



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA E MÁQUINAS

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

“PERSPECTIVA FUTURA DEL TRANSPORTE MARÍTIMO DE GAS NATURAL LICUADO”

MÁSTER EN “NÁUTICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO”

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

SEPTIEMBRE – 2023

AUTOR: VICTORIA PAZOS DELGADO

DIRECTOR: JULIO LOURO RODRÍGUEZ

RESUMO

O transporte marítimo de Gas Natural Licuado (GNL) xoga un papel fundamental no subministro global de enerxía. Este traballo ten como obxectivo analizar os diversos aspectos implicados no seu desenvolvemento e que marcarán o futuro deste, dende a descrición da cadea de GNL ata as implicacións económicas e ambientais que marcarán o seu futuro.

Este proceso de transporte comeza coa licuefacción do gas natural, un paso imprescindible antes da súa carga. Este proceso implica a redución do volume do gas e o seu cambio de fase a estado líquido, así como o mantemento da súa baixa temperatura tanto en terra como durante o viaxe para evitar a súa regasificación prematura.

Os buques tanque utilizados para o transporte de GNL cumpren con uns requisitos específicos para este tipo de carga. Actualmente, existen varios tipos de buques diferenciados pola súa idade, a súa capacidade de carga, o seu sistema de propulsión e o seu sistema de contención. Estes buques están en constante evolución, incorporando tecnoloxía de última xeración e adaptándose ás regulacións ambientais cambiantes. A redución de emisións e a mellora da eficiencia enerxética son aspectos clave nestas actualizacións, que buscan implementar sistemas de propulsión máis limpos e deseños máis eficaces.

Unha transición importante na industria do transporte marítimo é o uso do GNL como combustible principal para os buques, en lugar dos combustibles fósiles tradicionais como o fuel ou o diésel. Esta alternativa, máis limpa e eficiente, reduce o impacto ambiental ao diminuír as emisións de gases de efecto invernadoiro e outros contaminantes atmosféricos.

Analizaranse as principais rutas marítimas utilizadas, que conectan as rexións produtoras cos países consumidores de GNL, e os factores que inflúen na elección destas rutas, incluíndo consideracións económicas e xeográficas. Tamén se explorarán as posibles rutas emerxentes e a súa viabilidade no mercado global.

Resulta imprescindible contar cunha infraestrutura que poida adaptarse á demanda de GNL, incluíndo terminais de carga e descarga, portos adecuados e puntos de abastecemento para buques propulsados por GNL. Con todo, a expansión desta

infraestrutura pode enfrentar desafíos en termos de viabilidade e capacidade de resposta á demanda en constante crecemento.

Nas últimas décadas, a produción, subministración, transporte e distribución do gas natural experimentaron cambios significativos, o que tivo un impacto profundo a nivel mundial, social, económico e político. Estes cambios foron impulsados por avances tecnolóxicos que permiten a explotación de xacementos de gas natural anteriormente inaccesibles. Debido á alta demanda do gas natural nestes últimos anos, o nivel de vida en gran parte do mundo aumentou considerablemente.

RESUMEN

El transporte marítimo de Gas Natural Licuado (GNL) desempeña un papel fundamental en el suministro global de energía. Este trabajo tiene como objetivo analizar los diversos aspectos implicados en su desarrollo y que marcarán el futuro de este, desde la descripción de la cadena de GNL hasta las implicaciones económicas y ambientales que marcarán su futuro.

Este proceso de transporte comienza con la licuefacción del gas natural, un paso imprescindible antes de su carga. Este proceso implica la reducción del volumen del gas y su cambio de fase a estado líquido, así como el mantenimiento de su baja temperatura tanto en tierra como durante el viaje para evitar su regasificación prematura.

Los buques tanque utilizados para el transporte de GNL cumplen con unos requisitos específicos para este tipo de carga. Actualmente, existen varios tipos de buques diferenciados por su edad, su capacidad de carga, su sistema de propulsión y su sistema de contención. Estos buques están en constante evolución, incorporando tecnología de última generación y adaptándose a las regulaciones ambientales cambiantes. La reducción de emisiones y la mejora de la eficiencia energética son aspectos clave en estas actualizaciones, que buscan implementar sistemas de propulsión más limpios y diseños más eficaces.

Una transición importante en la industria del transporte marítimo es el uso del GNL como combustible principal para los buques, en lugar de los combustibles fósiles tradicionales como el fuel o el diésel. Esta alternativa, más limpia y eficiente, reduce el impacto ambiental al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos.

Se analizarán las principales rutas marítimas utilizadas, que conectan las regiones productoras con los países consumidores de GNL, y los factores que influyen en la elección de estas rutas, incluyendo consideraciones económicas y geográficas. También se explorarán las posibles rutas emergentes y su viabilidad en el mercado global.

Resulta imprescindible contar con una infraestructura que pueda adaptarse a la demanda de GNL, incluyendo terminales de carga y descarga, puertos adecuados y puntos de abastecimiento para buques propulsados por GNL. Sin embargo, la expansión

de esta infraestructura puede enfrentar desafíos en términos de viabilidad y capacidad de respuesta a la demanda en constante crecimiento.

En las últimas décadas, la producción, suministro, transporte y distribución del gas natural han experimentado cambios significativos, lo que ha tenido un impacto profundo a nivel mundial, social, económico y político. Estos cambios han sido impulsados por avances tecnológicos que permiten la explotación de yacimientos de gas natural anteriormente inaccesibles. Debido a la alta demanda del gas natural en estos últimos años, el nivel de vida en gran parte del mundo ha aumentado considerablemente.

ABSTRACT

The maritime transport of Liquefied Natural Gas (LNG) plays a crucial role in the global energy supply. This work aims to analyze various aspects involved in its development and the factors that will shape its future, from describing the LNG chain to the economic and environmental implications that will mark its course.

This transport process begins with the liquefaction of natural gas, an essential step before its loading. This process involves reducing the volume of the gas and changing its phase to a liquid state, as well as maintaining its low temperature both on land and during the journey to prevent premature regasification.

The tanker ships used for LNG transport meet specific requirements for this type of cargo. Currently, there are various types of vessels differentiated by their age, cargo capacity, propulsion system, and containment system. These vessels are in constant evolution, incorporating last technology and adapting to changing environmental regulations. Reducing emissions and improving energy efficiency are key aspects of these updates, aiming to implement cleaner propulsion systems and more effective designs.

A significant transition in the maritime transport industry is the use of LNG as the primary fuel for vessels, instead of traditional fossil fuels like fuel oil or diesel. This cleaner and more efficient alternative reduces environmental impact by lowering greenhouse gas emissions and other atmospheric pollutants.

It will be analyzed the main maritime routes, which connect the producing regions with LNG-consuming countries, and the factors influencing the choice of these routes, including economic and geographical considerations. We will also explore possible emerging routes and their viability in the global market.

It is essential to have infrastructure that can adapt to the demand for LNG, including loading and unloading terminals, suitable ports, and refueling points for LNG-powered vessels. However, expanding this infrastructure may face challenges in terms of feasibility and capacity to respond to the ever-growing demand.

In recent decades, significant changes have occurred in the production, supply, transport, and distribution of natural gas. These changes have had a profound impact

globally, socially, economically, and politically. Technological advancements have allowed the exploitation of natural gas fields that were previously inaccessible. Due to the high demand for natural gas in recent years, the standard of living in many parts of the world has increased significantly.

ÍNDICE

OBJETO	1
1. DESCRIPCIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO DE GNL.....	2
1.1. El gas natural licuado	2
1.2. La cadena de GNL	4
1.2.1. Exploración y extracción	4
1.2.2. Pretratamiento del gas.....	5
1.2.3. Licuefacción.....	5
1.2.4. Almacenamiento	6
1.2.5. Carga del GNL	6
1.2.6. Transporte	7
1.2.7. Regasificación, distribución y consumo	7
2. BUQUES TANQUE ACTUALES UTILIZADOS PARA EL TRANSPORTE DE GNL	7
2.1. Flota de buques metaneros según su edad y capacidad de carga	8
2.2. Flota de buques metaneros según su sistema de propulsión.....	8
2.2.1. La turbina de vapor.....	10
2.2.2. Motores de cuatro tiempos con propulsión dual (DFDE y TFDE)	10
2.2.3. Motores de dos tiempos MEGI	11
2.2.4. Motores de dos tiempos XDF	11
2.3. Flota de buques metaneros según su sistema de contención	11
2.3.1. Tasa de <i>boil-off gas</i>	13
3. RUTAS PARA EL TRANSPORTE DE GNL.....	14
3.1. Rutas alternativas.....	14
3.1.1. La Ruta del Norte como alternativa	16
4. BUQUES PROPULSADOS POR GNL	18
4.1. Buques de abastecimiento de GNL.....	20

5. INFLUENCIA DE LAS POLÍTICAS AMBIENTALES Y REGULACIONES RELACIONADAS	
22	
5.1. Control de emisiones	23
5.1.1. Acuerdo de París.....	23
5.1.2. Regulaciones de la OMI	24
5.1.3. Áreas de Control de Emisiones (ECA).....	24
5.2. Anexo VI del MARPOL.....	25
5.3. Código IGF.....	26
6. EL MERCADO INTERNACIONAL DE GNL.....	27
6.1. Tendencias destacadas en el mercado global de GNL.....	28
6.1.1. Reporte anual del IGU (<i>International Gas Union</i>) sobre importaciones y exportaciones	28
6.2. Impactos en el mercado de GNL.....	29
6.3. Impactos en el transporte de GNL.....	30
CONCLUSIONES	32
REFERENCIAS.....	35
ÍNDICE DE TABLAS.....	42
ÍNDICE DE FIGURAS	42

OBJETO

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un análisis de los distintos aspectos relacionados con el transporte marítimo de Gas Natural Licuado (GNL) y todos los elementos que conforman su cadena de suministro. Se busca proporcionar una comprensión de cada fase de la cadena, desde la exploración y extracción del gas natural hasta su regasificación, distribución y consumo final.

Además, se pretende examinar en detalle la flota de buques utilizados para el transporte de GNL, considerando aspectos como su edad, capacidad de carga, sistemas de propulsión y sistemas de contención. Se analizarán los avances tecnológicos y las tendencias en el diseño y operación de estos buques.

Otro objetivo importante es evaluar las rutas utilizadas para el transporte de GNL, incluyendo las rutas alternativas y la viabilidad de la Ruta del Norte como una opción emergente. Se explorarán las implicaciones económicas y geográficas que influyen en la elección de estas rutas.

Adicionalmente, se acordará la transición hacia buques propulsados por GNL y su impacto en la industria del transporte marítimo. Se examinarán los buques de abastecimiento de GNL y su relevancia en esta transición.

Un aspecto crucial de este trabajo es analizar la influencia de las políticas ambientales y las regulaciones relacionadas con las emisiones en el transporte de GNL. Se considerarán acuerdos internacionales, destacando su papel en la industria.

Por último, se estudiarán las tendencias y los impactos en el mercado internacional de GNL, con un enfoque en las importaciones y exportaciones. Se analizará cómo los cambios en el mercado afectan al transporte de GNL y cómo las dinámicas globales pueden influir en la industria en el futuro.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO DE GNL

El transporte marítimo de gas natural licuado (GNL) es un medio empleado para poder transportar grandes cantidades de gas natural en estado líquido, para facilitar su almacenamiento y transporte, pues en estado gaseoso ocupa un volumen mucho mayor. Es por eso por lo que el gas natural se enfría hasta convertirlo en líquido.

Gracias a los buques especializados en su transporte, los buques tanque de GNL, más comúnmente conocidos como “metaneros” o buques LNG, del inglés *Liquefied Natural Gas*, actualmente es posible hacer llegar el gas natural a las regiones que no tienen acceso directo a los gasoductos.

