

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
ENERGÉTICA SOSTENIBLE
TRABAJO FIN DE MÁSTER

***DESCARBONIZACION DEL TRÁFICO
MARÍTIMO: ESTUDIO COMPARATIVO DE
LAS DIFERENTES OPCIONES***



Estudiante: García López, Patricia

Director/Directora: Hueso Ordóñez, César

Curso: 2022 - 2023

Fecha: Bilbao, 20 de septiembre de 2023

RESUMEN

En este trabajo se llevará a cabo un análisis de los combustibles diésel, hidrógeno, amoníaco, metanol, óxido de uranio (UO_2) y gas natural licuado para el transporte marítimo. Consistirá en evaluar las emisiones producidas en la fase de producción de los combustibles y en la fase de operación del buque. También se llevará a cabo un análisis económico del valor de cada combustible y el volumen que ocuparía cada combustible en el buque. La industria marítima está buscando mejoras tecnológicas para proveerse de energía menos contaminante y neutra en emisiones de CO_2 . Los combustibles alternativos a los fósiles están siendo analizados por diferentes expertos. En este trabajo se compararán las ventajas y desventajas de cada combustible, teniendo en cuenta factores como la eficiencia energética, la disponibilidad, el costo y el impacto ambiental. Esto permitiría tomar decisiones sobre cómo avanzar en la descarbonización del transporte marítimo.

LABURPENA

Lan honetan diesel, hidrogeno, amoniako, metanol, uranio oxidoa (UO_2) eta itsas garraiorako gas natural likidotua aztertuko dira. Erregaiak ekoizteko fasean eta itsasontziaren eragiketa-fasean sortutako isuriak ebaluatzean datza. Era berean, erregai bakoitzaren balioaren eta erregai bakoitzak itsasontzian hartuko lukeen bolumenaren azterketa ekonomikoa egingo da. Itsas industria hobekuntza teknologikoak bilatzen ari da gutxiago kutsatzen duen energiaren eta emisioetan neutroa den energiaren hornitzeko CO_2 . Fosilen ordezkotako erregaiak aztertzen ari dira hainbat aditu. Lan honetan erregai bakoitzaren abantailak eta desabantailak alderatuko dira, energia-eraginkortasuna, erabilgarritasuna, kostua eta ingurumen-inpaktua bezalako faktoreak kontuan hartuta. Horrek itsas garraioaren deskarbonizazioan aurrera egiteko moduari buruzko erabakiak hartzea ahalbidetuko luke.

ABSTRACT

In this work, an analysis of diesel, hydrogen, ammonia, methanol, uranium oxide (UO_2) and liquefied natural gas fuels for maritime transport will be carried out. It will consist of evaluating the emissions produced in the fuel production phase and in the ship's operating phase. An economic analysis of the value of each fuel and the volume that each fuel would occupy on the ship will also be carried out. The maritime industry is looking for technological improvements to provide less polluting and CO_2 neutral energy. Alternative fuels to fossil fuels are being analyzed by different experts. In this work, the advantages and disadvantages of each fuel will be compared, considering factors such as energy efficiency, availability, cost, and environmental impact. This would allow decisions to be made on how to advance in the decarbonization of maritime transport.

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	12
2.	CONTEXTO	13
3.	OBJETIVOS Y ALCANCE	15
4.	BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	17
4.1	Contribución al conocimiento científico.....	17
4.2	Identificación de soluciones viables	18
4.3	Impulso a la sostenibilidad.....	18
5.	NORMATIVA DE EMISIONES OMI.....	20
6.	ESTÁNDARES DE EMISIÓN.....	22
7.	ALTERNATIVAS DE COMBUSTIBLES	24
7.1	Diésel	24
7.2	Hidrógeno	25
7.3	Amoniacó.....	28
7.4	Metanol	29
7.5	Uranio	31
7.6	Gas Natural Licuado	32
8.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	34
8.1	Cálculos.....	34
8.1.1.1	Diésel	36
8.1.1.2	Hidrógeno	36
8.1.1.3	Amoniacó.....	36
8.1.1.4	Metanol	37
8.1.1.5	Óxido de uranio (<i>UO2</i>)	37
8.1.1.6	Gas Natural Licuado (GNL)	38
8.2	Comparación resultados.....	39
9.	EMISIONES DE <i>CO2</i>	43
9.1	Diésel	44
9.2	Hidrógeno	47
9.3	Amoniacó.....	50
9.4	Metanol	52
9.5	Uranio	56
9.6	Gas Natural Licuado (GNL)	62
9.7	Comparación de resultados.....	64
10.	ANÁLISIS ECONÓMICO	66
10.1	Diésel:	66

10.2	Hidrógeno:	66
10.3	Amoniaco:.....	67
10.4	Metanol	68
10.5	<i>UO2</i>	68
10.6	GNL	69
10.7	Comparación de resultados	71
11.	ANÁLISIS TÉCNICO	73
12.	CONCLUSIONES	75
	REFERENCIAS.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características buque metanero Bilbao KNUTSEN	34
Tabla 2. Combustible diésel.....	36
Tabla 3. Combustible hidrógeno.....	36
Tabla 4. Combustible amoniaco.....	36
Tabla 5. Combustible metanol	37
Tabla 6. Combustible UO_2	37
Tabla 7. Combustible Gas Natural Licuado (GNL).....	38
Tabla 8. Comparativa masa-volumen combustibles	42
Tabla 9. Combustible diésel fase producción y operación.....	44
Tabla 10. Energía necesaria en la producción de 1 kg de H_2 a través de carbón y GN	48
Tabla 11. Emisiones de CO_2 en la producción de 1kW de electricidad a través de carbón	48
Tabla 12. Emisiones de CO_2 por cada 1000 kg de H_2 producido	48
Tabla 13. Emisiones de CO_2 fase producción y operación.....	48
Tabla 14. Combustible Amoniaco fase producción y operación	50
Tabla 15. Emisiones de CO_2 en fase de producción y operación de metanol a través de carbón, GN y biomasa.	53
Tabla 16. Producción anual y producción para 11 días para un reactor PWR de uranio.....	58
Tabla 17. Cantidad de CO_2 emitidas a la atmósfera en la producción de 1 kWh de electricidad, para cada fase de la vida del reactor nuclear. (32).....	59
Tabla 18. Emisiones de CO_2 para la producción de la potencia necesaria para realizar la travesía.	59
Tabla 19. Emisiones de CO_2 en la fase de operación del UO_2	60
Tabla 20. Emisiones de CO_2 en la fase de producción y operación con GNL	62
Tabla 21. Resultados de kg de CO_2 emitidos en la fase de producción de los combustibles.....	64
Tabla 22. Resultados de kg de CO_2 en la fase de operación de los combustibles.	65
Tabla 23. Precio total combustible diésel.	66
Tabla 24. Precio total hidrógeno	67
Tabla 25. Precio total combustible amoniaco.	67
Tabla 26. Coste total de combustible metanol.	68
Tabla 27. Coste total de UO_2	69
Tabla 28. Coste total GNL	70
Tabla 29. Comparación de precio total por combustible	71
Tabla 30. Comparación combustibles volumen-masa	73

Tabla 31. Comparación combustibles diésel, UO_2 , GNL volumen-masa	74
Tabla 32. Resumen comparativo de los diferentes combustibles	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Buque metanero Bilbao KNUTSEN.....	34
Ilustración 2. Gráfico comparativo de combustibles densidad (kg/L)	39
Ilustración 3. Gráfico comparativo de combustibles volumen (L)	40
Ilustración 4. Gráfico comparativo de combustibles masa (kg).....	41
Ilustración 5. Consumo anual de combustible de los buques en todo el mundo de 2019 a 2020, por tipo de combustible (21)	42
Ilustración 6. Gráfico comparativo kg diésel producidos y emisiones CO_2 en su fase de producción.....	44
Ilustración 7. Gráfico comparativo kg diésel emisiones CO_2 fase de operación.....	45
Ilustración 8. Gráfico comparativo emisiones de CO_2 en fase de producción y operación del diésel.	47
Ilustración 10. Gráfico emisiones de CO_2 fase de producción de hidrógeno a través de carbón.	49
Ilustración 11. Gráfico emisiones de CO_2 fase de producción de hidrógeno a través de GN	49
Ilustración 12. Gráfico comparativo de emisiones de CO_2 en la fase de producción a través de carbón y GN.....	50
Ilustración 9. Gráfico comparativo kg amoniaco producidos y emisiones de CO_2 fase de producción de amoniaco.	51
Ilustración 13. Gráfico comparativo kg de metanol producidos y emisiones de CO_2 en la fase de producción de metanol a través de carbón.	53
Ilustración 14. Gráfico comparativo kg de metanol producido y emisiones de CO_2 en la fase de producción de metanol a través de GN.	54
Ilustración 15. Gráfico comparativo kg de metanol producido y emisiones de CO_2 en la fase de producción de metanol a través de biomasa.....	54
Ilustración 16. Gráfico comparativo de emisiones de CO_2 en la producción de metanol a través de carbón, GN y biomasa.....	55
Ilustración 17. Primera parte del ciclo de combustible (30)	56
Ilustración 19. Gráfico de emisiones de CO_2 en la fase de producción de Uranio.....	60
Ilustración 20. Gráfico de emisiones de CO_2 en la fase de operación con uranio.....	61
Ilustración 21. Gráfico comparativo de emisiones de CO_2 en la fase de producción de uranio y operación.....	61
Ilustración 22. Gráfico de emisiones de CO_2 en la fase de producción de GNL.....	62
Ilustración 23. Gráfico de emisiones de CO_2 en la fase de operación con GNL.....	63

Ilustración 24. Gráfico emisiones de CO_2 en la etapa de producción y operación de GNL.....64

Ilustración 25. Evolución del Uranio precio por tonelada métrica 2023 (37).....69

ECUACIONES

Ecuación 1. Tiempo de travesía	35
Ecuación 2. Energía utilizada por cada combustible	35
Ecuación 3. Consumo de combustible	35
Ecuación 4. Volumen de combustible.....	35

1. INTRODUCCIÓN

El tráfico marítimo juega un papel fundamental en el comercio global y el transporte de mercancías, siendo responsable de una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. La creciente preocupación por el cambio climático y sus impactos devastadores ha impulsado a la comunidad internacional a tomar medidas decisivas para abordar el problema de las emisiones de carbono y promover la transición hacia una economía sostenible y descarbonizada.

En este contexto, la descarbonización del tráfico marítimo se ha convertido en un tema de gran relevancia y urgencia. La reducción de las emisiones contaminantes en esta industria es esencial para lograr los objetivos establecidos en los Acuerdos de París y para mantener el calentamiento global por debajo de los límites críticos.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio comparativo de las diferentes opciones disponibles para alcanzar la descarbonización del tráfico marítimo. Se analizarán y evaluarán detalladamente diversas alternativas de combustibles que permitan la reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a esta actividad.

Para llevar a cabo este análisis comparativo, se abordarán aspectos clave como la eficiencia energética de las distintas tecnologías, el costo económico y las implicaciones logísticas de su implementación, así como su potencial impacto en la salud ambiental y humana. Además, se considerarán los desafíos y oportunidades que cada opción plantea, así como los obstáculos que deben superarse para lograr una transición exitosa hacia una flota marítima más ecológica y sostenible.

El estudio también se centrará en los avances tecnológicos recientes, las iniciativas gubernamentales y las políticas internacionales que fomentan la adopción de soluciones más limpias y eficientes en el sector marítimo.

Este trabajo busca arrojar luz sobre las diferentes opciones disponibles para abordar el desafío de la descarbonización del tráfico marítimo. A través de un análisis comparativo exhaustivo, se espera proporcionar una visión integral y fundamentada que permita a los actores relevantes en la industria y en la toma de decisiones adoptar medidas informadas y efectivas hacia un transporte marítimo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. La descarbonización del tráfico marítimo no solo es un imperativo moral y

ambiental, sino también una oportunidad para forjar un futuro más próspero y responsable desde el punto de vista climático

2. CONTEXTO

En el siglo XXI, el transporte marítimo sigue siendo un componente vital del comercio mundial, permitiendo el movimiento de bienes y productos a través de los océanos del mundo. Sin embargo, esta industria también contribuye significativamente a la huella de carbono debido a su dependencia de combustibles fósiles altamente contaminantes. En vista del desafío cada vez mayor del cambio climático y la necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la descarbonización del transporte marítimo se ha convertido en una prioridad crítica para avanzar hacia un futuro más sostenible.

El objetivo principal de este trabajo es abordar el tema de la descarbonización del transporte marítimo mediante un estudio comparativo de las diferentes opciones disponibles. El objetivo principal es investigar a fondo y analizar exhaustivamente las diversas tecnologías y estrategias que podrían reducir significativamente las emisiones de carbono en la industria marítima. Este trabajo se llevará a cabo en el Centro Escuela de Ingeniería de Bilbao, una institución líder en educación e investigación en ingeniería y tecnología, proporcionando un ambiente ideal para el desarrollo de esta investigación innovadora.

