobre los cambios climáticos.

El combustible con mayor viabilidad frente a los combustibles derivados del petróleo, principalmente MDO y HFO, es el gas natural licuado ya que como se ha mostrado a lo largo del trabajo contribuye de forma notable reduciendo drásticamente la cantidad de emisiones producidas tanto en el motor principal como en los motores auxiliares.

El GNL es un combustible con una garantía de desarrollo sostenible, debido a las grandes reservas gas natural existentes, las cuales se estiman que tendrán una duración de aproximadamente 60 años. Del mismo modo, el GNL es el combustible fósil más respetuoso con el medioambiente debido a su composición y uso en forma gaseosa en el motor, lo que produce una combustión más uniforme y homogénea, y da lugar a una reducción en la generación de gases de efecto invernadero como el CO_2, NOx y una eliminación total de la materia particulada y los óxidos de azufre.

Algunos de los aspectos a destacar para lograr reducir de forma notable las emisiones contaminantes en el transporte marítimo podrían estar relacionados con la mejora del diseño del buque y su perfil aerodinámico, el perfeccionamiento del diseño de los motores para hacerlo más eficientes y el uso de una velocidad óptima para su navegación. No obstante, son aspectos que poco a poco irán mejorando conforme se encuentren materiales más adecuados y óptimos para cada uno de los casos.

España juega un papel muy importante en la fomentación de GNL como combustible debido a la posición geoestratégica que tiene, a los más de 50 años de experiencia en el sector gasista, a la gran red logística para el suministro de gas que posee y por ser líder europeo con 8 plantas regasificadoras que suman un total del 42%, aproximadamente, de toda la capacidad europea de almacenamiento.

A lo largo del año 2018, había un total de 143 buques propulsados con GNL y otros 135 bajo construcción, mientras que en el año 2017 había operativos un total de 118 buques. Asimismo, en España se han tomado una serie de medidas e iniciativas para promover el GNL en el sector marítimo, como, crear más infraestructura para su almacenaje y suministro, disminuir las tasas portuarias para aquellos buques que usen GNL y una reducción en los peajes que se pagan a las plantas regasificadoras en la operativa de bunkering.

A partir del año 2020 entrará en vigor la regulación 14 del Anexo VI del MARPOL, la cual limita el uso de combustibles con cierto porcentaje de azufre. Debido a esto, el precio del GNL quedará por debajo de otros combustibles como el MDO y LSHFO ya que estos serán más demandados, lo que producirá un aumento de sus precios. Por otro lado, se verá afectado el precio del HFO ya que para cumplir con la regulación tendría que hacer uso de scrubbers, lo que supondría un gasto extra.

En cuanto al futuro del GNL es un tanto imprevisible debido a todos los factores influyentes. No obstante, hay que dar un punto de vista positivo respecto al comercio marítimo relacionado con el gas natural, ya que actualmente las actividades económicas no están siendo beneficiosas para ningún sector, y tras observar las últimas tendencias del gas natural nos indican que es un sector que está en auge debido al aumento de la oferta y la demanda en estos últimos años.

Desde mi punto de vista, el uso de GNL en el transporte marítimo tiene una tendencia alcista que poco a poco se irá normalizando conforme haya más infraestructuras portuarias dedicadas a ello. Hoy día, hay armadores que apuestan por remotorizar o construir nuevos buques con propulsión GNL ya que es una inversión a largo plazo, en cambio, otros no están tan seguros ya que supone un gran coste y, aun así, los buques propulsados con HFO y MDO pueden continuar navegando, aunque con el paso del tiempo será más costoso debido al aumento del precio del combustible.

Cabe decir que para los buques de nueva construcción la opción más viable y atractiva es el GNL ya que cumplirán con la normativa vigente sin necesidad de instalar ningún dispositivo de lavado de gases como los que utilizan los buques propulsados con combustibles derivados del petróleo, los scrubbers.

A pesar de los prototipos de usar la energía solar o la energía eólica como método de propulsión, no cabe duda de que a día de hoy la solución más viable y respetuosa con el medio ambiente es el GNL.

Capítulo 8. Bibliografía

8.1. Referencias bibliográficas

[1] International Energy Agency. Gas 2018: *Analysis and forecasts to 2023*. IEA, Francia, 2018.