El proceso de transporte de GNL comienza con la producción y licuefacción del gas natural en plantas especializadas en tierra. Una vez licuado, el GNL se carga en los tanques de estos buques, que utilizan un sistema de refrigeración completa (a presión atmosférica y a temperatura de ebullición) para mantener el GNL a temperaturas extremadamente bajas durante el transporte. Durante el viaje, son monitoreados constantemente para garantizar la seguridad y evitar fugas, se utilizan sistemas de control de presión y temperatura para mantener las condiciones óptimas de almacenamiento y prevenir cualquier riesgo.

Al llegar a destino, el GNL se descarga en terminales de recepción de GNL. Allí se lleva a cabo el proceso de regasificación, en el cual el GNL se calienta y se convierte nuevamente en gas natural antes de ser inyectado a la red de gas natural del país receptor. La regasificación puede realizarse en tierra o utilizando unidades flotantes de regasificación FSRU, (*Floating Storage Regasification Unit*) ubicadas cerca de la costa.

1.1. El gas natural licuado

Para poder definir el gas natural licuado, primero es necesario saber qué es el gas natural, cuál es su origen y por qué está formado.

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos gaseosos que se encuentra en yacimientos subterráneos. Está compuesto principalmente por metano (CH_4), en concentraciones del 71 al 96 por 100 (variando según el puerto de carga y las necesidades de la industria) [1], aunque generalmente supera el 85% en volumen. También puede tener pequeñas

cantidades de otros hidrocarburos como etano, propano, butano, así como trazas de nitrógeno, dióxido de carbono y otros componentes. Esta composición va en función tanto de la fuente de gas como del tipo de tratamiento para eliminar impurezas que recibe antes de la licuefacción. Estas diferencias en su composición darán como resultado variaciones en el poder calorífico.

Se forma a lo largo de millones de años a partir de la descomposición de materia orgánica, como restos de plantas y animales, que se van acumulando en el subsuelo. A través de procesos geológicos, el gas natural queda concentrado en los yacimientos subterráneos, como se muestra en la Figura 1.1.1, y de ahí podrá ser extraído para su uso como fuente de energía. Estos depósitos suelen encontrarse entre 1,5 y 4 km de profundidad.

El gas natural se utiliza en diversos sectores (doméstico, industrial, comercial o termoeléctrico) en actividades cotidianas como, por ejemplo: la generación de electricidad, la calefacción y enfriamiento de edificios, producción industrial, combustible para vehículos, etc.

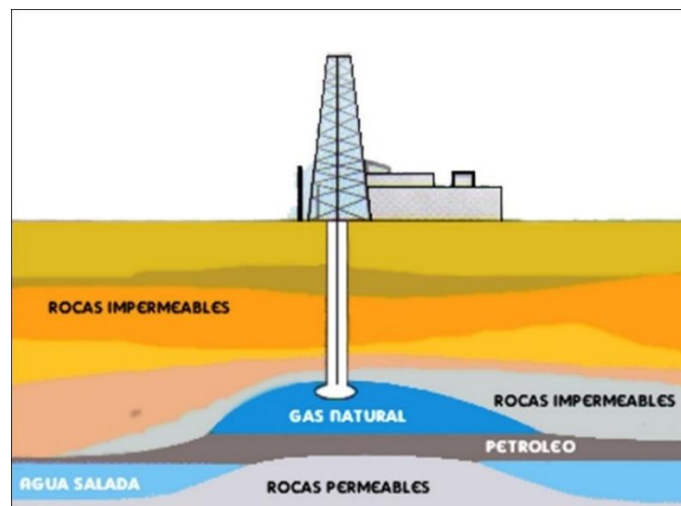


Figura 1.1.1. Yacimiento de gas natural [2].

El gas natural es un gas inodoro, incoloro e insípido y es por eso por lo que las compañías le agregan un componente, el mercaptano, para hacerlo perceptible por el olor en caso de que se produzca alguna fuga. Como combustible, es más limpio que el resto de los combustibles fósiles ya que su combustión, comparada con la del carbón o fueles

líquidos, resulta más eficiente y se generan menos emisiones de CO₂, azufre y otras partículas contaminantes.

El GNL es una forma de gas natural que ha sido procesada para convertirla en líquido mediante el enfriamiento a temperaturas extremadamente bajas, alrededor de -162°C (-260 grados Fahrenheit, °F) y reduciendo así su volumen aproximadamente 600 veces, facilitando su almacenamiento y transporte en grandes cantidades [3]. Al ocupar menos volumen, es más práctico y rentable para transportarlo largas distancias, lo que facilita al comercio internacional de gas natural.

1.2. La cadena de GNL

La cadena del GNL abarca todos los procesos y etapas a los que debe ser sometido, desde la extracción del gas natural de los yacimientos subterráneos hasta su entrega como GNL para su posterior consumo, esquematizado en la Figura 1.2.1.

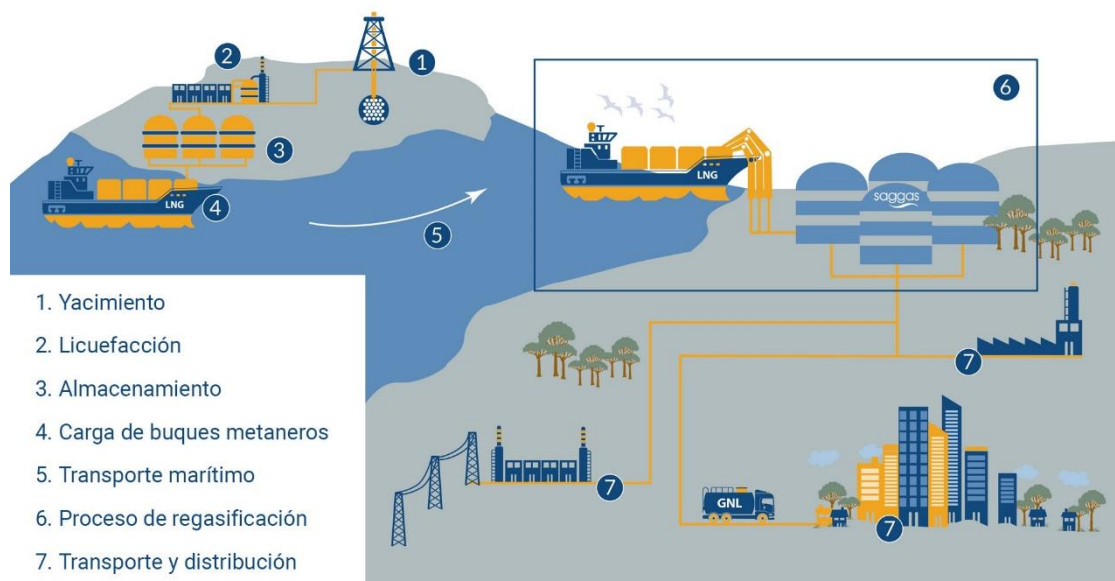


Figura 1.2.1. Cadena del gas [4].

Las principales etapas son las que se describen a continuación.

1.2.1. Exploración y extracción

Se lleva a cabo una exploración de los yacimientos de gas natural en tierra o en mar y, una vez identificado un yacimiento viable, se procede a la extracción del gas natural utilizando técnicas como la perforación de pozos o la extracción mediante plataformas

offshore. También es posible encontrar el gas natural en forma de bolsas o acumulaciones en los yacimientos petrolíferos, o bien, disuelto en el propio petróleo.

1.2.2. Pretratamiento del gas

El gas natural que es extraído puede contener impurezas y otros hidrocarburos que varían de un lugar a otro. Por eso, independientemente de su origen, el gas natural requiere de un tratamiento (eliminación de sólidos, filtración, deshidratación y eliminación de azufre) para eliminar impurezas. El objetivo es obtener un gas lo más puro posible y que cumpla con las especificaciones requeridas para la siguiente etapa, la licuefacción, o para su uso como combustible.

1.2.3. Licuefacción

En esta etapa, el gas natural se somete a un proceso de licuefacción para convertirlo en GNL. La licuefacción implica enfriar el gas a temperaturas extremadamente bajas que, en el caso del metano, que es el componente principal, es aproximadamente de -162°C . Su volumen se reduce unas 600 veces y por eso su almacenamiento y transporte en estado líquido resulta mucho más rentable.

La mayoría de las veces, este proceso se realiza cerca de los yacimientos de los cuales se ha extraído el gas natural, pero cuando esto no es posible, el gas se transporta a través de gasoductos hasta la planta de licuefacción. Pues esto va a depender de las posibilidades de construcción de la planta, las condiciones del lugar y la normativa que se aplique.

El proceso de licuefacción es un ciclo de refrigeración complejo compuesto por compresores e intercambiadores de calor. Puede clasificarse, en términos generales en tres grupos, según la Sociedad Internacional de Operadores de Terminales y Tanques de Gas (SIGTTO): proceso de licuefacción en cascada, procesos refrigerantes mixtos y procesos basados en turbinas [3]. Todos estos diseños se basan en:

- **Compresión:** el gas natural pretratado se comprime en varias etapas utilizando compresores, lo que hace aumentar también su temperatura. El objetivo de la compresión es aumentar la presión del gas para facilitar su enfriamiento posterior.

- **Enfriamiento:** después de la compresión, el gas natural se somete a un enfriamiento intenso para reducir su temperatura y convertirlo en líquido. Este enfriamiento se realiza en un proceso de cascada en el que se utilizan varios intercambiadores de calor y refrigerantes, utilizando para ello gas natural ya licuado o nitrógeno refrigerado.
- **Expansión y separación:** una vez enfriado, el gas natural se expande a través de una válvula de expansión, lo que provoca una disminución brusca de su presión y, por tanto, de su temperatura. Esto facilita la separación del gas en líquido y vapor. El líquido resultante es el GNL, mientras que el vapor se utiliza en el proceso de enfriamiento.

1.2.4. Almacenamiento

Una vez licuado, el GNL se almacena en tanques criogénicos en una condición de completamente refrigerado, a presión atmosférica y a una baja temperatura cercana al punto de ebullición de la carga. Están diseñados para mantener el GNL en estado líquido y prevenir su evaporación.

Estos tanques de almacenamiento pueden estar situados sobre el suelo o pueden ser subterráneos.

1.2.5. Carga del GNL

En esta etapa entran en juego los buques metaneros, cargando el GNL en sus tanques para poder transportarlo por todo el mundo. Pero su papel no empieza aquí, pues durante su trayecto a la terminal deben ir preparando los tanques para recibir el producto. Esta preparación consiste en enfriar los tanques de carga con la finalidad de que cuando se cargue el GNL, éste conserve su estado líquido, minimizando su evaporación, además, aporta eficiencia a la carga, pues se reduce la necesidad de estar enfriando durante toda la operación, lo que acelera el proceso. En definitiva, el buque debe llegar a la terminal con sus tanques fríos y listos para recibir el GNL.

La carga del GNL en los buques metaneros es una operación crítica que requiere equipos y sistemas especializados para garantizar una transferencia segura y eficiente del GNL desde la planta de licuefacción hasta el buque tanque.

El GNL se bombea desde la planta de licuefacción hasta el buque a través de tuberías. Se establece una conexión hermética entre los sistemas de carga del buque y los tanques de tierra, mediante unos brazos de conexión. Durante toda la operación es muy importante mantener unas medidas de seguridad para minimizar el riesgo de fugas o derrames, por eso, es imprescindible un sistema de monitoreo continuo de la presión y temperatura.

Durante la carga, se puede utilizar una pequeña cantidad de gas natural evaporado (que se encuentra por encima del nivel de líquido de los tanques) como combustible para alimentar los sistemas de carga y suministro de energía del buque.

1.2.6. Transporte

Con los tanques ya cargados de producto y la operación de carga concluida, el buque LNG puede emprender su travesía y dirigirse al puerto de destino donde procederá a descargar el GNL en una terminal de recepción donde se regasificará. El transporte debe realizarse con unos estándares de seguridad específicos para este tipo de carga y de buques.