El transporte marítimo ha sido una herramienta esencial para la humanidad desde tiempos antiguos. Los primeros medios de transporte marítimo se remontan a 3500 a. C., cuando se pudieron llevar cargas reducidas y pocos marineros a través de cortos trayectos costeros (1). Con el avance de la tecnología y el uso de nuevos materiales, las distancias recorridas por los barcos se hicieron cada vez mayores. Los vikingos, por ejemplo, construyeron barcos que podían navegar a través de ríos y mares, llegando desde la península escandinava hasta Inglaterra, el mar Mediterráneo y finalmente Norteamérica. (1)

Hoy en día, a pesar de los esfuerzos por reducir las emisiones, el transporte marítimo es responsable de alrededor del 14% de las emisiones contaminantes del sector logístico (2). El aumento del volumen de envíos de mercancías podría dificultar que la Unión Europea cumpla los objetivos del European Green Deal, (2) que establece que el bloque comunitario debe alcanzar la neutralidad climática en torno a 2050 para frenar el cambio climático y reforzar la sostenibilidad de la economía europea.

La Organización Marítima Internacional (OMI) ha adoptado medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los buques (3). Sin embargo, se prevé que estas emisiones aumenten entre un 50% y un 250% para el año 2050. Por lo tanto, es crucial poner en marcha una transición ágil e inmediata en el sector para alcanzar los objetivos de neutralidad climática (2).

3. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo una investigación exhaustiva y detallada que permita evaluar y comparar diversas opciones tecnológicas y estratégicas para la descarbonización del tráfico marítimo. A través de un análisis riguroso, buscamos proporcionar información clave y recomendaciones fundamentadas que permitan a la industria marítima y a los responsables de la toma de decisiones tomar medidas concretas hacia un transporte marítimo más limpio y sostenible. Los puntos específicos que perseguimos son los siguientes:

1. Evaluación de tecnologías emergentes:

Investigar y analizar las tecnologías emergentes en el ámbito de la propulsión marítima, como los sistemas de propulsión eléctrica, celdas de combustible, reactores nucleares, entre otras alternativas de vanguardia.

Comparar el rendimiento, la eficiencia, los costos y los impactos ambientales asociados con cada tecnología, identificando sus ventajas y limitaciones.

2. Análisis de combustibles alternativos:

Estudiar la viabilidad de diferentes combustibles alternativos, como el hidrógeno verde, amoníaco, gas natural licuado (GNL) y otros combustibles más sostenibles.

Evaluar los aspectos técnicos, económicos y logísticos relacionados con la implementación de estos combustibles en el transporte marítimo.

3. Impacto ambiental y regulaciones:

Analizar el impacto ambiental actual del transporte marítimo y proyectar las reducciones de emisiones alcanzables con la adopción de las tecnologías y estrategias estudiadas.

Examinar las regulaciones internacionales y locales que influyen en la descarbonización del tráfico marítimo y evaluar su efectividad en el cumplimiento de los objetivos ambientales.

4. Consideraciones económicas y de viabilidad:

Realizar un análisis económico detallado que incluya los costos de inversión, operación y mantenimiento asociados con cada opción de descarbonización.

Identificar posibles incentivos, barreras financieras y desafíos para la adopción generalizada de las tecnologías y prácticas más limpias.

5. Recomendaciones y conclusiones:

Sobre la base de los resultados obtenidos, ofrecer recomendaciones fundamentadas y realistas para la descarbonización del tráfico marítimo.

Resumir las principales conclusiones del estudio y destacar las opciones más prometedoras para lograr una transición exitosa hacia un transporte marítimo con bajas emisiones de carbono.

Con este trabajo, se pretende contribuir significativamente al avance de la investigación en el campo de la descarbonización del transporte marítimo y proporcionar información relevante para la industria, los reguladores y la sociedad en su conjunto. Asimismo, se busca fomentar la conciencia sobre la importancia de un transporte marítimo sostenible y la urgencia de actuar para reducir su huella de carbono.

4. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

El proyecto aporta distintos beneficios, los cuales se pueden destacar 3 grupos principales: contribución al conocimiento científico, identificación de soluciones viables e impulso a la sostenibilidad.

4.1 Contribución al conocimiento científico

El trabajo de fin de máster representa una valiosa contribución al conocimiento científico y tecnológico en el campo de la descarbonización del tráfico marítimo. Al abordar un tema de gran relevancia global y emergente, este estudio se convierte en un referente para la comunidad académica y la industria marítima en busca de soluciones sostenibles. La investigación exhaustiva y rigurosa llevada a cabo en este trabajo permite arrojar luz sobre aspectos cruciales que antes podían ser escasamente explorados o carecer de comparación detallada.

Al comparar diferentes opciones tecnológicas y estratégicas, el trabajo se convierte en una plataforma para generar nuevos datos y hallazgos que amplían la comprensión de cómo afrontar el desafío de la descarbonización en el transporte marítimo. La recopilación y análisis de información actualizada proporciona una visión integral de las fortalezas y debilidades de cada opción, lo que permite una evaluación objetiva y bien fundamentada de las medidas más adecuadas para lograr una transición exitosa hacia un transporte marítimo de bajas emisiones de carbono.

Asimismo, este estudio no solo se centra en aspectos tecnológicos, sino también en estrategias y enfoques que puedan complementar y potenciar las soluciones tecnológicas existentes. Esto es esencial para una visión holística de la descarbonización, ya que las decisiones futuras deben considerar la combinación de tecnologías y medidas para maximizar su efectividad y minimizar los posibles riesgos e impactos colaterales.

La metodología y el análisis riguroso aplicados en este trabajo también brindan un marco sólido y replicable para futuras investigaciones en el ámbito de la descarbonización del tráfico marítimo. Otros investigadores pueden utilizar este estudio como base para ampliar la investigación en áreas específicas o para adaptar el enfoque a diferentes contextos regionales o tipos de buques.

4.2 Identificación de soluciones viables

El análisis comparativo de opciones de descarbonización en el transporte marítimo no solo permite identificar las alternativas más viables y prometedoras, sino que también evalúa los desafíos y obstáculos potenciales en su implementación. Comprender las limitaciones y riesgos asociados con cada tecnología y estrategia es esencial para desarrollar planes de acción sólidos y evitar retrocesos en la transición hacia una industria marítima más sostenible.

El estudio abarca más allá de la eficiencia energética y las reducciones de emisiones, considerando también los impactos ambientales más amplios de cada opción, como la calidad del aire, la acidificación oceánica y la generación de residuos. Esta visión integral de las consecuencias potenciales de la descarbonización garantiza que las soluciones propuestas no solo mitiguen las emisiones de carbono, sino que también sean respetuosas con el medio ambiente en su conjunto.

4.3 Impulso a la sostenibilidad

El presente trabajo no solo promueve la adopción de prácticas más sostenibles en el transporte marítimo, sino que también destaca la importancia de la responsabilidad ambiental en toda la cadena de valor de la industria. Al resaltar las alternativas más limpias y eficientes, se incentiva a las empresas navieras y a los actores del sector a asumir un papel activo en la mitigación de su impacto ambiental y a contribuir a la protección de los ecosistemas marinos y la biodiversidad.

Además, al enfocarse en la descarbonización del transporte marítimo, este trabajo impulsa la alineación del sector con las metas y compromisos internacionales para combatir el cambio climático. La implementación de soluciones más sostenibles contribuiría no solo a la reducción global de las emisiones de carbono, sino también a fortalecer la posición de la industria en un mundo cada vez más enfocado en la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental.

En última instancia, el trabajo de fin de máster se convierte en un recurso valioso para inspirar y catalizar cambios positivos en la industria marítima, al ofrecer un enfoque integral para abordar los desafíos medioambientales y enfocarse hacia un futuro más

limpio y respetuoso con el entorno marino. Al aumentar la conciencia sobre la importancia de adoptar medidas sostenibles, se sientan las bases para una industria marítima más responsable y comprometida con la protección de los océanos y la conservación del planeta para las futuras generaciones.

5. NORMATIVA DE EMISIONES OMI

La Organización Marítima Internacional, como sus siglas indican OMI, es la encargada de velar por la seguridad de la navegación y la prevención de la contaminación del transporte marítimo. Se trata también de un organismo de Naciones Unidas.

Actualmente, según datos de la Conferencias de las Naciones Unidas sobre Comercio y Transporte (UNCTAD) (4) aproximadamente el 90% del comercio mundial se transporta por mar. Desde el 2008 la demanda del transporte marítimo mundial creció un 4,3 % con respecto al 2007.

La Organización Marítima Internacional (OMI) es una agencia especializada de las Naciones Unidas encargada de regular y supervisar el transporte marítimo a nivel global. Establecida en 1948, su objetivo principal es garantizar la seguridad, la eficiencia y la protección del medio ambiente marino en el ámbito de la navegación comercial.

En respuesta a los desafíos del cambio climático y la creciente preocupación por las emisiones de gases de efecto invernadero, la OMI ha establecido normativas para reducir las emisiones de CO_2 provenientes del transporte marítimo. El transporte por mar es una de las fuentes significativas de emisiones de CO_2 , y la OMI ha asumido la responsabilidad de abordar este problema y contribuir a la lucha contra el calentamiento global. (5)

El principal instrumento regulador de la OMI en este ámbito es el Anexo VI del Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL). El Anexo VI, que entró en vigor en 2005, establece límites máximos de emisiones de CO_2 para los buques y promueve la eficiencia energética en la industria marítima.

La normativa de emisiones de CO_2 de la OMI busca reducir el impacto ambiental del transporte marítimo mediante la adopción de medidas que mejoren la eficiencia de los buques y reduzcan las emisiones por unidad de carga transportada. Esto incluye la implementación de tecnologías más limpias y eficientes, la optimización de las rutas y la adopción de prácticas operativas más sostenibles.

La OMI también ha establecido una ambiciosa estrategia a largo plazo para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del transporte marítimo. Esta estrategia tiene como objetivo disminuir en al menos un 50% las emisiones de CO_2 para el año 2050 (6), en comparación con los niveles de 2008. Para lograr este objetivo, se buscará el desarrollo

y la adopción de combustibles más limpios y tecnologías de propulsión más sostenibles, como el uso de hidrógeno, amoniaco y otras fuentes de energía renovable.

6. ESTÁNDARES DE EMISIÓN

Los estándares de emisión según la OMI (Organización Marítima Internacional) están establecidos en el Anexo VI del Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL) (7), que regula la contaminación atmosférica proveniente de los buques y busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

Los principales estándares de emisión según el Anexo VI son los siguientes:

Óxidos de Azufre (SO_x):

El Anexo VI (8) establece límites máximos permitidos para las emisiones de óxidos de azufre provenientes de los gases de escape de los buques. Estos límites varían según la zona en la que opera el buque:

En áreas designadas como "Zonas de Control de Emisiones" (ZCE), como el Mar Báltico, el Mar del Norte, el Mar del Canal de la Mancha, el Mar del Caribe y el Golfo de México, los límites son más estrictos (0,10% de contenido de azufre en el combustible).

Fuera de las ZCE, los límites son menos rigurosos (0,50% de contenido de azufre en el combustible).

Óxidos de Nitrógeno (NO_x):

El Anexo VI (8) también establece límites para las emisiones de óxidos de nitrógeno, que varían según el tipo y la potencia del motor del buque. Los límites son más estrictos para los buques nuevos y se aplican tanto a motores diésel como a motores de gas.

Partículas en suspensión:

El Anexo VI (8) incluye estándares para la cantidad de partículas en suspensión que pueden ser emitidas por los buques, con el fin de reducir la contaminación atmosférica y proteger la calidad del aire.

Emisiones de CO_2 :

Aunque el Anexo VI (8) no establece un límite específico de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), la OMI ha desarrollado una estrategia a largo plazo para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte marítimo. Esta estrategia busca disminuir en al menos un 50% las emisiones de CO_2 para el año 2050, en comparación con los niveles de 2008, y promueve el desarrollo y la adopción de tecnologías más limpias y combustibles alternativos.

Estos estándares de emisión buscan promover la protección del medio ambiente marino y reducir la contribución del transporte marítimo al cambio climático y la contaminación atmosférica. La OMI sigue trabajando en la implementación y mejora de estas regulaciones para alcanzar sus objetivos de sostenibilidad y eficiencia en la industria marítima.

7. ALTERNATIVAS DE COMBUSTIBLES

7.1 Diésel

El diésel es un tipo de combustible utilizado principalmente en motores diésel, que son ampliamente empleados en vehículos, maquinaria y equipos industriales. Es un líquido derivado del petróleo y se obtiene a través de un proceso de destilación durante la refinación del crudo.