[2] Michael D. Tusiani y Gordon Shearer. *LNG a Nontechnical Guide*. PennWell Corporation, Estados Unidos, 2007.

[3] Michael D. Tusiani y Gordon Shearer. *LNG: Fuel for a Changing World: a Nontechnical Guide*. PennWell Corporation, Estados Unidos, 2016.

[4] Anne-Sophie Corbeau. *LNG Markets in Transition: The Great Reconfiguration*. OUP Oxford, Reino Unido, 2016.

[5] Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil y David A. Wood. *Handbook of Liquefied Natural Gas*. Gulf Professional Publishing, Estados Unidos, 2013.

[6] Paweł Turowski, Aleksander Zawisza, Marcin Gałczyński. *Global LNG Market.* Ignacy Lukasiewicz Energy Policy Institute, Polonia ,2017.

[7] Susan L. Sakmar. Energy for the 21st Century: Opportunities and Challenges for Liquefied Natural Gas (LNG). Edward Elgar Publishing, Reino Unido, 2015.

[8] Eloy Alvarez Pelgry y Jacobo Balbas Pelaez. *El gas natural del yacimiento al consumidor: aprovisionamientos y cadena del gas natural licuado.* CIE Inversiones Editoriales DOSSAT-2000, España, 2003.

8.2. Artículos científicos

[9] Frederick Adamchak y Amokeye Adede. *LNG AS MARINE FUEL* (Abril de 2019)

[10]DNV-GL. *Liquefied Natural Gas (LNG) Bunkering Study.* (Mayo de 2019)

[11]Monica Gullberg y Johan Gahnström. *North European LNG Infrastructure Project*. (Mayo de 2019)

[12]David Jacobs. *The Global Market for Liquefied Natural Gas.* (Mayo de 2019)

[13] Natasha Cassidy y Mitch Kosev. *Australia and the Global LNG Market*. 35-98 (Junio de 2019)

8.3. Referencias web

[14]Organización Marítima Internacional – MARPOL – Anexo VI – Regulación 14 óxidos de azufre y materia particulada. (Marzo de 2019)

https://vp.imo.org/Customer/Subscriptions/IMOVEGA/MemberPages/IMODocument.aspx?resultIndex=13&docId=MAR08614ABA&docDate=2010-07-01

[15]Organización Marítima Internacional – MARPOL – Anexo VI – Regulación 13 óxidos de nitrógeno. (Marzo de 2019)

https://vp.imo.org/Customer/Subscriptions/IMOVEGA/MemberPages/IMODocument.aspx?resultIndex=12&docId=MAR08613ABA&docDate=2010-07-01

[16]Directiva 1999/32/CE del parlamento europeo y consejo relativa a la reducción del contenido de azufre de determinados combustibles líquidos. (Marzo de 2019)

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0032&from=ES-

[17]Directiva 2005/33/CE del parlamento europeo y del consejo relativa a la reducción del contenido de azufre de determinados combustibles líquidos. (Marzo de 2019)

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32005L0033&from=EN

[18]Directiva 2009/30/CE del parlamento europeo y del consejo relativa a la reducción del contenido de azufre de determinados combustibles líquidos. (Marzo de 2019)

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0030&from=ES-

[19]Directiva 2012/33/UE del parlamento europeo y consejo por la que se modifica la Directiva 1999/32/CE (Marzo de 2019)

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0033&from=EN

[20]Directiva (UE)2016/802 del parlamento europeo y del consejo relativa a la reducción del contenido de azufre de determinados combustibles líquidos. (Marzo de 2019)

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L0802&from=ES

[21]Real decreto 335/2018 por el que se modifican diversos reales decretos que regulan el sector del gas natural. (Abril de 2019)

https://www.boe.es/boe/dias/2018/05/26/pdfs/BOE-A-2018-6998.pdf

[22]Naucher Global (Abril de 2019)

http://www.naucher.com/es/actualidad/el-gas-natural-toma-posiciones-como-alternativa-al-transporte-por-mar-y-tierra/_n:9813/