1.2.7. Regasificación, distribución y consumo

En las terminales de regasificación, el GNL se somete a un proceso de calentamiento mediante unidades de regasificación, elevando su temperatura y convirtiéndolo nuevamente en gas natural. Una vez regasificado, el gas natural se distribuye a través de redes de tuberías hacia los consumidores finales.

2. BUQUES TANQUE ACTUALES UTILIZADOS PARA EL TRANSPORTE DE GNL

Los buques tanque utilizados para el transporte de gas natural licuado, conocidos como buques LNG o metaneros, están específicamente diseñados para el transporte de este tipo de carga. Actualmente, existen diferentes tipos de estos buques operando en el mercado del GNL. Cada buque tiene características específicas que los hacen más adecuados para ciertos proyectos y rutas. Por lo tanto, conocer los factores que los diferencian es crucial para adaptarse a las necesidades del flete.

Hasta abril de 2023, la flota global de buques LNG alcanzó un total de 668 buques activos. Durante el año 2022, se entregaron 27 nuevos buques, seguidos de otros 11 en los primeros cuatro meses de 2023. Esto representa un crecimiento del 4% en la flota en comparación con el año anterior. Además, se observó un aumento del 2,79% en el número de viajes en el mismo período [5].

Estos números reflejan los esfuerzos continuos de Europa por aumentar sus importaciones de GNL con el objetivo de fortalecer su seguridad energética, que se intensificó debido al conflicto entre Rusia y Ucrania, que resultó en una reducción del flujo de gas a través de los gasoductos rusos hacia Europa. A finales de abril de 2023, una cifra de 312 buques se encuentra en construcción, lo que da una visión de las altas expectativas que tienen los armadores en el crecimiento del comercio de GNL.

2.1. Flota de buques metaneros según su edad y capacidad de carga

La edad del buque o el astillero donde fue construido dan una pista importante para determinar el tipo de buque y su tecnología. También su vida útil restante, pues podría ser descartado para fletes que requieran de su servicio por más tiempo. Debido al corto plazo en el aumento del comercio de GNL en las últimas dos décadas, la flota mundial de buques LNG es relativamente joven, la gran mayoría de los buques tienen menos de 20 años. Los buques nuevos son más grandes y eficientes y se espera de ellos una vida útil de entre 35 y 40 años, aunque esta cifra puede verse disminuida debido a avances tecnológicos y nuevas regulaciones de control de emisiones.

Otro factor importante es la capacidad de carga. Los primeros buques que transportaban GNL tenían una capacidad de apenas unos 30.000 m³, una cifra que ha ido incrementando con el tiempo. De los 27 buques que se entregaron en 2022, todos menos tres tienen una capacidad de entre 170.000 y 200.000 m³ [5]. Esta optimización de la capacidad de carga se debe al incremento de la oferta y demanda que ha ido creciendo y, también, de las capacidades de las plantas de licuefacción y regasificación.

2.2. Flota de buques metaneros según su sistema de propulsión

El sistema de propulsión es un aspecto fundamental que influye en los gastos de capital y operativos, las emisiones, el tamaño del buque y el cumplimiento de regulaciones. En el caso de los buques metaneros, existen diferentes sistemas de propulsión utilizados,

como la turbina de vapor, los motores de cuatro tiempos con propulsión dual (DFDE y TFDE) y los motores de dos tiempos (MEGI y XDF). Todos estos sistemas aprovechan el gas que se evapora naturalmente en los tanques, conocido como *boil-off gas* (BOG), para evitar pérdidas.

Históricamente, la turbina de vapor, en la Figura 2.2.1. como “ST” (*Steam Turbine*), ha sido el sistema de propulsión dominante en la flota de buques LNG desde la década de 1970. Este sistema cuenta con la capacidad de utilizar combustible dual y tiene costos de mantenimiento relativamente bajos. Sin embargo, el aumento en el costo del fuel oil y las regulaciones más estrictas sobre las emisiones han impulsado el desarrollo de alternativas de propulsión más eficientes, que permiten reducir el tamaño de la sala de máquinas y aumentar la capacidad de carga.

En 2004, surgieron los motores de cuatro tiempos con propulsión dual (DFDE y TFDE), lo que marcó el fin del dominio de la turbina de vapor en los buques metaneros. A partir de 2010, se comenzaron a instalar los motores de dos tiempos y en 2016 los motores MEGI ganaron popularidad [6].

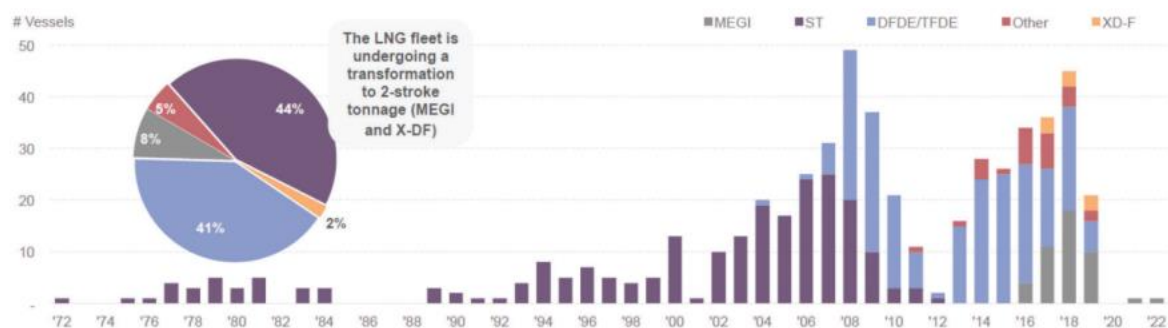


Figura 2.2.1. Flota de buques LNG según el tipo de propulsión [6].

Este continuo desarrollo del sistema de propulsión se debe a la eficiencia y reducción de costos operativos, el cumplimiento ambiental, la innovación tecnológica y el desarrollo de infraestructura. Esto implica el desarrollo de motores más eficientes y el uso de combustibles más limpios como el gas natural. Se han realizado avances en los motores de dos tiempos y, además, se ha desarrollado infraestructura para el suministro y distribución de GNL, lo que ha influido en el diseño y capacidades de los sistemas de propulsión para adaptarse a las necesidades del nuevo mercado.

2.2.1. La turbina de vapor

La turbina de vapor se considera en gran medida una tecnología obsoleta para la propulsión de buques, lo que ha llevado a dificultades para contratar personal con experiencia en este tipo de sistema. En este sistema, dos calderas suministran vapor a una turbina de alta y luego a una de baja presión, que alimenta tanto a los sistemas auxiliares como a la propulsión principal del buque. El vapor de carga es el principal combustible utilizado, complementado con HFO (*Heavy Fuel Oil*) en caso de necesidad. Estos combustibles pueden ser quemados en diversas proporciones, y el exceso de gas evaporado puede ser convertido en vapor, lo que elimina la necesidad de una unidad de combustión de gas adicional. Además, los costos de mantenimiento asociados son relativamente bajos.

La principal desventaja de las turbinas de vapor es su baja eficiencia, algo que las generaciones más recientes de sistemas de propulsión han conseguido mejorar significativamente. Actualmente, hay 221 buques con este sistema de propulsión [5] y no se esperan nuevas entregas de buques con turbinas de vapor [7].

2.2.2. Motores de cuatro tiempos con propulsión dual (DFDE y TFDE)

La propulsión DFDE (*Dual Fuel Diesel Electric*) se presentó en 2004 como una alternativa a los sistemas de turbina de vapor. Utiliza tanto el BOG como el diésel en dos modos separados. Los generadores alimentados por estos modos producen electricidad, que se utiliza para impulsar motores eléctricos y propulsar el buque. Además, la energía auxiliar se entrega a través de estos generadores, y en caso de exceso de BOG, se instala una unidad de combustión de gas (GCU).

En 2008, se introdujo la propulsión TFDE (*Triple Fuel Diesel Electric*), mejorando la adaptabilidad de estos buques al permitir la quema de HFO como fuente de combustible adicional. La capacidad de seleccionar diferentes combustibles según las condiciones de navegación y los precios del combustible predominantes aumenta la eficiencia general en comparación con los sistemas de propulsión de turbina de vapor.

A pesar de las ventajas de los sistemas de propulsión DFDE y TFDE, también tienen ciertas desventajas. Los gastos de capital y los costos de mantenimiento asociados son relativamente altos debido a la necesidad de una GCU y la cantidad de motores y

cilindros. Además, en el modo de gas, pueden ocurrir fallos de encendido si la composición del gas está fuera del rango especificado por el motor. Hay 193 buques TFDE/DFDE activos a fines de abril de 2023 y se espera la entrega de 22 buques de nueva construcción con sistemas TFDE [5][7].

2.2.3. Motores de dos tiempos MEGI

En 2016 ganó popularidad este tipo de propulsión por inyección de gas controlado electrónicamente de dos tiempos, MEGI, que presuriza el BOG y lo quema con una pequeña cantidad de combustible diésel inyectado. Al utilizar motores de baja velocidad, que permiten una mayor proporción de BOG, se puede lograr un rendimiento óptimo, independientemente del tipo de combustible utilizado, lo que contribuye a una mayor eficiencia en la operación. Desde el 2015 se han entregado un total de 72 buques con sistema de propulsión MEGI [5][7].

2.2.4. Motores de dos tiempos XDF

El sistema XDF aparece por primera vez en 2017. Su funcionamiento se basa en la inyección de gas a baja presión y la quema de combustible y aire.

En cuanto a la eficiencia y el consumo general de combustible, se ha observado que los buques metaneros equipados con motores MEGI y motores XDF de primera generación son comparables. Sin embargo, hay áreas en las que el motor XDF de primera generación destaca, como la seguridad y las emisiones. Este motor ofrece bajos niveles de emisiones de nitrógeno sin requerir un sistema de postratamiento adicional. Por otro lado, el motor MEGI compensa esta diferencia con un consumo ligeramente menor de combustible/gas y una mejor respuesta dinámica en términos de rendimiento y maniobrabilidad del buque. La elección entre ambos sistemas dependerá de los requisitos específicos de cada proyecto y las prioridades del operador en términos de eficiencia, emisiones y rendimiento.

La flota actual de metaneros cuenta con 114 buques con el sistema XDF en servicio [5].

2.3. Flota de buques metaneros según su sistema de contención

Los buques LNG pueden diferenciarse también según el sistema de contención del GNL. Se pueden dividir en dos categorías principales: los sistemas de membrana y los de tanques esféricos, representados en la Figura 2.3.1.

Los sistemas de membrana están diseñados principalmente por Gaztransport & Technigaz (GTT) y forman parte de la estructura del casco del buque. Está formado por tanques de forma prismática con doble barrera y doble aislamiento. Con el movimiento natural de cabeceo y balance del buque provocados por el mar surge lo que se conoce como “*sloshing*”, que consiste en una presión de alto impacto que puede dañar la superficie del tanque por el efecto de superficies libres, que en este tipo de sistema es mayor. Como precaución ante este efecto, el nivel de los tanques debe situarse siempre por debajo del 10% de la altura del tanque o superior al 70%. Además, se está imponiendo la cubierta “Trunk”, que sobresale de la cubierta principal y ayuda a prevenir daños en el tanque y a reducir el impacto del “*sloshing*”.

Por el contrario, los tanques esféricos constituyen un sistema autosoportante independiente de la propia estructura del buque, y se conocen como tanques tipo Moss Rosenberg. Estos tanques tienden a sufrir menos “*sloshing*” y la tasa de *boil-off* es menor. A pesar de ello, este tipo de tanques no alcanza ni el 20% de la flota actual y esto se debe, entre otras razones, a que la utilización del espacio es ineficiente y demasiado pesado.