El diésel se compone principalmente de hidrocarburos, que son moléculas compuestas por átomos de carbono e hidrógeno. Tiene una densidad energética mayor que la gasolina, lo que significa que proporciona más energía por unidad de volumen, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren alta eficiencia y rendimiento, como vehículos pesados, camiones, autobuses y barcos.

En los motores diésel, el combustible es inyectado en la cámara de combustión, donde se mezcla con aire altamente comprimido y se enciende por la alta temperatura generada por la compresión. Esta combustión genera una fuerza que impulsa los pistones y convierte la energía térmica en movimiento, lo que permite el funcionamiento del motor.

Aunque el diésel ofrece mayor eficiencia y economía de combustible en comparación con la gasolina, su uso también ha sido objeto de preocupación debido a las emisiones de gases contaminantes, como óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas finas. Las regulaciones y estándares ambientales han impulsado el desarrollo de tecnologías más limpias y eficientes en los motores diésel, como filtros de partículas y sistemas de reducción de emisiones.

El diésel también es ampliamente utilizado en la propulsión del transporte marítimo. Los motores diésel marinos son una opción común para propulsar una variedad de embarcaciones, desde barcos de carga y petroleros hasta cruceros y buques de guerra. La elección del diésel como combustible se debe a su alta eficiencia y capacidad para proporcionar la potencia necesaria para mover grandes buques a través del agua.

Los motores diésel marinos funcionan de manera similar a los motores diésel terrestres, donde el combustible se inyecta en la cámara de combustión y se enciende por la alta compresión del aire. Esto genera la fuerza necesaria para hacer girar los ejes y propulsores del barco, impulsándolo hacia adelante.

Aunque los motores diésel marinos son eficientes en términos de consumo de combustible, también emiten contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas finas, lo que ha llevado a un aumento de la regulación y el desarrollo de tecnologías para reducir las emisiones.

En los últimos años, se ha explorado el uso de tecnologías más limpias y sostenibles en la propulsión del transporte marítimo, como la electrificación y el uso de combustibles alternativos, incluyendo el hidrógeno y los biocombustibles. Estos enfoques buscan mitigar el impacto ambiental del transporte marítimo y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes.

El transporte marítimo es una parte crucial de la economía global, y la búsqueda de soluciones más ecológicas y sostenibles en la propulsión es fundamental para enfrentar los desafíos ambientales y cumplir con los objetivos de reducción de emisiones en el futuro.

En el contexto del transporte marítimo, la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) se ha convertido en una prioridad para abordar el cambio climático y promover una navegación más sostenible. Si bien los motores diésel marinos son eficientes, su uso también conlleva altas emisiones de CO_2 , lo que ha impulsado la búsqueda de soluciones para mitigar este impacto ambiental.

Además, el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno verde o los biocombustibles en los motores diésel marinos ofrece una vía para reducir significativamente las emisiones de CO_2 . Estos combustibles renovables pueden utilizarse como reemplazo directo o como aditivos al diésel convencional para reducir las emisiones de carbono.

7.2 Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico más ligero y abundante en el universo. Su número atómico es 1, lo que significa que solo posee un protón y un electrón en su núcleo. Es un gas incoloro, inodoro y altamente inflamable. En condiciones estándar, se presenta como una molécula diatómica (H_2), donde dos átomos de hidrógeno se unen para formar una molécula estable.

El hidrógeno es esencial para numerosos procesos biológicos y es un componente fundamental del agua (H_2O). También se utiliza en la industria química para la

producción de amoníaco, metanol y otros compuestos. Además, tiene un papel crucial en la industria de la energía, ya que se puede emplear como combustible en diversas aplicaciones.

Una de las principales características del hidrógeno es su potencial como fuente de energía limpia y renovable. Cuando se quema o reacciona con oxígeno en una celda de combustible, produce energía y solo emite agua como subproducto, lo que lo convierte en una opción atractiva para reducir las emisiones de carbono y combatir el cambio climático (9).

El hidrógeno también es objeto de interés en el sector del transporte, ya que puede utilizarse para impulsar vehículos eléctricos de celda de combustible, proporcionando una alternativa a los vehículos que funcionan con combustibles fósiles y contribuyendo a una movilidad más sostenible.

Sin embargo, la producción de hidrógeno verde y su implementación a gran escala todavía enfrentan desafíos tecnológicos y económicos. A pesar de ello, la investigación y el desarrollo en torno al hidrógeno continúan en busca de soluciones que puedan llevar a una mayor adopción de esta prometedora fuente de energía limpia y renovable.

El hidrógeno también ha emergido como una opción prometedora para la propulsión del transporte marítimo. Su uso en esta área se centra en dos formas: el hidrógeno como combustible directo en motores de combustión interna y el hidrógeno en celdas de combustible.

En el primer enfoque, el hidrógeno puede utilizarse como combustible directo en motores de combustión interna adaptados para funcionar con este gas. Al quemarse en presencia de oxígeno, el hidrógeno genera energía mecánica que impulsa los propulsores del barco. Esta opción tiene el beneficio de ser aplicable a embarcaciones ya existentes, pero también presenta desafíos en términos de almacenamiento y suministro seguro de hidrógeno debido a su baja densidad energética y alta inflamabilidad.

El segundo enfoque, el uso de celdas de combustible de hidrógeno, es una tecnología más prometedora para la propulsión del transporte marítimo. En las celdas de combustible, el hidrógeno se combina con oxígeno para generar electricidad y agua como subproducto. Esta electricidad se utiliza para alimentar los motores eléctricos que impulsan el barco. La propulsión mediante celdas de combustible de hidrógeno ofrece beneficios significativos, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora de la eficiencia energética.

Aunque la propulsión de transporte marítimo basada en hidrógeno aún se encuentra en una etapa de desarrollo temprana, la industria está explorando activamente esta alternativa para cumplir con las regulaciones ambientales más estrictas y reducir la huella de carbono del transporte marítimo. No obstante, al igual que en otras áreas, enfrenta desafíos en términos de infraestructura de suministro de hidrógeno, tecnología de almacenamiento y costos de implementación. A medida que la tecnología avanza y las barreras se superan, el hidrógeno podría jugar un papel crucial en el logro de un transporte marítimo más limpio y sostenible en el futuro.

El uso del hidrógeno en la propulsión del transporte marítimo tiene el potencial de contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), un importante gas de efecto invernadero responsable del calentamiento global y el cambio climático.

Cuando se emplea hidrógeno como combustible en motores de combustión interna, la reacción con oxígeno produce energía mecánica sin generar emisiones de CO_2 . Esto permite que los buques impulsen sus propulsores sin liberar gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo que resulta en una drástica disminución de las emisiones de carbono en comparación con el uso de combustibles fósiles convencionales.

Por otro lado, la tecnología de celdas de combustible de hidrógeno utilizada en la propulsión marítima genera electricidad sin emisiones de CO_2 , ya que la única reacción involucrada es la combinación de hidrógeno con oxígeno para producir agua. Este enfoque es particularmente atractivo debido a su alta eficiencia y su capacidad para proporcionar una fuente de energía más limpia y sostenible para los buques, reduciendo significativamente su impacto ambiental.

La implementación exitosa de sistemas de propulsión de transporte marítimo basados en hidrógeno podría allanar el camino hacia una navegación marítima más ecológica y en línea con los objetivos globales de mitigación del cambio climático. Sin embargo, se deben superar desafíos técnicos y logísticos, como el desarrollo de una infraestructura adecuada para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno, así como la optimización de los sistemas para garantizar la seguridad y eficiencia operativa.

A pesar de los obstáculos, el hidrógeno se perfila como una solución prometedora para la propulsión del transporte marítimo y, junto con otras tecnologías y medidas, puede contribuir en gran medida a reducir las emisiones de CO_2 de esta importante industria y promover una navegación más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

7.3 Amoniaco

El amoniaco es un compuesto químico formado por un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de hidrógeno (H). Tiene una fórmula química NH_3 y es un gas incoloro y altamente soluble en agua. Es uno de los productos químicos más utilizados a nivel mundial debido a su amplia gama de aplicaciones industriales.

Una de las principales aplicaciones del amoniaco es en la industria de fertilizantes, donde se utiliza para producir compuestos nitrogenados esenciales para el crecimiento de las plantas. También se emplea en la industria química para la fabricación de productos como plásticos, explosivos, productos de limpieza y refrigerantes.

El amoniaco es altamente tóxico y corrosivo, por lo que se debe manipular con precaución y en condiciones seguras. Además, es una sustancia altamente inflamable y explosiva en ciertas concentraciones, por lo que su almacenamiento y transporte requieren medidas de seguridad estrictas.

El amoniaco ha ganado interés como un posible combustible verde en el contexto de la transición energética y la búsqueda de alternativas más sostenibles a los combustibles fósiles. Cuando se quema en presencia de oxígeno, el amoniaco libera solo vapor de agua y nitrógeno, sin emitir dióxido de carbono (CO_2) u otros gases de efecto invernadero. Sin embargo, su adopción como combustible en gran escala todavía enfrenta desafíos tecnológicos y logísticos.

En el ámbito de la propulsión del transporte marítimo, el amoniaco ha surgido como una opción prometedora como combustible alternativo y sostenible para los motores marinos. La investigación y el desarrollo se han centrado en el uso de amoniaco como una fuente de energía más limpia que pueda reemplazar los combustibles fósiles tradicionales, como el diésel y el fuel oil, y reducir las emisiones de gases contaminantes, incluidos los óxidos de azufre (SO_x) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), que contribuyen a la contaminación atmosférica y al cambio climático.

El amoniaco tiene un alto contenido de energía y puede utilizarse como combustible en motores de combustión interna y en celdas de combustible. Su combustión produce vapor de agua y nitrógeno como subproductos, sin emisiones de CO_2 cuando se produce a partir de fuentes renovables. Esto lo convierte en una opción atractiva para abordar los desafíos ambientales y cumplir con los estándares de emisiones más estrictos que rigen el transporte marítimo.

Sin embargo, la implementación exitosa del amoniaco como combustible en el transporte marítimo requiere superar desafíos importantes. La seguridad en el manejo, almacenamiento y transporte del amoniaco es esencial debido a su naturaleza tóxica y corrosiva. Además, se deben desarrollar motores marinos y sistemas de combustión adecuados para optimizar su eficiencia y minimizar las emisiones de contaminantes.

A medida que la industria marítima busca soluciones más limpias y sostenibles para la propulsión de buques, el amoniaco está ganando atención como un posible camino hacia un transporte marítimo más ecológico y respetuoso con el medio ambiente. La investigación y la colaboración entre la industria, los gobiernos y la academia son cruciales para llevar a cabo una transición exitosa hacia el uso del amoniaco y alcanzar una navegación marítima más sostenible en el futuro.

Esta transición hacia el uso de amoniaco como combustible también ayudaría a abordar otros problemas de contaminación atmosférica, como las emisiones de óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), que pueden tener impactos negativos en la calidad del aire y la salud humana.

A pesar de los beneficios potenciales, la adopción generalizada del amoniaco en el transporte marítimo enfrenta desafíos técnicos, económicos y logísticos. Se requiere una inversión significativa en investigación y desarrollo para optimizar los sistemas de propulsión de amoniaco y garantizar la seguridad en su manejo y almacenamiento.

Además, es fundamental establecer normativas y regulaciones claras que impulsen el uso responsable y seguro del amoniaco como combustible marino. La colaboración entre la industria, los gobiernos y las instituciones académicas es esencial para abordar estos desafíos y facilitar una transición exitosa hacia una navegación marítima más sostenible y con bajas emisiones de carbono.

7.4 Metanol

El metanol, conocido también como alcohol metílico y con la fórmula química CH_3OH , es un líquido incoloro, inflamable y altamente volátil. Se obtiene principalmente a partir de recursos naturales como el gas natural y la biomasa, aunque también se puede sintetizar mediante procesos químicos.

Este compuesto tiene una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales, siendo un componente crucial en la producción de productos químicos como plásticos, resinas y solventes. Además, se utiliza en la fabricación de productos farmacéuticos, productos de limpieza y cosméticos.

En el ámbito energético, el metanol ha despertado interés como combustible alternativo y sostenible, siendo empleado en motores de combustión interna, celdas de combustible y como fuente de hidrógeno en reacciones químicas. Su quema produce dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua, contribuyendo así a la reducción de emisiones de carbono en comparación con los combustibles fósiles convencionales.

No obstante, es importante destacar que el metanol es altamente tóxico, por lo que su manejo y almacenamiento requieren precaución y medidas de seguridad adecuadas. Los riesgos asociados a su uso deben ser considerados, especialmente en aplicaciones con mayor exposición a este compuesto.

En el transporte marítimo, el metanol ha ganado interés como combustible alternativo y más limpio. Se utiliza principalmente en motores de combustión interna marinos adaptados para funcionar con este combustible, lo que puede significar una reducción considerable en las emisiones de CO_2 y partículas en comparación con los combustibles fósiles convencionales como el diésel y el fuel oil.