[23]Physical properties and composition of LNG. (Abril de 2019)

http://www.liquefiedgascarrier.com/LNG.html

[24] Groupe International Des Importateurs de Gaz Naturel Liquéfié (GIIGNL) – Basic Properties of LNG (Abril de 2019)

https://giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/About_LNG/4_LNG_Basics/090801publique_lngbasics_lng_1_-_basic_properties_7.2.09_aacomments.pdf

[25] EIA – Emissions of greenhouses gases (Abril de 2019)

https://www.eia.gov/environment/emissions/ghg_report/ghg_carbon.php

[26] International Gas Union (IGU) – 2018 World LNG Report (Abril de 2019)

https://www.igu.org/sites/default/files/node-document-field_file/IGU_LNG_2018_0.pdf

[27] Rolls-Royce (Abril de 2019)

https://www.rolls-royce.com/products-and-services/marine/product-finder/propulsion-engines/propulsion-gas-engines/

[28] Wärsilä – Dual Fuel Engines (Abril de 2019)

https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/dual-fuel-engines

[29] Gasnam – Bunkering GNL (Abril de 2019)

https://gasnam.es/maritimo/bunkering-gnl/

[30]DNV-GL – LNG Fuelled Vessels Report (Abril de 2019)

http://www.golng.eu/files/Main/20180417/2.%20Ole%20Vidar%20Nilsen%20-%20DNV%20GL.pdf

[31] DNV-GL – LNG as a ship fuel (Abril de 2019)

https://www.dnvgl.com/maritime/lng/engines-for-gas-fuelled-ships.html

[32] DNV-GL – Alternative fuels and technologies (Abril de 2019)

https://www.dnvgl.com/maritime/alternative-fuels-and-technologies-in-shipping/index.html

[33] DNV-GL – Alternative fuels insights platform (Abril de 2019)

https://store.veracity.com/da10a663-a409-4764-be66-e7a55401275a

[34] Maritime Port and Authority of Singapore (Mayo de 2019)

https://www.mpa.gov.sg/web/portal/home/port-of-singapore

[35] Port of Rotterdam (Mayo de 2019)

https://www.portofrotterdam.com/en

[36] Port of Fuijarah (Mayo de 2019)

http://fujairahport.ae/

[37] Enagas – GNL como combustible marino. Situación y perspectivas (Mayo de 2019)

https://www.enagas.es/stfls/EnagasImport/Ficheros/gestionTecnicaSistema/pdf/document1.pdf

[38] CORE LNGas Hive (Mayo de 2019)

http://corelngashive.eu/es/

[39] BP – Natural Gas (Mayo de 2019)

https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/natural-gas.html#natural-gas-reserves

[40] DNV-GL – Current price development oil and gas (Mayo de 2019)

https://www.dnvgl.com/maritime/lng/current-price-development-oil-and-gas.html

[41] OMI – Studies on the feasibility and use of LNG as a fuel for shipping (Junio de 2019)

http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/LNG%20Study.pdf

[42] Sea/LNG – LNG as a marine fuel – The investment opportunity (Junio de 2019)

https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2019/01/190123_SEALNG_InvestmentCase_DESIGN_FINAL.pdf