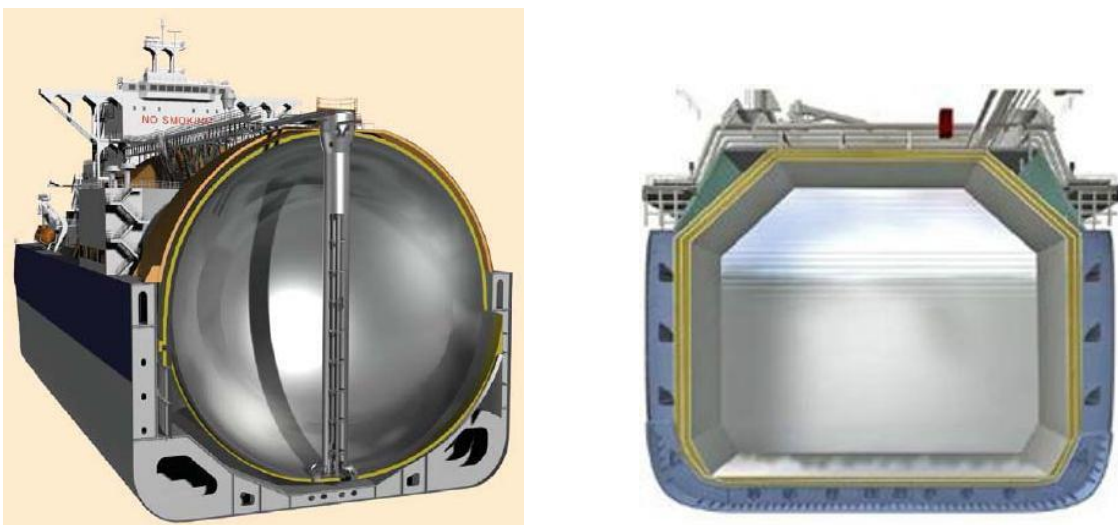


Figura 2.3.1. A la izquierda tanque tipo Moss Rosenberg y a la derecha tanque de membrana [8][9].

A continuación, se muestra un cuadro comparativo de las principales ventajas y desventajas de estos dos tipos de sistemas de contención, así como los buques que existen actualmente de cada tipo.

	Membrana	Autosoportante
Flota actual	545	123
Porcentaje de la flota actual	81,6%	18,4%
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Utilización del espacio más eficiente - Más ligero - Mayor eficiencia del combustible - Menos altura del puente 	<ul style="list-style-type: none"> - Posibilidad de carga parcial - Construcción más rápida - Cargado genera menos BOG - Más resistente en condiciones adversas
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Carga parcial restringida (“sloshing”) - Menos resistente en condiciones adversas 	<ul style="list-style-type: none"> - Más pesado - Enfriamiento más lento - Utilización del espacio menos eficiente

Tabla 2.3.1. Comparación de los sistemas de contención. Elaboración propia.

Debido a las ventajas del sistema de membrana en contraposición con el sistema autosoportante, las nuevas construcciones han optado casi por completo por este primero.

2.3.1. Tasa de *boil-off gas*

Hay que considerar la tasa de *boil-off gas* (BOG) generada por los buques, que tiene lugar durante el almacenamiento, la carga o descarga y el viaje. Los buques metaneros están diseñados para transportar gas natural en forma líquida a una temperatura por debajo de su punto de ebullición y, a pesar del aislamiento del tanque para reducir la admisión de calor externo, es inevitable una evaporación natural de la carga debido al “sloshing”, la cual debe eliminarse para mantener la presión en los tanques de carga y, la forma de hacerlo es relicuándolo a bordo, o bien, quemándolo en la unidad de combustión. Si esta cantidad de líquido que se evapora no es relicuada, supone una pérdida de carga. Por

eso, lo que se busca es reducir el porcentaje todo lo posible y, si el promedio era de 0.15%/día, ya se ha logrado reducir hasta el 0.1%/día [6].

Esta tasa ha disminuido con el avance en los sistemas de aislamiento de los tanques, se buscan materiales más eficientes y un mejor aprovechamiento del volumen de los tanques, lo que resulta favorable para los beneficios económicos del fletador, pues es más gas que se entrega y menos que se desperdicia siendo quemado en los propios buques.

3. RUTAS PARA EL TRANSPORTE DE GNL

La extensa red de transporte marítimo de gas natural licuado abarca diversas rutas transoceánicas, como la del Atlántico, Pacífico y Golfo Pérsico, además de otras rutas de corta distancia, conectando prácticamente todos los rincones del mundo.

En cuanto a las rutas predominantes a nivel mundial en 2022, la ruta de Australia a Japón encabezó la lista con un total de 492 viajes. A nivel europeo, la ruta de Estados Unidos a España fue la más frecuente, con un total de 135 viajes.

En 2022 se realizaron un total de 6.888 viajes comerciales de GNL, lo que representa un aumento del 2,7% con respecto al año anterior [5], impulsado por el conflicto entre Rusia y Ucrania, que favoreció el transporte marítimo del GNL debido a la interrupción del suministro a través de gaseoductos.

Un ejemplo destacado de este crecimiento se observa en la ruta que conecta Estados Unidos y Europa, la cual experimentó un notable aumento al duplicar sus viajes comerciales de GNL en 2022 en comparación con el año anterior. Estos datos proporcionados por el informe mundial de GNL del IGU (*International Gas Union*) [5] dan una visión general de la situación en 2022, pues esta industria es dinámica y está sujeta a los cambios según la demanda y otros factores económicos y políticos.

3.1. Rutas alternativas

Contar con rutas alternativas es de vital importancia para mantener un flujo ininterrumpido en el comercio marítimo del GNL. Un claro ejemplo de la necesidad de

estas alternativas ocurrió con el accidente del buque portacontenedores “Ever Given” en marzo de 2021, que resultó en la interrupción de la conexión entre el Mar Mediterráneo y el Mar Rojo a través del Canal de Suez. Este incidente provocó una semana de bloqueo y generó costos significativos para el comercio marítimo, ya que el Canal de Suez es la única vía fluvial que conecta Europa, África y Asia.

Las interrupciones en el tránsito marítimo pueden surgir no solo por incidentes, sino también debido a factores climáticos adversos, conflictos armados, ataques terroristas y piratería, entre otros.

Similares al Canal de Suez existen otros pasos, conocidos como cuellos de botella, que suponen un riesgo para el suministro energético, por ejemplo: estrecho de Malaca, estrecho de Gibraltar, estrecho de Singapur, canal de Panamá, etc., señalados en la Figura 3.1.1. Los cuellos de botella son puntos en el tránsito marítimo que experimentan restricciones debido a su capacidad física y características. Estos lugares son difíciles de evitar porque, en muchas ocasiones, existen pocas o ninguna alternativa viable, y las rutas alternativas disponibles suelen ser considerablemente más largas. Como resultado, los costos se elevan significativamente y se producen retrasos en la cadena de suministro debido a estas limitaciones.

En 2016, se realizaron importantes mejoras en el Canal de Panamá, que incluyeron su ampliación y profundización. Estas modificaciones han reducido significativamente el tiempo de travesía desde la costa Este de Estados Unidos hasta Japón en comparación con las rutas que atraviesan el Canal de Suez o costean el Cabo de Buena Esperanza. Sin embargo, este avance también ha tenido un efecto negativo: el aumento en el número de buques que desean utilizar el canal ha generado tiempos de espera que pueden superar los 20 días. Debido a esta situación, en ocasiones resulta más conveniente optar por rutas alternativas para evitar los largos retrasos.

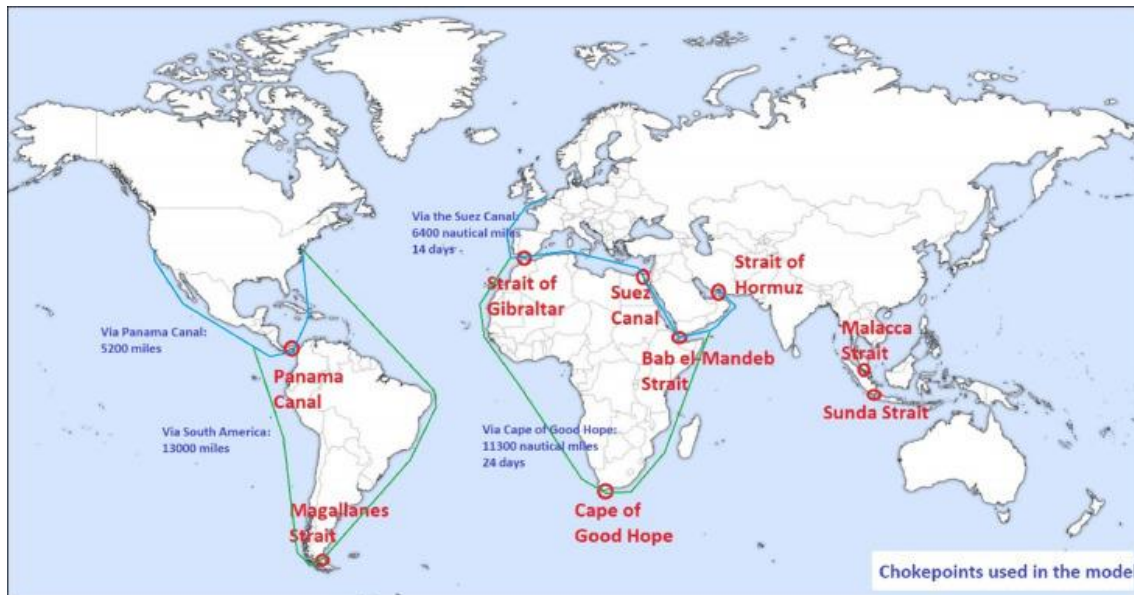


Figura 3.1.1. Principales puntos de estrangulamiento del tráfico marítimo [10].

Más de la mitad de los viajes de transporte marítimo de GNL atraviesan alguno de estos puntos críticos [10]. Para poner una solución a esto es fundamental una cooperación entre la comunidad marítima y los países cercanos a estos cuellos de botella. Esta colaboración implica la reducción de las amenazas como la piratería y el terrorismo, y también la preservación y el buen mantenimiento de la infraestructura, es decir, mantener en buen estado y operativos los canales artificiales o los pasajes naturales para que los buques puedan transitar por ellos de forma segura, así como asegurar el adecuado funcionamiento de las terminales en tierra. Además, es importante que haya reservas alternativas que permitan suministrar el GNL a los buques LNG en caso de interrupciones. Así se garantizaría un flujo continuo del GNL y se reduciría el impacto que cualquier interrupción pudiera ocasionar.

3.1.1. La Ruta del Norte como alternativa

La Ruta del Norte, también conocida como Ruta del Mar del Norte o Ruta del Ártico, ha ganado relevancia debido al cambio climático, que ha provocado un deshielo gradual en el Ártico, permitiendo la navegación durante ciertos períodos del año. Esta ruta, que tiene entre 2.200 y 2.900 millas náuticas [11], ofrece un atajo significativo entre el Atlántico Norte y el Pacífico Norte, atravesando el Estrecho de Bering, lo que atrae el interés del transporte marítimo de GNL, especialmente para el comercio entre Europa y

Asia que, actualmente, se efectúa a través del Canal de Suez o el Cabo de Buena Esperanza.

Un estudio comparativo entre un viaje de un buque LNG por la Ruta del Norte y por el Canal de Suez, manteniendo la misma condición y mismos puertos de origen y destino, revela que la ruta alternativa ofrece una distancia de navegación un 50% más corta entre el noroeste de Europa y el noroeste de Asia (unos 20 días menos), en comparación con la misma ruta a través del Canal de Suez [11]. Esta diferencia está representada en la Figura 3.1.1.1.