Adicionalmente, se ha considerado el metanol como una opción para la producción de amoníaco, que podría utilizarse como combustible en motores marinos, evitando así emisiones directas de CO_2 durante la combustión.

Sin embargo, el metanol presenta desafíos. Su baja densidad energética implica que los buques necesitarían un mayor volumen de metanol para alcanzar la misma potencia, lo que podría afectar el diseño y la capacidad de carga de las embarcaciones. Además, se requiere una infraestructura adecuada para la producción, almacenamiento y distribución del metanol en puertos y rutas marítimas, así como una formación adecuada para los operadores de embarcaciones que lo empleen como combustible.

A pesar de los desafíos, el metanol representa una opción valiosa para impulsar la transición hacia una navegación marítima más sostenible y con menores emisiones de carbono. La colaboración entre la industria, los gobiernos y las instituciones académicas es esencial para superar los obstáculos y aprovechar al máximo el potencial del metanol en la propulsión del transporte marítimo.

7.5 Uranio

El Uranio es un elemento poco abundante en la naturaleza. Se trata de un elemento químico perteneciente a la serie de los actínidos cuyo número atómico es el 92 y su símbolo U. Es uno de los elementos más pesados que se encuentran de forma natural en la tierra.

En la naturaleza, el uranio se presenta en diversas formas isotópicas, siendo el U-238 el más común, seguido del U-235 y el U-234. El U-235 es el más relevante debido a su capacidad para sostener reacciones nucleares de fisión, lo que lo convierte en un componente esencial para la energía nuclear.

Además de su uso en la generación nuclear y aplicaciones médicas y científicas, el uranio ha sido objeto de investigación en el campo de la propulsión del transporte marítimo. Aunque no es muy comúnmente empleado en la propulsión convencional de barcos y buques, se han realizado estudios sobre el uso de reactores nucleares como fuente de energía para embarcaciones.

Uno de los ejemplos más notables de transporte marítimo propulsado por energía nuclear es el uso de portaviones nucleares en las fuerzas navales de ciertos países. Estos buques utilizan reactores nucleares para impulsar sus turbinas y propulsores, lo que les permite operar durante largos periodos sin necesidad de repostar combustible.

El uso de la propulsión nuclear en el transporte marítimo también plantea desafíos significativos, como el almacenamiento y manejo seguro del combustible nuclear y la gestión adecuada de los desechos radiactivos. Además, la seguridad y la prevención de posibles accidentes o incidentes son temas cruciales a tener en cuenta en la implementación de esta tecnología.

La investigación en el uso de la propulsión nuclear en el transporte marítimo también se ha relacionado con la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), un importante gas efecto invernadero que contribuye al calentamiento global y al cambio climático. Al utilizar reactores nucleares como fuente de energía, se eliminaría la quema de combustibles fósiles, que es una de las principales causas de las emisiones de CO_2 en la industria del transporte marítimo.

Los buques propulsados por energía nuclear tendrían la capacidad de operar con una menor huella de carbono, lo que podría ayudar a mitigar el impacto del transporte marítimo en el medioambiente. Al evitar la liberación de grandes cantidades de CO_2 , se reduciría

significativamente la contribución del transporte marítimo a la acumulación de gases efecto invernadero en la atmósfera. Además, la reducción de las emisiones de CO_2 en el transporte marítimo podría contribuir a los esfuerzos globales para abordar el cambio climático y cumplir con los objetivos establecidos en acuerdos internacionales, como el Acuerdo de París.

No obstante, como se mencionó anteriormente, el uso de la propulsión nuclear en el transporte marítimo presenta desafíos importantes y requeriría una planificación cuidadosa y un enfoque riguroso en materia de seguridad y gestión de desechos nucleares. La comunidad internacional sigue explorando diferentes opciones para lograr una navegación marítima más sostenible y amigable con el medio ambiente, y la propulsión nuclear representa una de las vías potenciales para alcanzar este objetivo.

7.6 Gas Natural Licuado

El Gas Natural Licuado (GNL) es una forma de gas natural que se enfría a temperaturas extremadamente bajas, alrededor de -162 grados Celsius (-260 grados Fahrenheit), para convertirlo en un líquido más denso y fácil de transportar y almacenar. Este proceso de licuefacción reduce el volumen del gas natural en aproximadamente 600 veces, lo que lo hace altamente compacto y adecuado para su transporte en buques metaneros y su almacenamiento en tanques criogénicos en tierra. El GNL es una fuente de energía versátil y limpia que se utiliza en una variedad de aplicaciones, incluyendo la generación de electricidad, el suministro de gas natural a zonas remotas y, cada vez más, como combustible en el transporte marítimo y terrestre debido a sus ventajas ambientales y económicas.

El Gas Natural Licuado (GNL) en las últimas décadas ha sido una alternativa en el transporte marítimo. A medida que la industria busca reducir su huella de carbono y cumplir con regulaciones más estrictas sobre las emisiones, el GNL se ha convertido en una solución atractiva debido a sus ventajas ambientales y económicas.

Las principales ventajas del GNL en el transporte marítimo incluyen la reducción de emisiones, ya que produce significativamente menos emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes locales, como óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas, en comparación con los combustibles fósiles convencionales. Esto permite a las

embarcaciones cumplir con los estándares de emisiones más estrictos y contribuir a la lucha contra el cambio climático.

El GNL es altamente eficiente en términos de consumo de energía y puede proporcionar un rendimiento superior en términos de propulsión, lo que significa un menor consumo de combustible y, por lo tanto, una reducción de costos operativos a largo plazo. Además, el GNL es ampliamente accesible en muchas regiones del mundo y cuenta con una sólida infraestructura de suministro y regasificación, y su almacenamiento y manejo son seguros.

Dadas las regulaciones cada vez más estrictas sobre las emisiones en la industria marítima, el GNL permite a las embarcaciones cumplir con los estándares actuales y futuros de emisiones de manera más efectiva.

En conclusión, el Gas Natural Licuado (GNL) ha transformado el panorama del transporte marítimo al proporcionar una alternativa más limpia y eficiente a los combustibles fósiles tradicionales. A medida que la industria continúa evolucionando para reducir su impacto ambiental, se espera que el GNL desempeñe un papel crucial en la transición hacia un transporte marítimo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

8. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

8.1 Cálculos

Para realizar un estudio de la viabilidad de un determinado combustible se ha llevado a cabo la siguiente metodología. En primer lugar, se elegirá un buque metanero, Bilbao Knutsen.



Ilustración 1. Buque metanero Bilbao KNUTSEN

Modelo	Eslora [m]	Manga [m]	Calado [m]	DWT [t]	GRT [t]	Velocidad [knots]	Potencia [MW]	Desplazamiento estándar [t]
Bilbao Knutsen	284,4	42,5	11,4	77237	90835	19,5	28	93450

Tabla 1. Características buque metanero Bilbao KNUTSEN

Eslora: longitud del buque, frecuentemente medida en pies (10).

Manga: es la mayor anchura de un buque.

Calado: es la distancia vertical entre un punto de la línea de flotación y la línea base o quilla, incluido el espesor del casco.

DWT (Deadweight tonnage): Es la medida para determinar la capacidad de carga sin riesgo de una embarcación, cuyo valor se expresa en toneladas (11).

GRT (Gross Register Tonnage): Es una medida del volumen interno total de un barco, donde una “tonelada” se define como 100 pies cúbicos (2.83 m³). Se utiliza para determinar las tasas portuarias y otras funciones (11).

Desplazamiento estándar (t): se trata del peso total del buque, incluyendo, equipos, tripulación y mercancía.

Para calcular la cantidad de combustible necesaria para la propulsión del buque metanero Knutsen durante una travesía de 9260 km a una velocidad media de 36,1 km/h, primero debemos tener en cuenta la eficiencia energética de cada tipo de combustible. Supondremos que los motores tienen una eficiencia de aproximadamente entre 40% y 50% en algunos casos dependiendo del tipo de combustible. Además, necesitamos considerar la densidad energética de cada combustible para calcular el consumo en términos de volumen o masa. (12)

Datos:

Distancia de la travesía	5000	nm	9260	km
Velocidad	19,5	nudos	36,1	km/h
Desplazamiento estándar	93450	t		
Potencia	28000	kW		

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{Distancia de travesía}}{\text{velocidad}} = \frac{9260}{36,1} = 256,41 \text{ horas} = 11 \text{ días}$$

Ecuación 1. Tiempo de travesía

$$\text{Energía (kWh)} = \text{Potencia (kW)} * \text{rendimiento (\%)} * \text{tiempo (horas)}$$

Ecuación 2. Energía utilizada por cada combustible

$$\text{Consumo de combustible} = \frac{\text{Energía (kg)}}{\text{Poder calorífico} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}\right)}$$

Ecuación 3. Consumo de combustible

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Consumo de combustible (kg)}}{\text{Densidad} \left(\frac{\text{kg}}{\text{L}}\right)}$$

Ecuación 4. Volumen de combustible

8.1.1.1 Diésel

<u>Cálculo Diésel</u>	
Poder calorífico (kWh/kg)	12,1 (13)
Rendimiento	35%
Densidad (kg/L)	0,885 (14)
Horas	256,41
Días	11
Energía (kJ)	9046155600
Consumo combustible (kg)	207671,12
Volumen (L)	234656,6

Tabla 2. Combustible diésel

8.1.1.2 Hidrógeno

<u>Cálculo Hidrógeno</u>	
Rendimiento	40%
PCS (kWh/kg)	39,4 (17)
PCI (kWh/kg)	33 (17)
Densidad (kg/L)	0,0899 (17)
Horas	256,41
Días	11
Energía (kJ)	1,03e+10
Consumo combustible (kg)	86153,85
Volumen (L)	958329,8

Tabla 3. Combustible hidrógeno

8.1.1.3 Amoniaco

<u>Cálculo Amoniaco</u>	
Poder calorífico (kWh/kg)	6,25 (15)
Rendimiento	37,5%
Densidad (kg/L)	0,73 (16)
Horas	256,41
Días	11
Energía (kJ)	9692308800
Consumo combustible (kg)	430769,23
Volumen (L)	558715,0

Tabla 4. Combustible amoniaco

8.1.1.4 Metanol

<u>Cálculo Metanol</u>	
Rendimiento	50%
PCS (kWh/kg)	6,3
PCI (kWh/kg)	5,5
Densidad (kg/L)	0,7918 (18)
Horas	256,41
Días	11
Energía (kJ)	1,29e+10
Consumo combustible (kg)	649400,85
Volumen (L)	820157,7

Tabla 5. Combustible metanol

8.1.1.5 Óxido de uranio (UO_2)

<u>Cálculo Uranio</u>	
Producción anual media PWR (kWh)	8500000000
Combustible necesario kg UO_2	30000
Producción para 11 días de travesía PWR (kWh)	7179487,2
Energía (kJ)	25846153846
kJ/kg combustible quemado	4000000000
Cantidad de combustible quemado necesaria (kg)	6,46

Tabla 6. Combustible UO_2

8.1.1.6 Gas Natural Licuado (GNL)

<u>Cálculo GNL</u>	
Rendimiento	47,5%
PCS (kWh/kg)	13,6 (19)
PCI (kWh/kg)	12,28 (19)
Densidad (kg/L)	0,45 (20)
Horas	256,41
Días	11
Energía (kJ)	12276923076
Consumo combustible (kg)	261322,33
Volumen (L)	580716,29

Tabla 7. Combustible Gas Natural Licuado (GNL)

8.2 Comparación resultados

Una vez realizados los cálculos de las cantidades de combustibles necesarios para llevar a cabo la travesía marítima, los que se han obtenido en el apartado anterior, se obtienen resultados clave que se representan en diversos gráficos. Estos gráficos muestran las densidades, volúmenes y masas de los diferentes combustibles que serán requeridos durante el trayecto, proporcionando información para la planificación y gestión del transporte marítimo.

En primer lugar, el gráfico de densidades permite comparar las densidades de los diferentes combustibles utilizados en la navegación marítima. La densidad es una propiedad física importante, ya que indica la masa de un volumen específico de combustible. Al visualizar estas densidades en un gráfico, se puede determinar cuáles son los combustibles más pesados y cuáles son los más ligeros. Esto es fundamental para seleccionar el tipo de combustible más adecuado para las necesidades específicas de la travesía y garantizar una distribución eficiente y segura en el buque.