Anexo A. Listado de buques operativos propulsados por GNL

Año	Nombre del buque	Tipo de buque	Propietario	Sociedad clasificadora
2003	Stil Pioneer	PSV	Møkster	DNV GL
2003	Viking Energy	PSV	Eidesvik	DNV GL
2008	Viking Queen	PSV	Eidesvik	DNV GL
2009	Viking Lady	PSV	Eidesvik	DNV GL
2009	Barentshav	Patrullera	Remøy	DNV GL
2010	Bergen	Patrullera	Remøy	DNV GL
2010	Sortland	Patrullera	Remøy	DNV GL
2011	Skandi Gamma	PSV	DOF	DNV GL
2011	Normand Arctic	PSV	Solstad	DNV GL
2012	Viking Prince	PSV	Eidesvik	DNV GL
2012	Viking Princess	PSV	Eidesvik	DNV GL
2012	Island Crusader	PSV	Solstad	DNV GL
2012	Island Contender	PSV	Solstad	DNV GL
2012	Olympic Energy	PSV	Solstad	DNV GL
2013	Rem Leader	PSV	Remøy Shipping	DNV GL
2013	Econuri	Embarcación de recreo	Incheon Port Authority	KR
2013	Hai Yang Shi You 521	Remolcador	CNOOC	CCS
2013	Hai Yang Shi You 522	Remolcador	CNOOC	CCS
2014	Børgoy	Remolcador	Buksér og Berging	DNV GL
2014	Bokn	Remolcador	Buksér og Berging	DNV GL
2014	Turva	Patrullera	Finnish Border Guard	DNV GL
2015	Stril Barents	PSV	Møkster	DNV GL
2015	Harvey Energy	PSV	Harvey Gulf	ABS
2015	Harvey Power	PSV	Harvey Gulf	ABS
2016	Harvey Liberty	PSV	Harvey Gulf	ABS
2017	Harvey Freedom	PSV	Harvey Gulf	ABS
2015	Rem Eir	PSV	Remøy Shipping	DNV GL
2015	Hai Yang Shi You 525	Remolcador	CNOOC	CCS
2015	Siem Symphony	PSV	Siem Offshore	DNV GL
2015	Siem Pride	PSV	Siem Offshore	DNV GL
2015	Sakigaki	Remolcador	NYK Line	ClassNK
2016	Polaris	Rompehielos	Arctia Icebreaking	LR
2017	Siem Thiima	PSV	Siem Offshore	DNV GL
2000	Glutra	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2006	Bergensfjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL

2007	Stavangerfjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2007	Raunefjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2007	Mastrafjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2007	Fanafjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2009	Tidekongen	Ferry	Tide Sjø	DNV GL
2009	Tidedronnigen	Ferry	Tide Sjø	DNV GL
2009	Tideprinsen	Ferry	Tide Sjø	DNV GL
2009	Moldefjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2010	Fannefjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2010	Romsdalfjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2010	Korsfjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2010	Selbjornsfjord	Ro-Ro	FosenNamsos Sjø	DNV GL
2011	Tresfjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2012	Boknafjord	Ro-Ro	Fjord1	DNV GL
2012	Landegode	Ro-Ro	Torghatten Nord	DNV GL
2012	Værøy	Ro-Ro	Torghatten Nord	DNV GL
2013	Barøy	Ro-Ro	Torghatten Nord	DNV GL
2013	Lødingen	Ro-Ro	Torghatten Nord	DNV GL
2013	Viking Grace	Ro-Ro	Viking Line	LR
2013	Stavangerfjord	Ro-Ro	Fjord Line	DNV GL
2013	Bergensfjord	Ro-Ro	Fjord Line	DNV GL
2013	Francisco	Ferry	Buquebus	DNV GL
2013	Hardanger	Ro-Ro	Norled	DNV GL
2013	Ryfylke	Ro-Ro	Norled	DNV GL
2015	FA Gauthier	Ro-Ro	STQ Quebec	LR
2015	Osfriesland	Ro-Ro	AG Ems	GL
2015	Helgoland	Ro-Ro	AG Ems	GL
2015	Samsø	Ro-Ro	Samsø Municipality	DNV GL
2015	Hasvik	Ro-Ro	Boreal Transport	DNV GL
2015	Bergsfjord	Ro-Ro	Boreal Transport	DNV GL
2016	Armand-Imbeau II	Ro-Ro	STQ Quebec	LR
2016	Jos-Deschênes II	Ro-Ro	STQ Quebec	LR
2016	Seaspan Swift	Ro-Ro	Seaspan	BV
2017	Seaspan Reliant	Ro-Ro	Seaspan	BV
2017	Abel Matutes	Ro-Ro	Baleària	BV
2017	Salish Orca	Ro-Ro	BC Ferries	LR
2017	Salish Eagle	Ro-Ro	BC Ferries	LR
2017	Megastar	Ro-Ro	Tallink	BV