Al igual que con cualquier actividad en la Ruta del Norte el transporte de GNL también enfrentaría los desafíos de las condiciones climáticas extremas y la presencia de hielo flotante, lo que exige que los capitanes y tripulaciones estén altamente capacitados y tengan experiencia en navegación en este tipo de regiones. La falta de experiencia y conocimientos específicos podría aumentar los riesgos y la necesidad de una mayor preparación para enfrentar accidentes y solicitar asistencia de rescate en caso de emergencia. Además, la falta de infraestructura en la región plantea preocupaciones adicionales.

Asimismo, han surgido ciertas inquietudes ambientales debido al riesgo de derrames de combustible u otros desastres marinos que podrían tener un impacto devastador en los delicados ecosistemas árticos. Sin embargo, en el caso de los metaneros, la contaminación marina es mínima, ya que su combustible principal es el GNL. Aunque pueden ser duales y consumir fueloil en ciertas circunstancias, no se puede comparar con la contaminación que podrían producir petroleros o quimiqueros. Una ventaja significativa es que, en caso de pérdida de GNL, este se evaporaría e iría directamente a la atmósfera, evitando así la contaminación marina.

Esto hace que los metaneros sean una opción más favorable desde el punto de vista ambiental y, como consecuencia, resultan más adecuados y seguros para navegar por la emergente Ruta del Norte.

A pesar de los desafíos, establecer la Ruta del Norte como una alternativa al Canal de Suez y el Cabo de Buena Esperanza podría reducir la posibilidad de sufrir retrasos por congestión e interrupciones en las otras rutas. Además, al ser una travesía más corta,

podría disminuir el consumo de combustible y contribuir a la reducción de emisiones, lo que resulta especialmente atractivo para el comercio de GNL.

No obstante, la viabilidad a largo plazo de la Ruta del Norte depende de factores como el cambio climático, la cooperación internacional y el desarrollo de tecnologías de navegación y seguridad en el Ártico. Aunque su potencial como ruta comercial sigue siendo objeto de debate, se están dando avances significativos en su desarrollo. Para el año 2024, se prevé la entrega de 29 buques LNG de clase rompehielos [5]. No obstante, aún es fundamental realizar una evaluación cuidadosa de los riesgos y beneficios para el transporte marítimo en el Ártico, a fin de asegurar un futuro sostenible y seguro para esta ruta emergente.



Figura 3.1.1.1. Ruta alternativa del Norte [12].

4. BUQUES PROPULSADOS POR GNL

Los buques metaneros desempeñan una función fundamental en la reducción de emisiones en el sector del transporte marítimo gracias a su utilización del GNL como fuente principal de energía. Sin embargo, ha surgido una nueva generación de buques que, aunque no son metaneros, adoptan el GNL como su combustible principal. Estos buques propulsados por GNL han establecido una innovadora y ecológica alternativa en comparación con los buques tradicionales que utilizan combustibles fósiles. El GNL,

como fuente eficiente y amigable con el medio ambiente, se ha convertido en una solución transitoria en la navegación marítima [13][14].

Un rasgo esencial en estos buques radica en la reducción de emisiones. La combustión de gas natural procedente del GNL emite un 25% menos de dióxido de carbono (CO₂), un 80% menos de óxidos de nitrógeno (NO_x) y una cantidad prácticamente nula de dióxido de azufre (SO₂) en comparación con la combustión de los combustibles líquidos convencionales [15]. Asimismo, se reduce la emisión de otras partículas contaminantes, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire y reducir el impacto ambiental. Un estudio que evalúa la rentabilidad de cuatro combustibles alternativos, incluido el GNL, concluye que reemplazar los buques diésel existentes por buques propulsados por GNL de nueva construcción resultaría en una disminución del 37% en las emisiones totales [16].

Otro punto clave se centra en la reducción del contenido de azufre. El GNL se caracteriza por poseer un contenido de azufre extraordinariamente bajo, lo que no solo contribuye a la mejora de la calidad del aire, sino que también resguarda la salud pública.

Es importante mencionar que el GNL tiende a ser menos costoso que el diésel marino e, incluso, en algunas regiones, más económico que el fueloil pesado [17].

A medida que esta tendencia crece, resulta crucial trabajar en la expansión de la infraestructura necesaria. Esto implica la creación de más terminales de carga, sistemas de abastecimiento más avanzados y un mayor número de buques especializados en el *bunkering* de GNL. Además, la innovación en tecnologías avanzadas es esencial para respaldar esta transición hacia una industria marítima más sostenible, para optimizar la rentabilidad de estas operaciones.

No obstante, es vital considerar que esta inversión significativa en infraestructura en buques y en tierra podría ocasionar obstáculos en la transición hacia combustibles con nulo contenido de carbono, y esto debe ser abordado con precaución. La transición hacia fuentes de energía más limpias es una prioridad innegable y, aunque es posible que la inversión actual no se recupere por completo, resulta esencial aprovechar las tecnologías disponibles para reducir el impacto ambiental mientras aguardamos la llegada de nuevas alternativas de combustibles.

4.1. Buques de abastecimiento de GNL

La imposición de regulaciones ambientales más rigurosas a nivel global y regional está generando una presión considerable sobre los propietarios de buques mercantes para que adopten alternativas más limpias a los combustibles convencionales. Desde enero de 2020, la Organización Marítima Internacional (OMI) ha establecido un límite máximo de 0,5% de azufre en el contenido de fueloil para los buques en todo el mundo. Además, ha designado las llamadas Áreas de Control de Emisiones (ECA) como, por ejemplo, en el Mar del Norte, en Estados Unidos y en Canadá, donde se prohíbe el uso de combustibles con más de 0,1% de contenido de azufre. A partir de 2025, el Mar Mediterráneo también se convertirá en una ECA [18]. Esta restricción más estricta en el contenido de azufre ha motivado la transición hacia buques impulsados por GNL, que presentan emisiones de azufre casi nulas. Esta transición se logra mediante la instalación de nuevos sistemas, junto con el desarrollo de infraestructura de suministro de GNL.

Aunque la actividad de suministro de GNL disminuyó en 2022 debido a los precios competitivos de los combustibles derivados del petróleo, en el presente año se está reactivando, ya que los precios del GNL se han vuelto competitivos nuevamente y las iniciativas de descarbonización están ganando impulso. Las regulaciones recientes, como el cálculo del índice de eficiencia energética aplicable a buques existentes (EEXI) y el indicador de intensidad de carbono (CII) de la OMI, han acelerado la demanda de buques propulsados por GNL, ya que las embarcaciones deben cumplir con requisitos de eficiencia energética y emisiones [19][20]. La OMI también busca lograr una disminución del 50% en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector marítimo para el año 2050, comparado con el 2008. Esto refuerza la importancia del GNL como una opción para alcanzar una reducción en las emisiones de carbono, trazando un camino en la reducción de emisiones hasta que los combustibles libres de carbono, como el hidrógeno y el amoníaco, se desarrollen completamente [21].

El suministro de GNL a buques mediante operaciones de *bunkering* se considera el método más eficiente en comparación con el abastecimiento en terminales. Pues se lleva a cabo mediante buques específicamente diseñados para transportar y entregar este tipo de combustible, lo que hace que las operaciones sean más efectivas y seguras. Otro punto a favor es su capacidad de carga, que reduce la necesidad de hacer combustible

con más frecuencia. Estas operaciones suelen realizarse en lugares estratégicos para el tráfico marítimo, reduciendo así las distancias y los tiempos de navegación requeridos para el suministro y, en consecuencia, los costes asociados.

La expansión de la flota de buques de suministro de GNL ha sido notable en diferentes partes del mundo. Desde la década pasada, se han desarrollado tanto buques de suministro de combustible como terminales equipadas con instalaciones de abastecimiento, principalmente en regiones con una infraestructura de GNL establecida.

Aunque a principios de los 90 ya había buques que se dedicaban al servicio de abastecimiento mediante operaciones STS, no fueron construidos específicamente para ello. La primera gabarra dedicada al *bunkering* de GNL, con nombre Seagas (Figura 4.1.1.) entró en servicio en 2013 en el Puerto de Estocolmo. A finales de abril de 2023, el número de buques dedicados al *bunkering* de GNL era de 35 y la mayoría operan en Europa [5].

Un aspecto que considerar como un posible inconveniente del GNL como combustible es su demanda de espacio considerablemente mayor en comparación con los combustibles fósiles. El espacio a bordo es un recurso crítico e introducir tanques de almacenamiento de GNL puede plantear desafíos logísticos y de diseño para los buques. La ocupación del espacio por los tanques de GNL puede influir en la capacidad de carga del buque o limitar la disposición de otras estructuras o equipos a bordo, así como afectar a la estabilidad y maniobrabilidad del buque. Por lo tanto, es esencial sopesar cuidadosamente estos aspectos a la hora de considerar el uso de GNL como combustible [15].



Figura 4.1.1. Gabarra de GNL SEAGAS [22].

En los próximos años se anticipa un crecimiento significativo en el número de gabarras y operaciones de *bunkering*, que está ligado a un aumento de la conciencia sobre los impactos ambientales que traen consigo los combustibles fósiles. El *bunkering* emerge como el método predominante gracias a su capacidad de carga, que implica una mayor eficiencia en los suministros. Además, conlleva ventajas económicas, ya que suele llevarse a cabo en fondeo, lo que evita los gastos asociados al atraque que son necesarios en otros métodos, la mayoría de los cuales no resultan viables para la mayoría de los buques. El GNL mantiene su posición como una alternativa más limpia y viable, especialmente a la luz de las nuevas regulaciones que surgen para abordar esta problemática ambiental [23].

Sin embargo, mientras esta tendencia continúa creciendo, también se está presenciando un avance constante en el desarrollo de combustibles aún más sostenibles. Estos combustibles emergentes tienen el potencial de asumir un papel dominante en el comercio de combustibles, superando al GNL.

5. INFLUENCIA DE LAS POLÍTICAS AMBIENTALES Y REGULACIONES RELACIONADAS

En el contexto del transporte marítimo de GNL, las políticas ambientales y las regulaciones desempeñan un papel esencial en la evaluación de la viabilidad y

sostenibilidad de esta fuente de energía. Estas normativas, que evolucionan de manera constante, son elementos cruciales a tener en cuenta al analizar las perspectivas futuras del transporte marítimo de GNL.

El transporte marítimo está sujeto a una serie de regulaciones que en los últimos años se han vuelto más específicas para las embarcaciones que utilizan gas como combustible, como es el caso de los buques gaseros. Estas normativas rigen desde el ámbito internacional hasta el nacional, y abordan cuestiones relacionadas con la seguridad, el diseño y la construcción de los buques, la capacitación de la tripulación, así como los procedimientos en puertos y operaciones de *bunkering*, entre otros aspectos.

5.1. Control de emisiones

En respuesta a la creciente preocupación por la protección del medio ambiente, las autoridades internacionales han establecido restricciones a las emisiones de contaminantes convencionales, que incluyen la reducción del contenido de azufre en los combustibles y la adopción de sistemas de tratamiento de gases de escape. Estas regulaciones, combinadas con la urgencia de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI), han estimulado el desarrollo de tecnologías limpias alternativas para la propulsión marítima. Estas tecnologías se basan en combustibles fósiles con bajas emisiones de carbono, como el gas natural, o en medios energéticos alternativos, como el hidrógeno y el amoníaco.

5.1.1. Acuerdo de París

En 2015, se adoptó un acuerdo de alcance global conocido como el Acuerdo de París, como parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Su objetivo primordial es limitar el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C [24]. Aunque este acuerdo no incluye disposiciones específicas para el transporte marítimo, su enfoque en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial es relevante para todas las industrias.