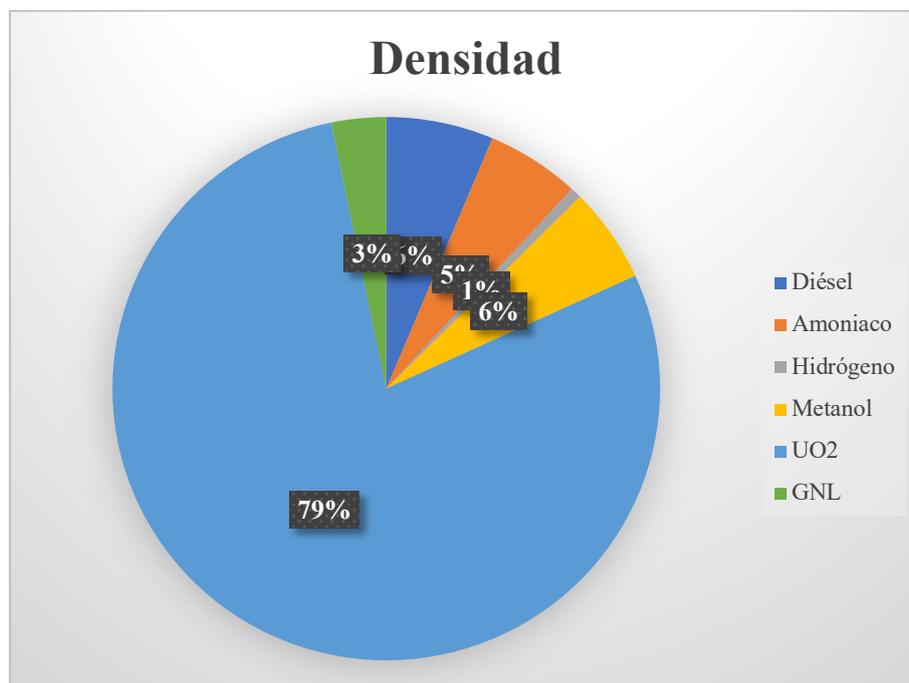


Ilustración 2. Gráfico comparativo de combustibles densidad (kg/L)

El gráfico de volúmenes, por otro lado, proporciona una representación visual de la cantidad de espacio que ocupará cada tipo de combustible en el barco. Al conocer los

volúmenes requeridos, los planificadores pueden estimar cuánto espacio se necesita para almacenar los combustibles a bordo. Esto es particularmente importante para embarcaciones con limitaciones de espacio, ya que permite una organización óptima del cargamento y evita problemas de almacenamiento excesivo o insuficiente.

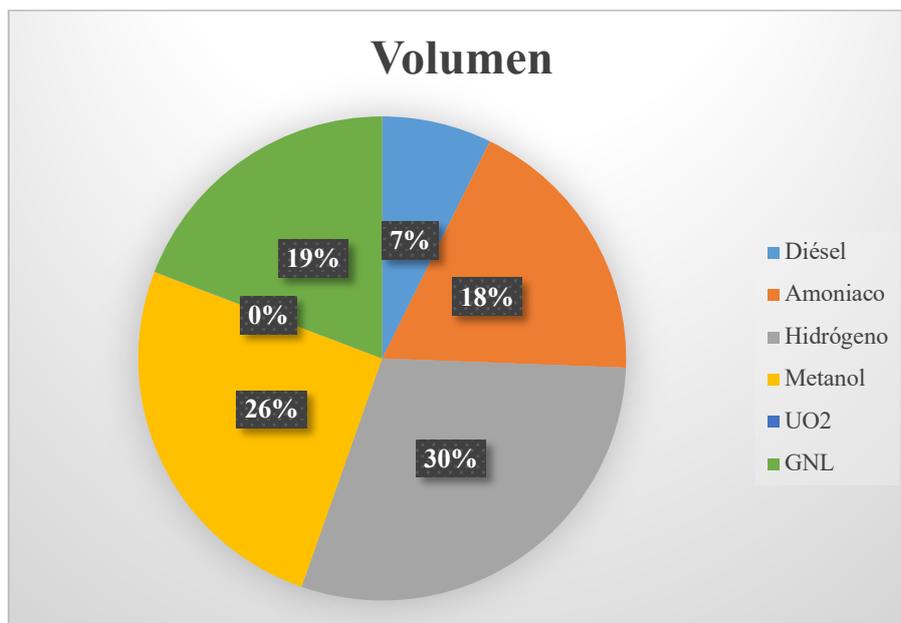


Ilustración 3. Gráfico comparativo de combustibles volumen (L)

Además, el gráfico de masas muestra las cantidades de combustibles en términos de su masa total. Conocer las masas de los distintos combustibles es fundamental para determinar la carga total del barco y garantizar que se cumplan los límites de carga y estabilidad. Asimismo, esto ayuda a asegurar que el buque esté en cumplimiento con las regulaciones de peso y seguridad marítima.

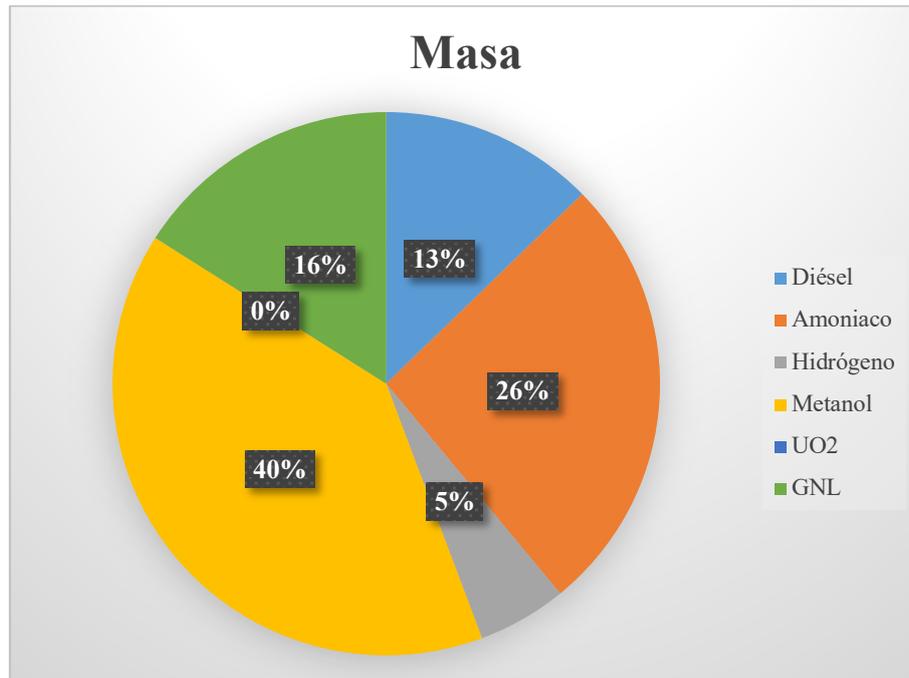


Ilustración 4. Gráfico comparativo de combustibles masa (kg)

La elección del combustible para el transporte marítimo depende de varios factores, como el volumen y la masa del combustible, así como su impacto en el medio ambiente y su costo. En 2020, hubo un cambio en el uso de combustibles pesados a combustibles ligeros para alimentar los barcos (21). En ese año, se consumieron alrededor de 65,5 millones de toneladas métricas de combustible ligero (21)

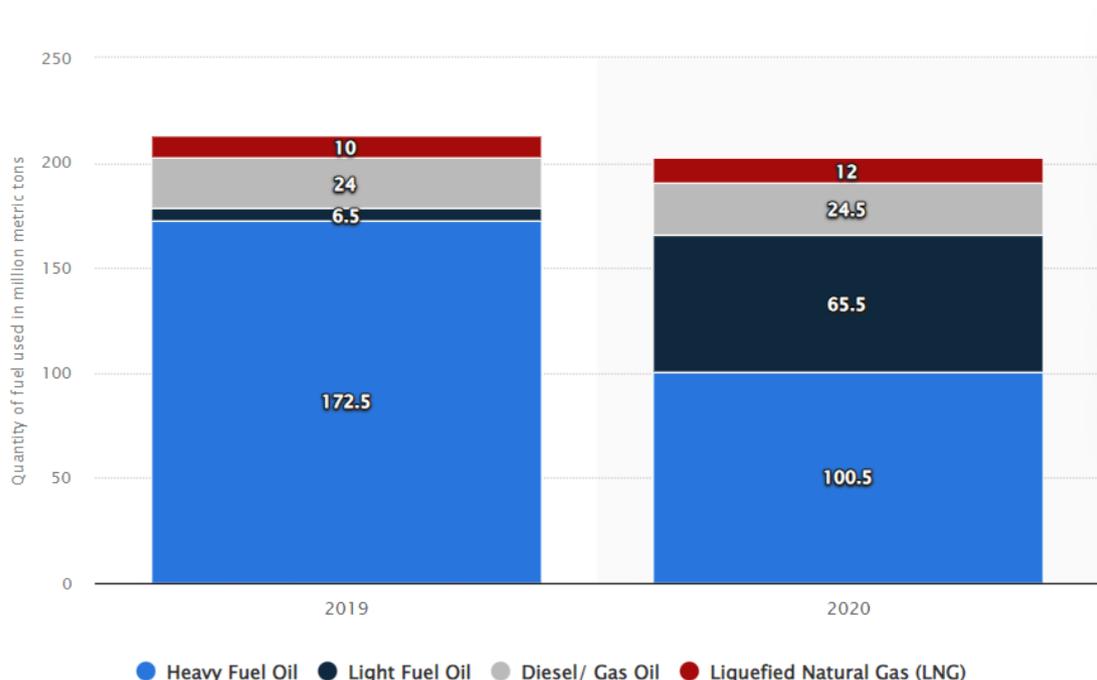


Ilustración 5. Consumo anual de combustible de los buques en todo el mundo de 2019 a 2020, por tipo de combustible (21)

Cada combustible tiene sus propias ventajas e inconvenientes. Por ejemplo, el diésel es un combustible comúnmente utilizado en el transporte marítimo debido a su alta densidad energética y su disponibilidad. Sin embargo, también produce emisiones contaminantes. El hidrógeno es una opción más limpia ya que no produce emisiones contaminantes cuando se quema, pero su almacenamiento y transporte pueden ser más difíciles debido a su baja densidad. El amoníaco es otro combustible limpio que se está considerando para el transporte marítimo, pero todavía hay desafíos en cuanto a su producción y almacenamiento.

Combustible	Volumen (L)	Masa (kg)
Diésel	234656,6	207671,1
Hidrógeno	958329,8	86153,8
Amoniaco	558715	430769,2
Metanol	820157,7	649400,9
UO_2	0,6	6,46
GNL	580716,3	261322,3

Tabla 8. Comparativa masa-volumen combustibles

En la Tabla 8. Comparativa masa-volumen combustibles se ha querido representar con ayuda de colores las mejores y peores opciones con los primeros cálculos obtenidos en cuanto a volumen y masa de cada uno de los combustibles. Observando la tabla, los valores en color rojo son los menores, por lo que la mejor opción en cuanto a menor volumen y masa sería el UO_2 , siguiéndole el combustible diésel.

En resumen, la elección del combustible para el transporte marítimo depende de varios factores y debe ser evaluada cuidadosamente teniendo en cuenta tanto el impacto ambiental como el costo y la viabilidad técnica. A continuación, se analizarán en los siguientes apartados las emisiones de CO_2 que se emiten a la atmósfera en la fase de producción de cada uno de los combustibles como también en la fase de operación del buque con cada combustible.

9. EMISIONES DE CO_2

En este apartado tendrá lugar el análisis de las emisiones de CO_2 a la atmósfera tanto en la fase de producción del combustible como en la fase de operación del buque con cada combustible.

En primer lugar, hemos realizado cálculos exhaustivos para determinar la cantidad de combustible necesaria para recorrer la travesía del buque Knutsen. Con base en los datos recopilados y los parámetros específicos del buque y la ruta, hemos obtenido la cantidad precisa de cada combustible requerida para el viaje, como se ha visto en los apartados anteriores.

Una vez obtenida la cantidad necesaria, se ha procedido a calcular las emisiones de CO_2 que se generan en la fase de producción de este combustible. La producción de determinados combustibles, como pueden ser los combustibles fósiles implica una serie de procesos, desde la extracción y refinación de petróleo hasta su distribución final, cada uno de los cuales contribuye a las emisiones de carbono. Para obtener una evaluación completa, se ha tenido en cuenta factores como el consumo de energía, las emisiones asociadas con el transporte y el procesamiento, así como las emisiones indirectas de la cadena de suministro.

Posteriormente, se ha abordado el análisis de las emisiones de CO_2 en la fase de operación del buque durante toda su travesía. Esto implica considerar el consumo de combustible en los motores del buque para impulsar los propulsores y mantener su navegación a lo largo de la ruta planificada. Con la información recopilada y los cálculos realizados, se ha obtenido una visión integral de las emisiones de CO_2 asociadas con el transporte marítimo. Estos datos son fundamentales para identificar oportunidades de mejora, establecer objetivos de reducción de emisiones y diseñar estrategias para transitar hacia una navegación más sostenible y amigable con el medio ambiente. A través de este análisis, se busca contribuir al conocimiento y las acciones dirigidas a la descarbonización del transporte marítimo, en línea con los esfuerzos globales para enfrentar el cambio climático y construir un futuro más limpio y sostenible.