2012	Høydal	Carga general	Nordnorsk Shipping	DNV GL
2013	Eidsvaag Pioneer	Carga general	Eidsvaag	DNV GL
2014	With Harvest	Carga general	Egil Uvan	DNV GL
2014	With Marine	Carga general	Egil Uvan	DNV GL
2015	Kvitbjørn	Carguero Ro-Ro	NorLines	DNV GL
2015	Kvitnos	Carguero Ro-Ro	NorLines	DNV GL
2015	Isla Bella	Portacontenedores	TOTE	ABS
2016	Perla del Caribe	Portacontenedores	TOTE	ABS
2016	Searoad Mersey II	Carguero Ro-Ro	SeaRoad	DNV GL
2016	Auto Eco	Ro-Ro	UECC	LR
2011	Bit Viking	Tanque LPG	Tarbit	DNV GL
2014	Coral Star	Tanque LPG	Anthony Veder	BV
2014	Coral Sticho	Tanque LPG	Anthony Veder	BV
2015	Bergen Viking	Tanque	Bergen Tankers	DNV GL
2015	Sefarina	Tanque LPG	Chemgas Shipping	BV
2015	Greenland	Cementero	JT Cement	LR
2016	Ireland	Cementero	JT Cement	LR
2016	Fure West*	Tanque	Furetank	BV
2016	Sundowner	Tanque LPG	Chemgas Shipping	BV
2016	Jayanti Baruna	Tanque GNL	CIMC Enric SZJ Gas	ABS/BKI
2016	Ternsund	Quimiquero	Terntank	BV
2016	Ternfjord	Quimiquero	Terntank	BV
2016	Tern Sea	Quimiquero	Terntank	BV
2017	Tern Ocean	Quimiquero	Terntank	BV
2016	Gaschem Beluga	Tanque LPG	Ocean Yield	DNV GL
2016	Navigator Aurora	Tanque LPG	Navigator Gas	ABS
2016	Navigator Eclipse	Tanque LPG	Navigator Gas	ABS
2017	Navigator Nova	Tanque LPG	Navigator Gas	ABS
2016	Damia Desgagnes	Asfaltero	Groupe Desgagnés	BV

Según DNV-GL a 5 de junio de 2019.

Anexo B. Listado de buques propulsados por GNL encargados

Año	Tipo de buque	Propietario	Sociedad clasificadora
2018	Remolcador	Drydocks World	Tasneef
2018	Gabarra	Bremenports	DNV GL
2018	PSV	Harvey Gulf Int.	ABS
2018	Coloca cable	DEME Tideway	DNV GL
2018	RoPax	Rederi AB Gotland	DNV GL
2018	Portacontenedores	Crowley Maritime Corp.	DNV GL
2018	Portacontenedores	Brodosplit	DNV GL
2018	Portacontenedores	Brodosplit	DNV GL
2018	Carga a granel	ESL Shipping	DNV GL
2018	Carga a granel	ESL Shipping	DNV GL
2018	Ferry	Society of Quebec ferries	LR
2018	Ferry	Society of Quebec ferries	LR
2018	PSV	Siem Offshore	DNV GL
2018	PSV	Siem Offshore	DNV GL
2018	Ferry de alta velocidad	Fred. Olsen	DNV GL
2018	Ferry	BC ferries	ABS
2018	Ferry	Caronte & Tourist	RINA
2018	Quimiquero	Groupe Desgagnés	BV
2018	Quimiquero	Groupe Desgagnés	BV
2018	Portacontenedores	Crowley Maritime Corp.	DNV GL
2018	Remolcador	Keppel Smit Towage	ABS
2018	Remolcador	Maju Maritime BC ferries	ABS
2018	Ferry	BC ferries	ABS
2018	PSV	Harvey Gulf Int.	ABS
2018	Portacontenedores	Brodosplit	DNV-GL
2018	Portacontenedores	Brodosplit	DNV GL
2018	Ferry	Royal Doeksen	LR
2018	Ferry	Royal Doeksen	LR
2018	Ferry	CHFS	LR
2018	Ferry	CHFS	LR
2018	RoPax	Rederi AB Gotland	DNV GL
2018	Portacontenedores	Containerships	ABS
2018	Portacontenedores	Containerships	ABS
2018	Portacontenedores	GNS Shipping	ABS
2018	Portacontenedores	GNS Shipping	ABS