En el ámbito del transporte marítimo, esta industria es responsable del 2,9% de las emisiones de GEI y, en el contexto de la Unión Europea, contribuye con alrededor del 13,5% de las emisiones totales de GEI relacionadas con el transporte. No obstante, el transporte marítimo también juega un papel destacado en la contaminación

atmosférica, ya que es responsable del 15% de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y el 8% de las emisiones de óxidos de azufre (SOx) en todo el mundo, derivadas de actividades humanas [25].

Estos datos refuerzan la importancia del Acuerdo de París y sus objetivos de reducción de emisiones, como parte de un esfuerzo conjunto para abordar tanto el cambio climático como la contaminación atmosférica, siendo crucial que todas las industrias, incluyendo el transporte marítimo, contribuyan a la mitigación de estos problemas globales.

5.1.2. Regulaciones de la OMI

También es esencial destacar el papel fundamental de la OMI y las medidas implementadas en 2020, como se mencionó anteriormente en otro capítulo, para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y óxidos de azufre (SOx), que son contaminantes atmosféricos significativos en el transporte marítimo. El transporte marítimo de GNL se ha visto beneficiado con estas regulaciones por el aumento del uso del GNL como combustible. Además, la OMI tiene objetivos futuros en la reducción de emisiones en el transporte marítimo.

5.1.3. Áreas de Control de Emisiones (ECA)

Las Áreas de Control de Emisiones (ECA) son regiones geográficas en las que se aplican regulaciones más estrictas para reducir las emisiones de SOx y NOx provenientes de los buques. Estas áreas requieren que los buques utilicen combustibles con un contenido de azufre muy bajo o utilicen tecnologías de reducción de emisiones.

Dado que el GNL tiene un contenido de azufre extremadamente bajo de forma natural, es una elección atractiva para los buques que navegan en estas áreas, ya que cumple con los estándares de emisiones sin la necesidad de tecnologías adicionales de limpieza de gases de escape. Algunos buques optan por evadir las zonas ECA durante su travesía para eludir la necesidad de utilizar combustibles más costosos con bajos niveles de azufre [26].

En la actualidad son cuatro estas zonas designadas como zonas ECA, indicadas en la Figura 5.1.3.1.: el Mar Báltico; el Mar del Norte; la zona de Norteamérica y la zona del

Mar Caribe de los Estados Unidos, además de seis puertos en China. Próximamente, en 2025, según lo acordado por el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC), se incluirá en este grupo todo el Mar Mediterráneo, por lo tanto, los buques deberán cumplir con controles más estrictos de las emisiones de óxidos de azufre también en este mar [27]. También cabe la posibilidad de incluir otras regiones como el Mar de Noruega y las costas de México y Japón, entre otras.

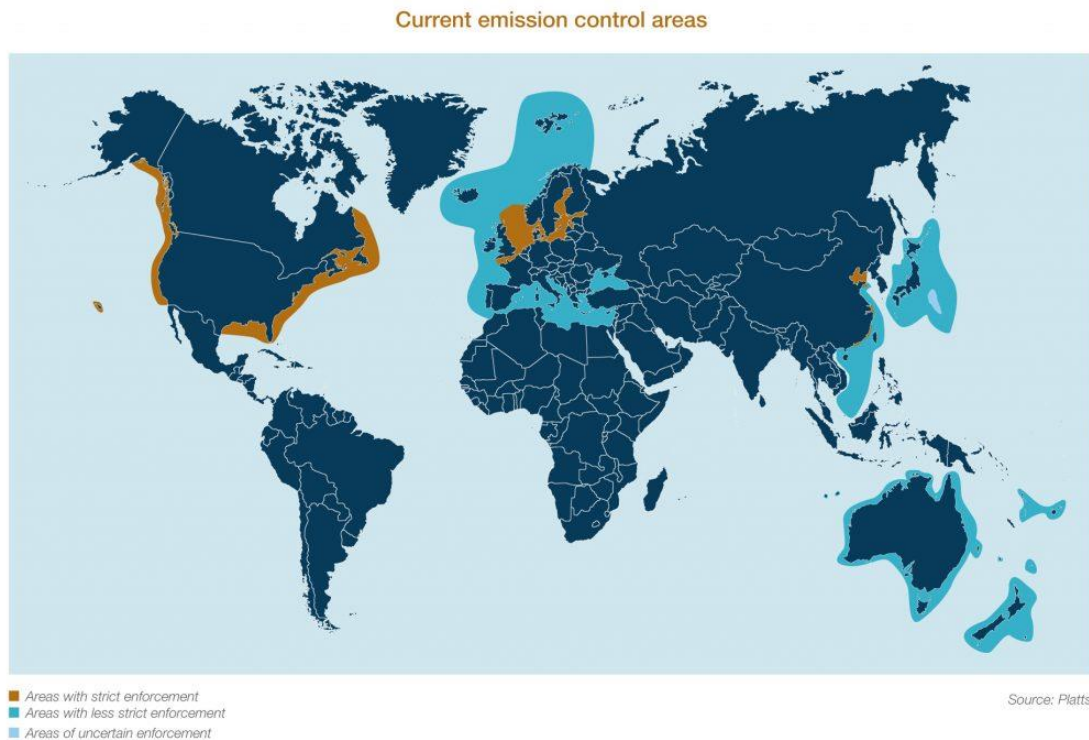


Figura 5.1.3.1. Actuales y posibles futuras zonas ECA [28].

5.2. Anexo VI del MARPOL

El Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por los Buques (MARPOL) representa el principal marco internacional destinado a prevenir la contaminación del medio marino por parte de las actividades operativas y accidentales de los buques. Este convenio consta de seis anexos técnicos, cada uno de los cuales detalla regulaciones específicas para diversas categorías de contaminación originada por buques. En particular, el Anexo VI del MARPOL se centra en el control de la contaminación atmosférica generada por los buques e incluye medidas para la reducción de las emisiones de GEI provenientes de los buques.

Dentro del Anexo VI del MARPOL, el Capítulo 3 establece una serie de regulaciones que los buques y sus sistemas deben cumplir para asegurar que las emisiones producidas por los mismos sean consideradas aceptables desde el punto de vista ambiental. Además, contiene disposiciones específicas para controlar las emisiones de sustancias que tienen un impacto en la capa de ozono, entre las que se incluyen los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, otras partículas, los compuestos orgánicos volátiles y la incineración a bordo [29].

Los buques metaneros están en consonancia con las regulaciones del Anexo VI del MARPOL debido a las particularidades asociadas a su empleo del GNL como fuente principal de energía.

5.3. Código IGF

Un nuevo código, conocido como el Código Internacional de Gas Natural Licuado (Código IGF), se implementó el 1 de enero de 2017, introduciendo requisitos obligatorios para buques que utilizan gases u otros combustibles de bajo punto de inflamación. Estos combustibles, como el GNL, son más limpios para la atmósfera. Sin embargo, plantean desafíos adicionales en cuanto a seguridad, que deben abordarse adecuadamente.

El objetivo principal del Código IGF es minimizar los riesgos asociados con el uso de estos combustibles tanto para la tripulación de los buques como para el medio ambiente. Estas regulaciones están acordes con las enmiendas al Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (Convenio SOLAS), que requieren que los buques nuevos que utilicen estos combustibles cumplan con las disposiciones del Código IGF. Esto incluye aspectos como la disposición, instalación, control y supervisión de maquinaria, equipos y sistemas que utilizan combustibles de bajo punto de inflamación, con un enfoque particular en el GNL [30].

Además de las enmiendas al Convenio SOLAS, también se han realizado enmiendas al Convenio Internacional sobre Normas de Formación, Titulación y Guardia para la Gente de Mar (Convenio STCW). Estas enmiendas establecen requisitos mínimos de formación y calificaciones para los capitanes, oficiales, marineros y otros miembros de la tripulación que trabajan en buques regidos por el Código IGF [31].

La resolución del 21 de septiembre de 2016, emitida por la Dirección General de la Marina Mercante, dicta que es esencial contar con el Certificado de formación básica para aquellos responsables de las labores relacionadas con la seguridad en estos buques. Esto engloba medidas de precaución para la correcta manipulación del combustible a bordo, su utilización y los protocolos de actuación ante situaciones de emergencia [31].

6. EL MERCADO INTERNACIONAL DE GNL

La problemática de la contaminación ambiental y la creciente crisis energética son dos desafíos cruciales en el desarrollo global. El gas natural, al ser una fuente de energía abundante, limpia y altamente eficiente, ha adquirido con el tiempo cada vez más relevancia en el panorama energético a nivel mundial. En los últimos años, el comercio internacional de gas natural ha experimentado un fuerte aumento, impulsado por el incremento de las cantidades de gas natural que se han descubierto como disponibles, así como a las mejoras realizadas en la infraestructura utilizada para su transporte y almacenamiento.

No obstante, se observa una distribución desigual en cuanto a disponibilidad de gas natural. Por ejemplo, la región de Asia y el Pacífico, que constituye la principal consumidora de gas natural, importa la mayor parte de su demanda, a pesar de tener reservas probadas de gas natural relativamente bajas. Además, la mayoría del suministro mundial de GNL proviene de un pequeño grupo de países, como Estados Unidos, Qatar, Australia y Rusia, lo que significa que el poder en la exportación de GNL está en manos de unas pocas naciones.

Este panorama se complica aún más debido a la influencia de factores económicos y políticos, que pueden generar incertidumbre en la estabilidad de los proyectos relacionados con el GNL. A pesar de los objetivos de muchos países de alcanzar la neutralidad de carbono, el gas natural continúa siendo una fuente de energía fundamental en la mayoría de ellos. La reciente crisis energética en Europa, desencadenada en parte por el conflicto entre Rusia y Ucrania, ha llevado a las principales naciones consumidoras de gas natural a explorar nuevas relaciones comerciales y diversificar sus fuentes de suministro.

Por lo tanto, es esencial estimar las posibles relaciones comerciales futuras en el comercio de GNL para ayudar a los gobiernos a prepararse estratégicamente con anticipación y mejorar la seguridad del comercio de gas natural en caso de interrupciones en las relaciones comerciales existentes.

6.1. Tendencias destacadas en el mercado global de GNL

Evaluar la necesidad de invertir en nuevos proyectos de GNL depende de cómo coincidan la oferta y la demanda a nivel global. La producción de GNL en proyectos planificados es generalmente predecible, pero la demanda es más incierta debido a eventos recientes y políticas ambientales. A pesar de los desafíos, los contratos a largo plazo y la seguridad energética respaldan el desarrollo de proyectos de GNL.

6.1.1. Reporte anual del IGU (*International Gas Union*) sobre importaciones y exportaciones

El comercio global de GNL experimentó un crecimiento del 6,8% entre 2021 y 2022, alcanzando aproximadamente 401,5 millones de toneladas métricas [5]. Este crecimiento, que va en aumento año tras año, se refleja en la Figura 6.1.1.1., en la que se destacan los principales importadores y exportadores durante cada año del desde 2015 hasta la actualidad. Este aumento se debió en gran medida al brusco impacto en el suministro de gas a través de gasoductos tras el inicio del conflicto entre Rusia y Ucrania. En Europa, los precios elevados atrajeron cargamentos de GNL que normalmente habrían ido a Asia.

El incremento en las exportaciones de GNL en 2022 estuvo impulsado principalmente por Estados Unidos, que aumentó sus exportaciones un 15%, debido a nuevos proyectos. De hecho, Estados Unidos superó a Qatar como el segundo mayor productor de GNL del mundo en 2022.

Rusia también aumentó sus exportaciones un 11,6% en 2022, y Qatar, aunque fue superado por Estados Unidos, aumentó un 4% sus exportaciones. Ambos países buscaron aumentar su producción debido a la subida de los precios.

A pesar de estos cambios, Asia Pacífico continuó siendo la región líder en exportaciones, con un total de 136,6 millones de Tm exportadas en 2022. También conservó su posición

como la región líder en importaciones de GNL en 2022, con un total de 160,9 millones de Tm importadas, lo que representó un aumento de 4,6 millones de Tm en comparación con 2021. Debido a los bloqueos relacionados con la COVID-19 en China y a los altos precios internacionales que hicieron que importar GNL en Asia fuera menos atractivo, Japón ocupó un papel muy importante en las importaciones de GNL en este período.