9.1 Diésel

Diésel	207671,12	kg	Producción (extracción materias primas, transporte, refinado) (kg CO_2 /kg diésel)	Operación (kg CO_2 /L diésel)	kg CO_2 producción	kg CO_2 operación
	234656,63	L	2,85 (22)	2,68 (23)	591862,7	628879,8

Tabla 9. Combustible diésel fase producción y operación

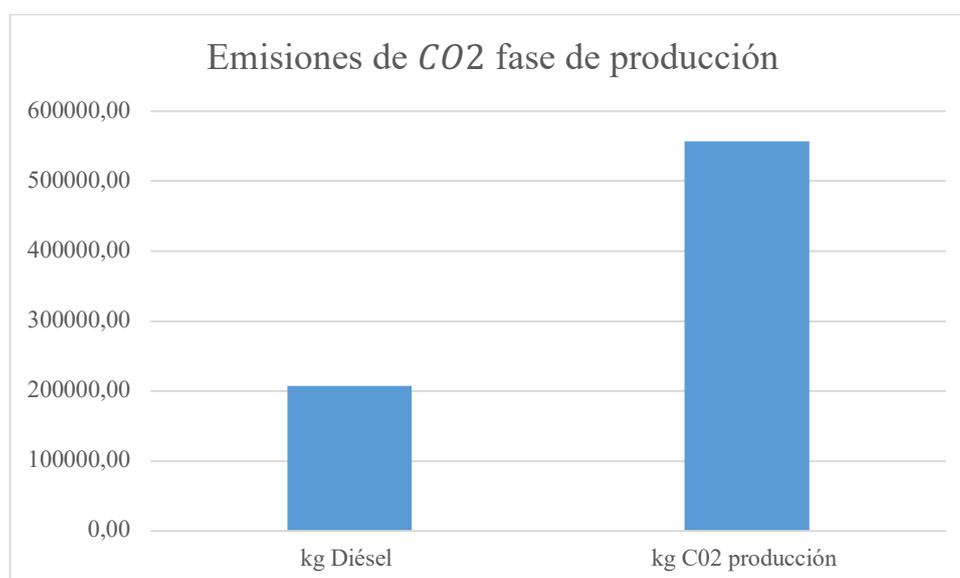


Ilustración 6. Gráfico comparativo kg diésel producidos y emisiones CO_2 en su fase de producción.

La cantidad de dióxido de carbono (CO_2) emitida durante la producción de diésel puede variar dependiendo de la fuente del petróleo crudo y las tecnologías empleadas en el proceso de refinación. También es importante tener en cuenta las emisiones relacionadas con la extracción, transporte y procesamiento del petróleo crudo antes de su refinación. Las estimaciones de las emisiones específicas de CO_2 para la producción de un kilogramo de diésel pueden variar según las metodologías y datos utilizados en diferentes estudios y fuentes. Sin embargo, una estimación comúnmente citada es que la producción de un kilogramo de diésel puede emitir aproximadamente entre 2,5 y 3,2 kilogramos de CO_2 (22).

Estas emisiones son conocidas como emisiones indirectas, ya que no se refieren a las emisiones que ocurren cuando el diésel se quema en un motor, sino a las liberadas durante su producción y cadena de suministro. Las emisiones directas de CO_2 ocurren cuando el diésel se quema para generar energía en un motor o en otras aplicaciones.

Es importante destacar que las emisiones de CO_2 pueden variar según la región y las prácticas específicas utilizadas en la producción de diésel. Además, las tecnologías y prácticas de refinación están en constante evolución, lo que puede influir en las emisiones asociadas con la producción de diésel en el futuro.

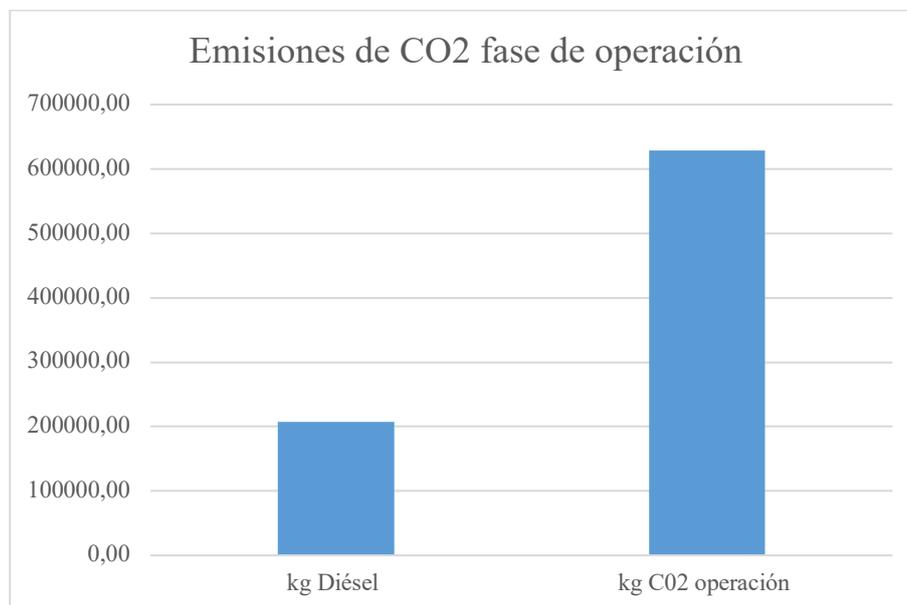


Ilustración 7. Gráfico comparativo kg diésel emisiones CO_2 fase de operación.

La cantidad de dióxido de carbono (CO_2) emitida durante la combustión del combustible diésel está directamente relacionada con la cantidad de carbono presente en el

combustible. Cuando el diésel se quema en motores de combustión interna, la reacción química libera dióxido de carbono como uno de los productos principales.

Hay varios factores que pueden afectar la cantidad de CO_2 emitida por la quema de combustible diésel, incluyendo:

Contenido de carbono en el diésel: La cantidad de CO_2 emitida está directamente relacionada con la cantidad de carbono presente en el combustible diésel. El diésel es principalmente una mezcla de hidrocarburos, y la cantidad de carbono puede variar según el grado de diésel y las regulaciones de emisiones locales.

Eficiencia de combustión: La eficiencia con la que el diésel se quema en el motor también puede afectar las emisiones de CO_2 . Un mejor diseño y funcionamiento del motor pueden resultar en una combustión más completa, lo que reduciría las emisiones de CO_2 por unidad de energía producida.

Calidad del combustible: La calidad del diésel utilizado puede tener un impacto en las emisiones de CO_2 . Los combustibles diésel de mayor calidad, que cumplen con estándares de emisiones más estrictos, tienden a producir menos CO_2 durante la combustión.

Como referencia general, la combustión completa del diésel, que es un hidrocarburo de cadena larga, produce aproximadamente 2.63 kilogramos de CO_2 (23) por cada litro de diésel quemado. Esta es una estimación promedio que puede variar ligeramente dependiendo de los factores mencionados anteriormente.

Además del CO_2 , la combustión del diésel también puede liberar otros contaminantes atmosféricos, como óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas finas (PM), que tienen un impacto en la calidad del aire y el medio ambiente. Por lo tanto, es esencial continuar buscando tecnologías más limpias y sostenibles para reducir las emisiones de CO_2 y otros contaminantes durante la combustión de combustibles fósiles.

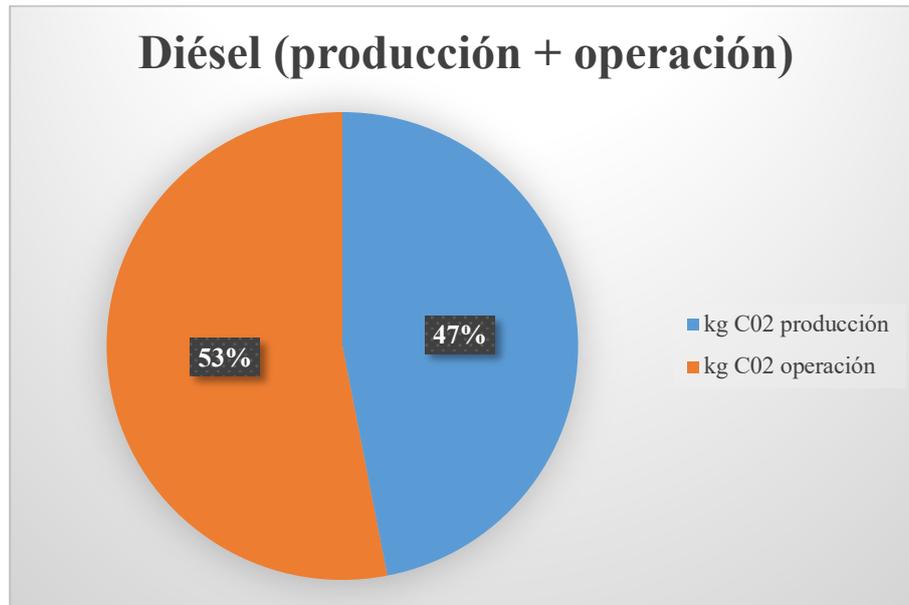


Ilustración 8. Gráfico comparativo emisiones de CO₂ en fase de producción y operación del diésel.

Observando

Ilustración 8. Gráfico comparativo emisiones de CO₂ en fase de producción y operación del diésel. La fase de producción de combustible diésel contribuye con un 47% significativamente a las emisiones de CO₂ debido a la extracción, refinación y transporte del petróleo crudo. Esto es particularmente relevante si el diésel se produce a partir de fuentes no renovables y procesos intensivos en carbono. La fase de operación en un buque metanero también emite CO₂, un 53%.

9.2 Hidrógeno

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la fase de producción de hidrógeno se deben principalmente al proceso de obtención del hidrógeno a partir de diversas fuentes de energía. El hidrógeno se puede producir mediante diferentes métodos, y cada uno de ellos tiene implicaciones diferentes en términos de emisiones de CO₂:

Hidrógeno a partir de combustibles fósiles: Una de las formas más comunes de producir hidrógeno es a través del reformado de gas natural o metano. En este proceso, se utiliza gas natural y vapor de agua para producir hidrógeno y monóxido de carbono (CO) a través de una reacción química. Luego, el CO se convierte en CO₂ en un proceso conocido como

"shift" o cambio. Así, la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles libera CO_2 a la atmósfera como subproducto, lo que contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero.

Hidrógeno a partir de la **electrólisis del agua**: Esta técnica implica el uso de electricidad para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. Si la electricidad proviene de fuentes renovables como la solar, eólica o hidroeléctrica, entonces la producción de hidrógeno será libre de emisiones de CO_2 . Sin embargo, si la electricidad utilizada proviene de fuentes basadas en combustibles fósiles, entonces habrá emisiones de CO_2 asociadas con la producción de hidrógeno.

Para ello, en este trabajo se han estudiado las emisiones que se producen en la fase de producción de hidrógeno mediante electrólisis con el aparte de energía eléctrica producida a través de los combustibles fósiles, carbón y gas natural (GN):

	kW	kg H_2
Carbón	52,5 (26)	1
GN	35 (26)	1

Tabla 10. Energía necesaria en la producción de 1 kg de H_2 a través de carbón y GN

	kW	kg CO_2
Carbón	1 (26)	1

Tabla 11. Emisiones de CO_2 en la producción de 1kW de electricidad a través de carbón

	kg H_2	kg CO_2
GN	1000 (27)	10500 (27)

Tabla 12. Emisiones de CO_2 por cada 1000 kg de H_2 producido

Hidrógeno			Producción (extracción materias primas, transporte, refinado) (kg CO_2/kg Carbón o GN)	kg CO_2 producción	kg CO_2 operación
86153,85	kg	Carbón	4523076,9 (28)	4523076,9	-
		GN	904615,3846 (28)	904615,4	-

Tabla 13. Emisiones de CO_2 fase producción y operación

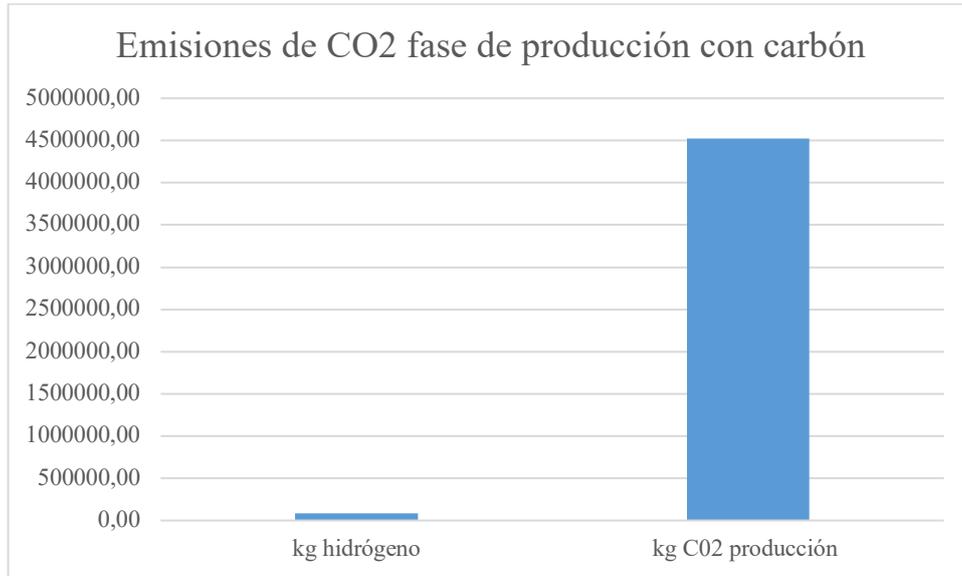


Ilustración 9. Gráfico emisiones de CO₂ fase de producción de hidrógeno a través de carbón.