2018	Heavy lift vessel	Heerema Offshore	LR
2018	Quimiquero	Furetank Rederi	BV
2018	Quimiquero	Furetank Rederi	BV
2018	Quimiquero	Furetank Rederi	BV
2018	Draga	DEME	BV
2018	Draga	van der Kamp	DNV GL
2018	Quimiquero	Thun Tankers	DNV GL
2018	Quimiquero	SCF	DNV GL
2018	Quimiquero	SCF	DNV GL
2018	Ferry	Torghatten	
2018	Bunkering	Harley Marine Services	
2018	Bunkering	Harley Marine Services	
2018	Bunkering	Sinanju Tankers	
2018	Frigorífico	SeOil Agency/Gas Entec	
2018	Ferry	Torghatten	DNV GL
2018	Ferry	Torghatten	DNV GL
2018	Ferry	Torghatten	DNV GL
2018	Draga	Dragages-Ports	BV
2019	Ferry	Torghatten	DNV GL
2019	Quimiquero	Thun Tankers	BV
2019	Quimiquero	Thun Tankers	BV
2019	Quimiquero	Thun Tankers	BV
2019	Quimiquero	SCF	DNV GL
2019	Quimiquero	SCF	DNV GL
2019	Quimiquero	SCF	DNV GL
2019	Quimiquero	SCF	DNV GL
2019	Quimiquero	AET	ABS
2019	Quimiquero	AET	ABS
2019	Remolcador	Mitsui O.S.K. Lines	
2019	Crucero	Carnival Corporation	RINA
2019	Crucero	Carnival Corporation	RINA
2019	Quimiquero	Thun Tankers	BV
2019	Offshore	DEME	DNV GL
2019	Draga	DEME	BV
2019	RoPax	Baleària	BV
2019	Ro-Ro	Siem Car Carriers	ABS
2019	Ro-Ro	Siem Car Carriers	ABS
2019	Rescate		

2019	RoPax	Brittany Ferries	BV
2019	RoPax	Baleària	
2019	RoPax	Baleària	
2019	Petrolero	AET	DNV GL
2019	Petrolero	AET	DNV GL
2019	RoPax	Polish Baltic Shipping Co	
2019	RoPax	Polish Baltic Shipping Co	
2019	Petrolero	Teekay Offshore	DNV GL
2019	Portacontenedores	CMA CGM	BV
2019	Quimiquero	Älvtank	BV
2019	Quimiquero	Älvtank	BV
2019	Remolcador	PSA Marine	
2019	Draga	Dragages Ports	
2019	Pesquero	Liegruppen	
2020	Pesquero	Nordlaks	
2020	Portacontenedores	CMA CGM	BV
2020	Portacontenedores	CMA CGM	BV
2020	Portacontenedores	CMA CGM	BV
2020	Portacontenedores	CMA CGM	BV
2020	Portacontenedores	CMA CGM	BV
2020	Petrolero	Teekay Offshore	DNV GL
2020	Petrolero	Teekay Offshore	DNV GL
2020	Petrolero	Teekay Offshore	DNV GL
2020	Portacontenedores	Pasha Hawaii	
2020	Portacontenedores	Pasha Hawaii	
2020	Investigación	German Transport Ministry	
2020	RoPax	Viking Line	DNV GL
2020	Crucero	Carnival Corporation	RINA
2020	Crucero	Carnival Corporation	RINA
2020	Portacontenedores	CMA CGM	BV
2020	Portacontenedores	CMA CGM	BV
2021	Portacontenedores	CMA CGM	BV
2021	Quimiquero	Rosneft	RR
2021	Quimiquero	Rosneft	RR
2021	Quimiquero	Rosneft	RR
2021	Quimiquero	Rosneft	RR
2021	Quimiquero	Rosneft	RR
2021	Ro-Ro	TOTE Shipholdings	ABS

2021	Ro-Ro	TOTE Shipholdings	ABS
2021	Crucero	Carnival Corporation	RINA
2021	Crucero	Carnival Corporation	
2021	Crucero	Disney Cruise Lines	
2021	Crucero	Ponant	BV
2022	Crucero	Carnival Corporation	RINA
2022	Crucero	MSC Cruises	
2022	Crucero	RCCL	DNV GL
2022	Crucero	Disney Cruise Lines	
2022	Crucero	Carnival Corporation	
2023	Crucero	Disney Cruise Lines	
2023	Crucero	Carnival Corporation	
2024	Crucero	RCCL	DNV GL
2024	Crucero	MSC Cruises	

Según DNV-GL a 5 de junio de 2019.