Cabe destacar que el aumento de las importaciones de GNL en 2022 fue impulsado en gran medida por Europa, lo que permitió compensar la pérdida de volumen de gas procedente de Rusia a través de gasoductos, hasta convertirse en la segunda región importadora de GNL más grande del mundo, después de la región de Asia Pacífico.

En la actualidad, el comercio global de GNL conecta a 20 mercados exportadores con 48 mercados importadores, incluyendo a Alemania en Europa como nuevo importador de GNL, y más recientemente, Filipinas, que recibió su primer cargamento en la terminal de importación de GNL en la bahía de Batangas a finales de abril [5][32][33].

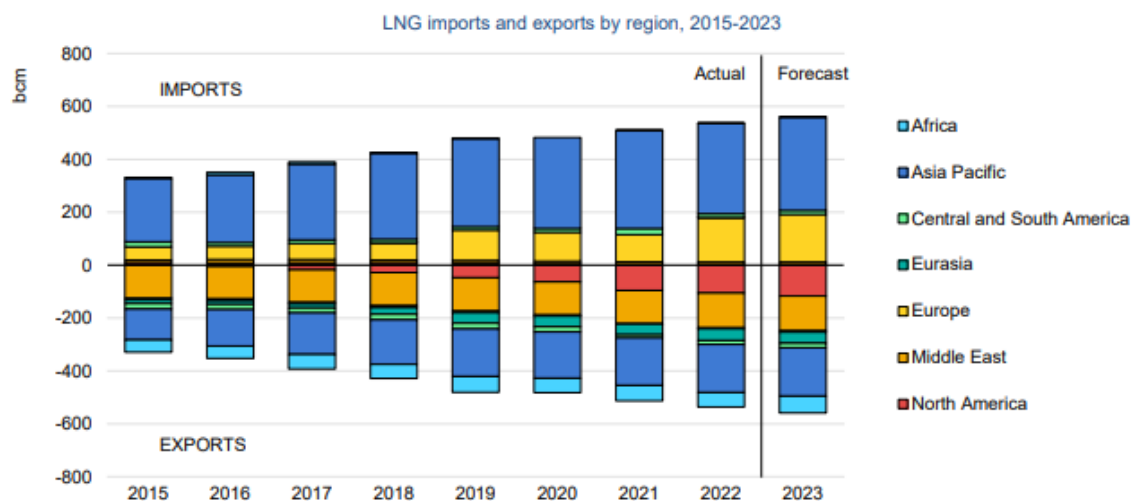


Figura 6.1.1.1. Importaciones y exportaciones por regiones de 2015 a 2023 [32].

6.2. Impactos en el mercado de GNL

El mercado global de gas natural experimentó un impacto significativo en 2022 debido a la reducción sustancial de las entregas de gas por parte de Rusia a Europa, lo que generó una presión sin precedentes en el suministro y desencadenó una crisis energética a nivel mundial. A pesar de esto, los países europeos lograron llenar sus instalaciones de almacenamiento subterráneo de gas por encima de los promedios históricos, gracias a una combinación de medidas de política específicas, un flujo récord de GNL y una fuerte

disminución del consumo, especialmente en industrias que requieren grandes cantidades de energía para llevar a cabo sus procesos de producción.

La disminución en el suministro de gas desde Rusia también afectó a otras áreas del mundo donde se consume gas, no solo Europa. Esto provocó que los precios del gas en el mercado subieran mucho, hubiera problemas para conseguir suficiente gas y que la gente consumiera menos gas. Por otro lado, debido a un invierno más suave de lo normal en el hemisferio norte, además de que llegó suficiente GNL y había suficiente almacenado, los precios del gas en Europa y Asia bajaron.

Los informes más recientes de mercado del gas concluyen que el equilibrio global del gas es inestable y existe incertidumbre para el 2023. Los mercados importadores de gas todavía enfrentan dificultades para conseguir suficiente gas, y el impacto de nuevos recortes por parte de Rusia es motivo de preocupación. Desde que comenzó la crisis, los gobiernos en Europa y otros mercados importadores han implementado medidas sólidas para protegerse mejor en términos de energía y para depender menos del gas natural [32].

6.3. Impactos en el transporte de GNL

Con el aumento de los precios internacionales del gas y la creciente importancia del GNL para la seguridad energética de Europa, el mercado de fletes marítimos también experimentó un aumento significativo. El GNL de Estados se volvió esencial para equilibrar la oferta y demanda de energía en Europa, lo que acentuó la importancia de una logística y transporte eficaces para este recurso.

La afluencia de envíos de GNL a Europa aumentó rápidamente, lo que sobrecargó la capacidad de las instalaciones de regasificación. Como resultado, hubo diferencias significativas en los precios del gas en diferentes regiones y se detectaron cuellos de botella en la infraestructura de gasoductos que dificultaron el transporte de gas a determinadas zonas. Además, se observó un número considerable de buques metaneros cerca de las costas europeas a la espera de órdenes. A consecuencia de esto, se ha iniciado la construcción de nuevas terminales de regasificación, la mayor parte de ellas flotantes (FSRU), debido a la urgencia de expandir la capacidad de regasificación.

Cabe destacar el caso de China, por ser el mercado que más rápido ha aumentado su capacidad de regasificación. Tan solo el año pasado, aprobó 14 proyectos de regasificación, aumentando así su capacidad de importación de GNL.

En cuanto a las tarifas de fletes, estas pasaron de estar alrededor de los 40,000 dólares por día antes del conflicto entre Rusia y Ucrania, a alcanzar un máximo histórico de 450,000 dólares al día a finales de octubre de 2022. El mercado de fletes se vio impulsado por la necesidad de transportar GNL pese a tener que pagar precios muy altos.

Incluso antes del conflicto, los fletadores ya habían comenzado a preferir contratos de fletamento a más largo plazo, lo que resultó en una menor disponibilidad inmediata de buques LNG cuando se necesitaron para adaptarse rápidamente a la inestabilidad causada por el conflicto. Aunque las tarifas de fletes se han reducido considerablemente este año, estos contratos de fletamento a largo plazo siguen siendo una tendencia al alza debido a los proyectos que hay en desarrollo y la necesidad de renovar la flota para cumplir con las nuevas regulaciones de la OMI sobre la reducción de emisiones.

CONCLUSIONES

El transporte marítimo de gas natural licuado está experimentando un período de crecimiento constante a pesar de los desafíos recientes, como la pandemia de COVID-19, el conflicto entre Ucrania y Rusia y la crisis energética. Cada año, se registra un incremento en la cantidad de toneladas transportadas, y el número de buques metaneros en operación sigue en aumento.

Hoy en día, el transporte marítimo de GNL desempeña un papel esencial en la cadena global de suministro de energía debido a la creciente demanda y a la necesidad de diversificar las fuentes de energía. El GNL destaca por su eficiencia y su bajo impacto ambiental, lo que lo convierte en una opción atractiva en un mundo cada vez más preocupado por la sostenibilidad.

El GNL ha pasado de ser una promesa futura a una realidad presente, funcionando como un combustible de transición hacia opciones con emisiones contaminantes nulas. Aunque se reconoce que tiene un horizonte limitado debido a su impacto ambiental, es crucial aprovechar su potencial y mejorar su uso en el presente. Sin embargo, la adaptación a esta fuente de energía plantea desafíos para los buques que aún no pueden realizar la transición, lo que podría resultar en costes más altos para aquellos que dependen de combustibles tradicionales.

La duración de este período de transición es incierta, a pesar de las inversiones significativas en infraestructura relacionada con el GNL. Es probable que estas inversiones se amorticen a medida que se prolongue la transición, ya que se espera que continúe durante mucho tiempo. Cada vez más países se están sumando al mercado del GNL para reducir su dependencia energética de otras naciones.

Las políticas ambientales y las regulaciones, como las establecidas por la OMI, están impulsando el aumento en el uso del GNL en el transporte marítimo, promoviendo la reducción de emisiones y la adopción de tecnologías limpias. A pesar de que el GNL se considera más amigable con el medio ambiente que los combustibles fósiles, después de la combustión, existe preocupación por las posibles fugas de metano, un poderoso gas de efecto invernadero, durante la producción, el transporte o el almacenamiento de GNL. El incremento en el número de buques metaneros plantea la necesidad de abordar

este riesgo y enfocarse en la seguridad mediante investigaciones y desarrollos tecnológicos para mejorar la detección y la mitigación de las fugas de metano.

Las rutas de transporte marítimo de GNL están diversificándose y la Ruta del Norte en la región Ártica se presenta como una opción prometedora. Sin embargo, esto genera inquietudes ambientales debido al impacto en los ecosistemas de la zona, a pesar de los esfuerzos por una operación sostenible. El tránsito de buques en esta región y la consiguiente infraestructura pueden tener un impacto considerable.

Las mejoras tecnológicas en los metaneros han llevado a buques más eficientes, seguros y con una mayor capacidad de transporte de GNL. Al mismo tiempo, la inversión en infraestructura se traduce en la construcción de nuevas instalaciones que permiten recibir, almacenar y distribuir el GNL de manera más eficiente y segura. Estos avances han generado oportunidades para acceder a mercados adicionales, volviendo el sector más accesible y rentable. Esto, a su vez, ha permitido a las empresas expandirse hacia nuevos destinos y llegar a consumidores que antes podrían haber estado fuera de su alcance debido a limitaciones tecnológicas o de infraestructura.

A pesar de las preocupaciones sobre la oferta futura de gas natural, la construcción de nuevos proyectos y terminales de GNL continúa en aumento, lo que indica una capacidad adecuada para satisfacer la creciente demanda de GNL a nivel global. El gas natural se está consolidando como una fuente de energía limpia y eficiente en un momento en el que la preocupación por la contaminación ambiental y la crisis energética está en aumento.

En el contexto del transporte de GNL, se observan diversas dinámicas y tendencias clave en el mercado internacional. A pesar de la abundancia de gas natural, su disponibilidad es desigual en diferentes regiones del mundo, lo que conduce a la importación en áreas con reservas limitadas. Esta dependencia se acentúa debido a que la mayoría del suministro global de GNL se concentra en un pequeño grupo de países, lo que puede generar vulnerabilidades.

Sin embargo, el transporte de GNL también ha enfrentado desafíos, como el aumento significativo en las tarifas de fletes marítimos debido a la alta demanda y la capacidad insuficiente de las instalaciones de regasificación. Para abordar esta creciente demanda,

se ha acelerado la construcción de nuevas terminales de regasificación, particularmente las flotantes. Además, se observa una tendencia hacia contratos de fletamento a largo plazo, indicando estabilidad en el transporte de GNL y la adaptación a las regulaciones ambientales. En definitiva, el GNL mantiene su posición como una fuente de energía clave en el panorama mundial, aunque se anticipa una transición hacia fuentes de energía más limpias en el futuro.