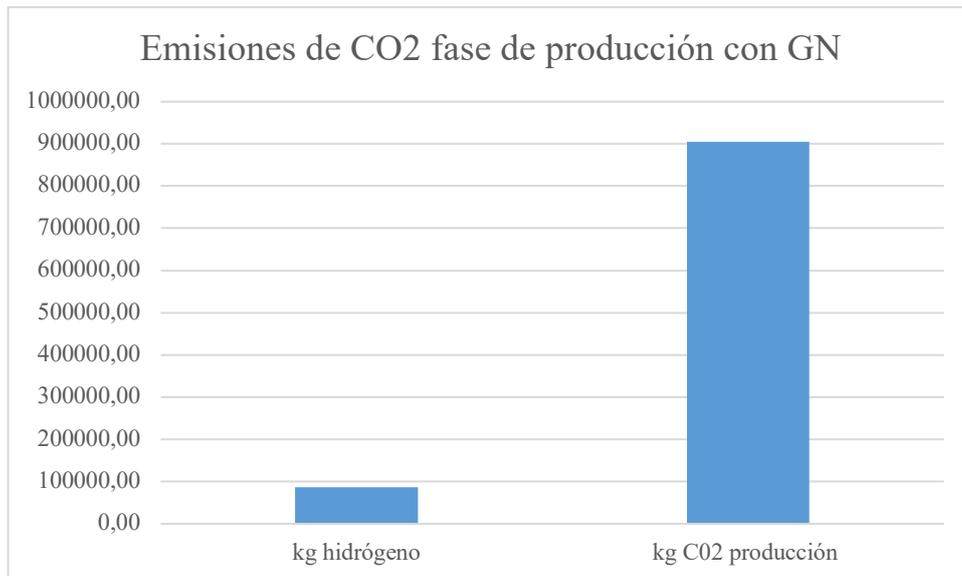


Ilustración 10. Gráfico emisiones de CO₂ fase de producción de hidrógeno a través de GN

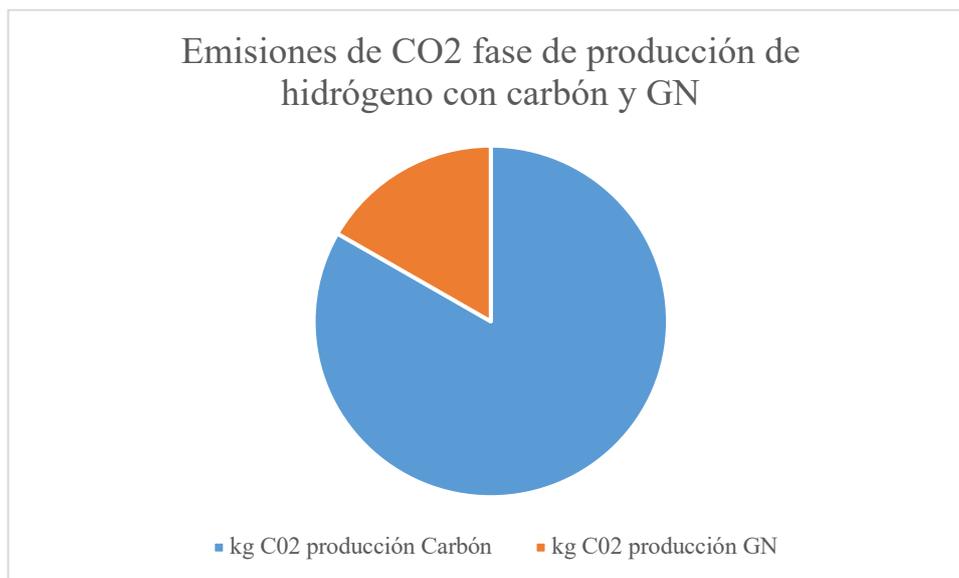


Ilustración 11. Gráfico comparativo de emisiones de CO₂ en la fase de producción a través de carbón y GN

En cuanto a la fase de operación con celdas de combustible de hidrógeno en el transporte marítimo, estas celdas utilizan el hidrógeno como combustible para generar electricidad y propulsar el buque. Durante la operación de estas celdas, la reacción de combustión del hidrógeno con el oxígeno del aire produce energía eléctrica y vapor de agua. La reacción química de la celda de combustible no genera emisiones directas de CO₂, ya que su único subproducto es vapor de agua.

9.3 Amoniaco

Amoniaco			<i>Producción (extracción materias primas, transporte, refinado) (kg CO₂/kg Amoniaco)</i>	<i>kg CO₂ producción</i>	<i>kg CO₂ operación</i>
	430769,23	kg	2000 (24)	861538461,5	-

Tabla 14. Combustible Amoniaco fase producción y operación

Durante la producción de amoníaco, se producen emisiones de dióxido de carbono (CO₂) debido al proceso de fabricación del amoníaco a partir de sus materias primas, como el gas natural, el metano y el agua. El nitrógeno (N₂) y el hidrógeno (H₂) se combinan en

una reacción química conocida como “proceso Haber-Bosch” (25) para producir amoníaco (NH_3). Para obtener las cantidades necesarias de nitrógeno e hidrógeno, se utilizan diversas fuentes de materias primas que se someten a un proceso de descomposición o reformado. La combinación del hidrógeno y el nitrógeno en condiciones de alta temperatura y presión es el paso más crucial y energéticamente intensivo en la síntesis de amoníaco. Esta reacción química es exotérmica y requiere una gran cantidad de energía para mantener la temperatura y presión adecuadas. La energía necesaria para este proceso proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles, como el gas natural o el carbón, lo que libera grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera y contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la producción de amoníaco también puede generar emisiones indirectas de CO_2 debido a la energía requerida para la extracción, transporte de materias primas, fabricación y mantenimiento de equipos industriales, y otros aspectos logísticos asociados.

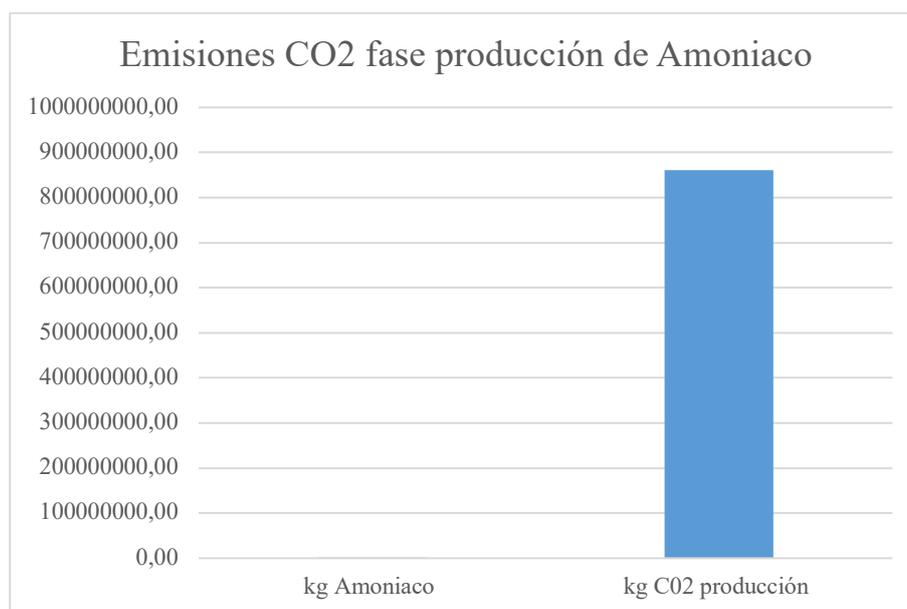


Ilustración 12. Gráfico comparativo kg amoníaco producidos y emisiones de CO_2 fase de producción de amoníaco.

En la fase de operación con celdas de combustible de amoníaco en el transporte marítimo, las emisiones de CO_2 pueden ocurrir debido a limitaciones tecnológicas y prácticas asociadas con el uso de esta tecnología. Aunque el amoníaco no emite CO_2 durante su combustión en estas celdas, su producción puede requerir el uso de combustibles fósiles

que generan emisiones de CO_2 . También puede haber ineficiencias en la operación de las celdas, lo que podría resultar en la liberación de pequeñas cantidades de CO_2 durante el proceso de conversión del amoníaco en electricidad y calor. Además, el manejo y almacenamiento seguro del amoníaco pueden representar desafíos logísticos, con posibles fugas o pérdidas que podrían generar emisiones de CO_2 .

Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a pesar de estas limitaciones, el uso de celdas de combustible de amoníaco sigue siendo una opción más limpia y con menor huella de carbono en comparación con los combustibles fósiles convencionales, como el diésel o el fuel oil. Con avances tecnológicos y prácticas mejoradas, se espera que estas emisiones de CO_2 asociadas con la fase de operación con celdas de combustible de amoníaco se reduzcan significativamente, impulsando así una navegación marítima más sostenible y respetuosa con el medio ambiente. La búsqueda de soluciones y tecnologías para reducir el impacto ambiental de la producción de amoníaco y el uso de celdas de combustible es esencial para lograr la descarbonización del transporte marítimo.

9.4 Metanol

Las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en la fase de producción de metanol se deben principalmente al proceso de obtención del metanol a partir de sus materias primas. El metanol, también conocido como alcohol metílico, se produce a través de diversas rutas, siendo una de las más comunes la síntesis a partir del gas natural. A continuación, se explica cómo se generan las emisiones de CO_2 en ambas fases:

- **Fase de producción** de metanol:

La producción de metanol **a partir de combustibles fósiles** como el gas natural, el petróleo y el carbón es la fuente dominante de metanol industrial (29). A partir de 2020, la mayoría del metanol (~95%) se produce mediante la reforma con vapor de gas natural y otros hidrocarburos ligeros, la oxidación parcial de hidrocarburos más pesados y la gasificación del carbón (29). Otros métodos de producción de metanol incluyen la gasificación de biomasa y la pirólisis del metano. La pirólisis del metano y la electrólisis del agua pueden utilizar cualquier fuente de electricidad, incluida la energía renovable (29).

La **reforma con vapor de metano (SMR)** produce metanol a partir de gas natural, principalmente metano (CH_4), y agua. Es la fuente más barata de metanol industrial,

siendo la fuente de casi el 50% del metanol mundial¹. El proceso consiste en calentar el gas a 700-1,100 °C (1,300-2,000 °F) en presencia de vapor sobre un catalizador de níquel. La reacción endotérmica resultante forma monóxido de carbono y hidrógeno molecular (H_2). En la reacción de cambio agua-gas, el monóxido de carbono reacciona con el vapor para obtener mayores cantidades de H_2 . El WGSR también requiere un catalizador, típicamente sobre óxido de hierro u otros óxidos. El subproducto es CO_2 . Dependiendo de la calidad del material de partida (gas natural, nafta, etc.), una tonelada de metanol producido también producirá 9 a 12 toneladas de CO_2 , un gas de efecto invernadero que puede ser capturado (29).

Metanol			Producción (extracción materias primas, transporte, refinado) (kg CO_2 /kg Carbón, GN o Biomasa)	kg CO_2 producción	Operación
649400,85	kg	Carbón	4	2597603,4	-
		GN	1,65	1071511,4	-
		Biomasa	2	1298801,7	-

Tabla 15. Emisiones de CO_2 en fase de producción y operación de metanol a través de carbón, GN y biomasa.