REFERENCIAS

- [1] L. C. Fernández, J. A. M. García, and (Colegio de Oficiales de la Marina Mercante), *Gases licuados. Operaciones, transporte y equipo*, Abril 1994. Madrid, 1994.
- [2] A. Fumagalli, “La dictadura de las finanzas y el mercado del gas,” *El viejo topo*, 2022. <https://www.elviejotopo.com/topoexpress/dictadura-de-las-finanzas-mercado-del-gas/>.
- [3] Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Ltd (SIGTTO), *Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals (LGHP4)*, Fourth Edi. Witherby Publishing Group Ltd, 2016.
- [4] Saggas, “Cadena del gas.” <https://www.saggas.com/es/la-planta/cadena-del-gas/>.
- [5] S. By and K. Partner, “2023 WORLD LNG REPORT,” 2023.
- [6] T. Huan, F. Hongjun, L. Wei, and Z. Guoqiang, “Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers,” in *Propulsion Systems*, A. Serpi and M. Porru, Eds. London: IntechOpen, 2019.
- [7] I. A. Fernández, M. R. Gómez, J. R. Gómez, and Á. B. Insua, “Review of propulsion systems on LNG carriers,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, no. September 2016, pp. 1395–1411, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.095.
- [8] L. N. G. Fundamentals, *LNG Fundamentals*. 2014.
- [9] Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Ltd (SIGTTO), *LNG Shipping Knowledge. Underpinning Knowledge to the SIGTTO Standards*, Second Edi. Witherby Publishing Group Ltd, 2011.
- [10] A. Meza, I. Ari, M. Al Sada, and M. Koç, “Disruption of maritime trade chokepoints and the global LNG trade: An agent-based modeling approach,” *Marit. Transp. Res.*, vol. 3, no. August, p. 100071, 2022, doi: 10.1016/j.martra.2022.100071.
- [11] Z. Raza and H. Schøyen, “The commercial potential for LNG shipping between

- Europe and Asia Via the Northern Sea Route,” *J. Marit. Res.*, vol. 11, no. 2, pp. 67–79, 2014.
- [12] F. Gaon, “¿Una alternativa al canal de Suez?,” Apr. 2021.
- [13] S. Wang and T. Notteboom, “The Adoption of Liquefied Natural Gas as a Ship Fuel : A Systematic Review of Perspectives and Challenges The Adoption of Liquefied Natural Gas as a Ship Fuel : A Systematic Review of Perspectives and Challenges,” *Transp. Rev.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–26, 2014, doi: 10.1080/01441647.2014.981884.
- [14] A. Lía, “El gas natural licuado y su impacto en la circulación de la energía . Análisis multiescalar,” *Rev. Transp. y Territ.*, vol. 11, pp. 5–32, 2014.
- [15] Puertos del Estado. Ministerio de Fomento. Gobierno de España, “Estudio sobre el suministro de gnl a buques mediante camión,” 2014.
- [16] K. Gore, P. Rigot-müller, and J. Coughlan, “Cost assessment of alternative fuels for maritime transportation in Ireland,” *Transp. Res. Part D*, vol. 110, no. July, p. 103416, 2022, doi: 10.1016/j.trd.2022.103416.
- [17] M. M. El-Gohary, “The future of natural gas as a fuel in marine gas turbine for LNG carriers,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, vol. 226, no. 4, pp. 371–377, 2012, doi: 10.1177/1475090212441444.
- [18] L. Normativa, “OMI 2020 : la reducción de azufre en combustibles marinos,” pp. 34–37, 2020.
- [19] O. M. I. (OMI), “Adoptadas más medidas de reducción de la emisiones de gases de efecto invernadero,” 2021.
[https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC76.aspx#:~:text=El Comité de protección del,emisiones de gases de efecto.](https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC76.aspx#:~:text=El%20Comit%C3%A9%20de%20protecci%C3%B3n%20del,emisiones%20de%20gases%20de%20efecto.)
- [20] C. de P. del M. M. (MEPC), *MEPC 76/15/Add.1 Anexo VI revisado del Convenio MARPOL*. 2021.
- [21] M. Tadros, M. Ventura, and C. Guedes Soares, “Review of current regulations, available technologies, and future trends in the green shipping industry,” 2023,

- doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114670.
- [22] Vessel Finder, "SEAGAS Bunkering Tanker."
<https://www.vesselfinder.com/es/ship-photos/299799>.
- [23] T. Iannaccone, G. Landucci, G. E. Scarponi, S. Bonvicini, and V. Cozzani, "Inherent safety assessment of alternative technologies for LNG ships bunkering," *Ocean Eng.*, vol. 185, no. May, pp. 100–114, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.05.028.
- [24] Naciones Unidas, "United Nations Framework Convention on Climate Change Paris Agreement," *Cop21*, vol. 21930, p. 18, 2015.
- [25] F. Zanobetti, G. Pio, S. Jafarzadeh, M. M. Ortiz, and V. Cozzani, "Inherent safety of clean fuels for maritime transport," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 174, no. December 2022, pp. 1044–1055, 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.05.018.
- [26] J. Weng, T. Han, K. Shi, and G. Li, "Impact analysis of ECA policies on ship trajectories and emissions," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 179, no. December 2021, p. 113687, 2022, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113687.
- [27] O. M. I. (OMI), "Reducción de las emisiones de GEI procedentes de los buques: trabajando hacia la revisión de la estrategia," 2022.
<https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC-78-.aspx>.
- [28] Gulf Petrochemicals & Chemicals Association (GPCA), "Assessing the IMO Sulfur Cap Regulation: Implications to 2020 and beyond," 2019.
<https://www.gpca.org.ae/2019/01/30/assessing-the-imo-sulfur-cap-regulation-implications-to-2020-and-beyond/>.
- [29] D. Testa, "A note on the potential designation of the mediterranean sea as a sulphur emission control area," *Mar. Policy*, vol. 121, no. October 1983, p. 104145, 2020, doi: 10.1016/j.marpol.2020.104145.
- [30] *RESOLUTION MSC.391(95) (adopted on 11 June 2015) ADOPTION OF THE INTERNATIONAL CODE OF SAFETY FOR SHIPS USING GASES OR OTHER LOW-FLASHPOINT FUELS (IGF CODE)*, vol. 391, no. June. 2015.

- [31] España, *Resolución de 21 de septiembre de 2016, de la Dirección General de la Marina Mercante, sobre obtención del certificado de suficiencia en formación básica y avanzada para capitanes, oficiales y marineros de buques que utilicen gases u otros combustibles de*. 2016, pp. 73092–73097.
- [32] I. E. Agency, “Gas Market Report, Q1-2023,” *Int. Energy Agency*, p. 61, 2023.
- [33] X. Nan, “State and predictions of the Gas and LNG Markets in 2023. What signposts to look out for?,” *Rystad Energy*, 2023.
<https://www.rystadenergy.com/insights/2023-state-and-predictions-of-the-gas-and-lng-markets>.

DEFINICIONES

Boil-off: evaporación natural de un líquido criogénico cuando se almacena o transporta a temperaturas extremadamente bajas. Puede deberse al calor ambiental y/o a la entrada de calor en el sistema.

Bunkering: proceso de suministrar combustible a buques y embarcaciones para su uso como fuente de energía. Se realiza típicamente en puertos o instalaciones específicas diseñadas para el almacenamiento y suministro de combustible. Puede ser esencial para permitir que los buques mantengan su operación mientras están en alta mar o durante su estancia en puerto.

Combustible fósil: recurso energético formado a lo largo de millones de años a partir de materia orgánica, como plantas y animales muertos, sometidos a presión y calor en la Tierra. Por ejemplo: petróleo crudo, gas natural y carbón. Se utilizan para generar energía y son una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero.

Criogénico: se refiere a temperaturas extremadamente bajas, típicamente por debajo de -150 grados Celsius. En el contexto de la tecnología y la ciencia se utiliza para describir sustancias o sistemas que se mantienen a temperaturas extremadamente frías, donde los gases pasan a estado líquido o incluso a sólido debido a la baja temperatura.

Crisis energética: se produce cuando hay un desequilibrio significativo entre la oferta y la demanda de energía, lo que puede llevar a una escasez o una disponibilidad limitada de fuentes de energía. Esto puede resultar en problemas como altos precios de la energía y dificultades para satisfacer las necesidades energéticas de una población o una economía.

Descarbonización: proceso de reducir o eliminar las emisiones de dióxido de carbono u otros gases de efecto invernadero de una actividad, proceso o sector, con el objetivo de combatir el cambio climático y reducir la huella de carbono. Esto implica la transición hacia fuentes de energía y tecnologías más limpias y sostenibles que produzcan menos o ninguna emisión de carbono.

Flete: pago realizado por el transporte de bienes o mercancías de un punto a otro, y también puede referirse al proceso de contratar y utilizar un medio de transporte para realizar dicho transporte.

Gas Natural Licuado: gas natural que ha sido enfriado a temperaturas muy bajas para convertirlo en líquido, lo que facilita su transporte y almacenamiento. Se utiliza en aplicaciones industriales de generación de energía y transporte.

Gases de efecto invernadero (GEI): sustancias presentes en la atmósfera que atrapan el calor del sol y contribuyen al calentamiento global al retener el calor en la Tierra. Su acumulación en la atmósfera es una causa principal del cambio climático.

Gasoducto: infraestructura de transporte que consiste en tuberías diseñadas para transportar gas natural u otros gases desde su fuente de producción hasta su destino, como centrales eléctricas, industrias u hogares.

Licuefacción: proceso de convertir una sustancia gaseosa en líquida mediante la reducción de su temperatura y/o aumento de la presión. Esto resulta en una mayor densidad y facilidad de manejo para su almacenamiento o transporte.

Poder calorífico: medida de la cantidad de energía térmica que puede generar un combustible o una sustancia cuando se quema o se somete a una reacción química. Es un indicador de la eficiencia energética de un combustible.

Regasificación: proceso de volver a convertir el GNL, que se encuentra en estado líquido, en gas natural para su uso. Se realiza calentando el GNL para que vuelva a su estado gaseoso antes de ser distribuido y utilizado en aplicaciones industriales, de generación de energía o calefacción.

Sloshing: movimiento oscilatorio o de balance de un líquido contenido en un tanque debido a la aceleración o fuerzas externas. es común en el transporte de líquidos y puede afectar a la estabilidad y al control del buque.

Unidad de Combustión de Gas (GCU): dispositivo utilizado para quemar gas, generalmente gas natural, de manera controlada para generar calor o energía. Estas unidades son esenciales para la utilización eficiente del gas como fuente de energía.

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

%: por ciento

°C: grados Celsius

°F: grados Fahrenheit

CH₄: metano

CO₂: dióxido de carbono

km: kilómetro

m³: metro cúbico

NO_x: óxidos de nitrógeno

SO₂: dióxido de azufre

SO_x: óxidos de azufre

Tm: tonelada métrica

BOG: Boil-Off Gas

CII: Carbon Intensity Indicator

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

DFDE: Dual Fuel Diesel Electric

ECA: Emission Control Area

EEXI: Energy Efficiency Existing ship Index

FSRU: Floating Storage Regasification Unit

GCU: Gas Combustion Unit

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GNL: Gas Natural Licuado

HFO: Heavy Fuel Oil

IGF Code: International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels

IGU: International Gas Union

LNG: Liquefied Natural Gas

MARPOL: Prevention of Pollution from Ships, Maritime Pollution (Convention)

MEPC: Marine Environment Protection Committee

OMI: Organización Marítima Internacional

SIGTTO: Society of International Gas Tanker and Terminal Operators

STCW: Standards of Training Certification and Watchkeeping

STS: Ship To Ship

TFDE: Triple Dual Fuel Diesel Electric

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.3.1. Comparación de los sistemas de contención. Elaboración propia.....	13
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1. Yacimiento de gas natural [2].	3
Figura 1.2.1. Cadena del gas [4].....	4
Figura 2.2.1. Flota de buques LNG según el tipo de propulsión [6].	9
Figura 2.3.1. A la izquierda tanque tipo Moss Rosenberg y a la derecha tanque de membrana [8][9].....	12
Figura 3.1.1. Principales puntos de estrangulamiento del tráfico marítimo [10].....	16
Figura 3.1.1.1. Ruta alternativa del Norte [12].....	18
Figura 4.1.1. Gabarra de GNL SEAGAS [22].	22
Figura 5.1.3.1. Actuales y posibles futuras zonas ECA [28].	25
Figura 6.1.1.1. Importaciones y exportaciones por regiones de 2015 a 2023 [32].....	29