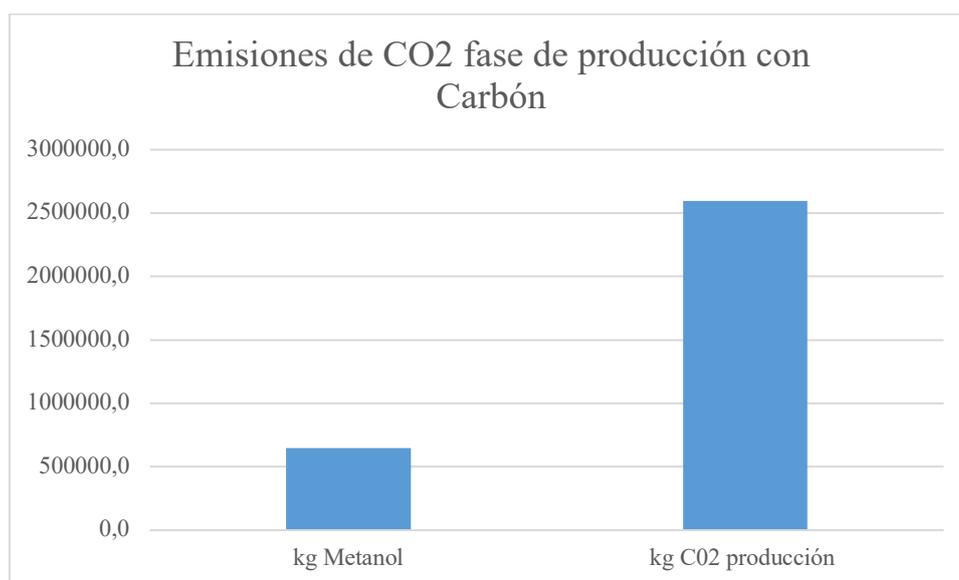


Ilustración 13. Gráfico comparativo kg de metanol producidos y emisiones de CO_2 en la fase de producción de metanol a través de carbón.

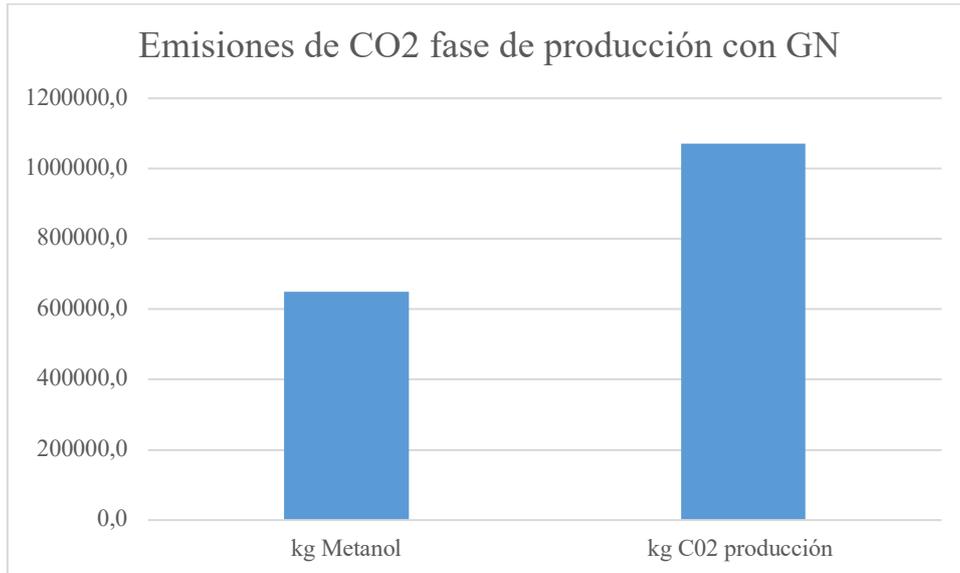


Ilustración 14. Gráfico comparativo kg de metanol producido y emisiones de CO₂ en la fase de producción de metanol a través de GN.

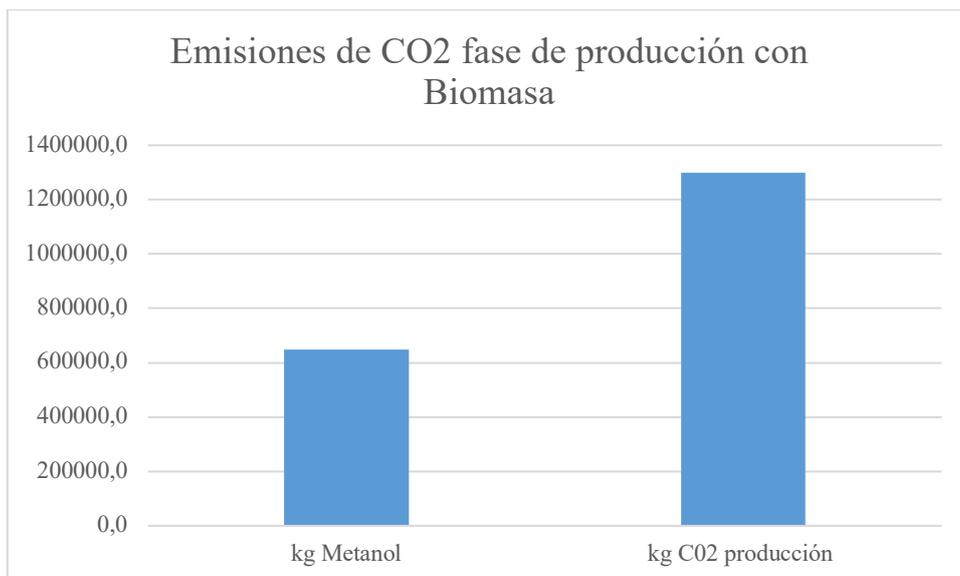


Ilustración 15. Gráfico comparativo kg de metanol producido y emisiones de CO₂ en la fase de producción de metanol a través de biomasa.

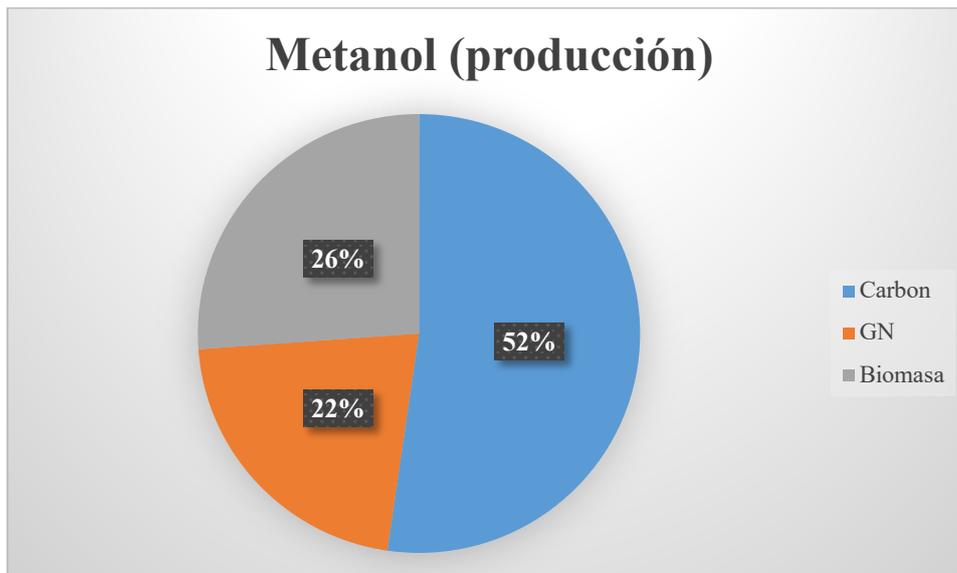


Ilustración 16. Gráfico comparativo de emisiones de CO_2 en la producción de metanol a través de carbón, GN y biomasa

Como resultado, la elección de la materia prima para la producción de metanol tiene un impacto directo en las emisiones de CO_2 asociadas con el proceso. La producción a partir de biomasa y gas natural tiende a ser más sostenible y respetuosa con el medio ambiente, con emisiones de CO_2 relativamente bajas en comparación con la producción a partir de carbón. Esto resalta la importancia de considerar las fuentes de materias primas en la toma de decisiones para reducir las emisiones de CO_2 en la producción de metanol y avanzar hacia prácticas más sostenibles en la industria química.

- **Fase de operación** con celdas de combustible de metanol en el transporte marítimo:

Las celdas de combustible de metanol utilizan metanol como combustible para generar electricidad y propulsar el buque. Durante la operación de estas celdas, el metanol se oxida en un proceso electroquímico para producir CO_2 , agua y electricidad. La reacción química de la celda de combustible de metanol genera emisiones directas de CO_2 , ya que el carbono presente en el metanol se convierte en CO_2 durante el proceso de oxidación.

Es importante destacar que el metanol se considera un portador de energía, similar al hidrógeno, y la elección de utilizarlo como combustible depende de la disponibilidad de fuentes de metanol y de la tecnología empleada en el buque, por lo tanto, para la fase de operación, se ha considerado que las emisiones de CO_2 producidas son 0.

9.5 Uranio

Las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en la fase de producción de UO_2 (dióxido de uranio) y en la fase de operación con un reactor PWR (Reactor de Agua a Presión) en el transporte marítimo están asociadas principalmente a la cadena de suministro y a la generación de energía nuclear. A continuación, se explica cómo se generan las emisiones de CO_2 en ambas fases:

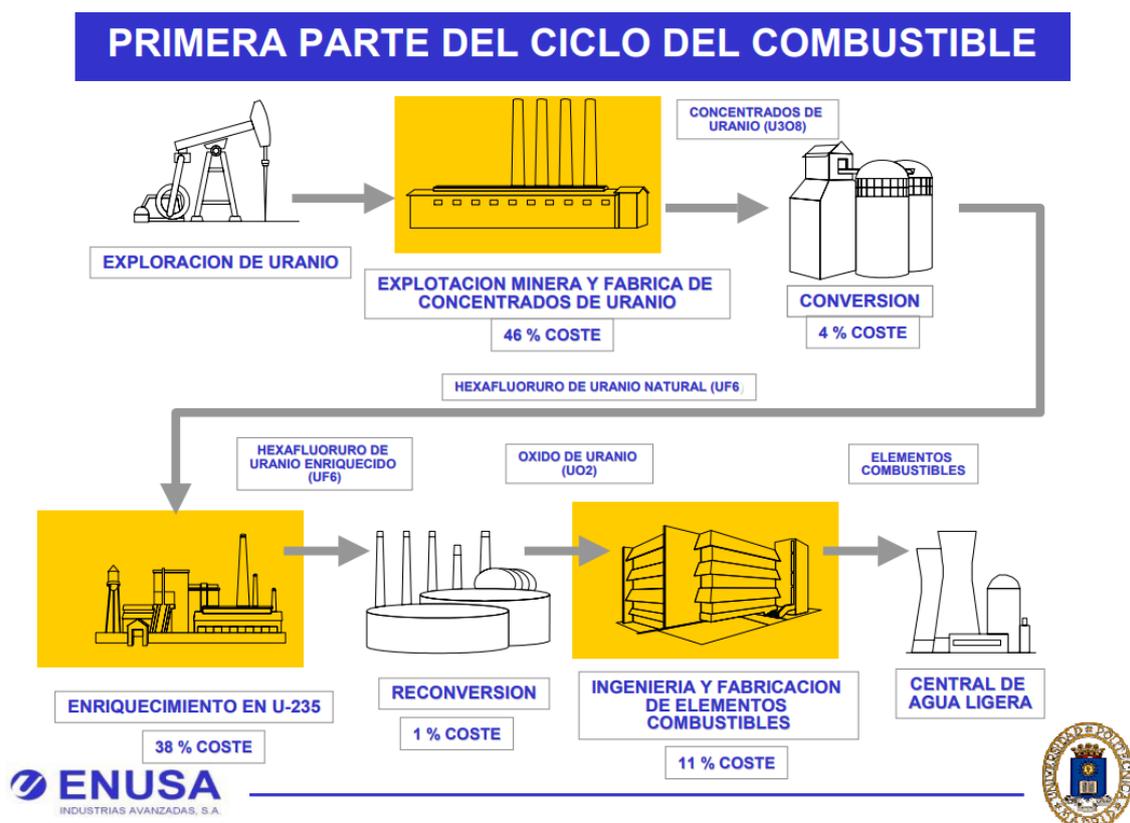


Ilustración 17. Primera parte del ciclo de combustible (30)

Fase de producción de UO_2 :

Etapa 1 de exploración y extracción mediante el proceso de lixiviación "in situ", en superficie o bajo tierra, destinada a obtener el uranio presente en la naturaleza. Este elemento es sometido a procesos que reducen su tamaño a partículas uniformes, seguido de la acción de la molienda que da lugar a un polvo seco compuesto de uranio natural. Este producto, conocido como "yellow cake" o "torta amarilla", es comercializado en el mercado del uranio bajo la forma U_3O_8 .

Extracción y procesamiento del uranio: La producción de UO_2 comienza con la extracción y procesamiento del uranio de yacimientos de mineral. Estas operaciones suelen requerir maquinaria y equipos que funcionan con combustibles fósiles, como diésel o gasolina, para realizar tareas de perforación, transporte y trituración del mineral. Estas actividades pueden generar emisiones de CO_2 durante el consumo de combustibles.

Etapas 2: Inicio de la Transformación (U_3O_8 a UF_6). En este paso, se ejecuta la primera fase de cambio, donde el concentrado de uranio, U_3O_8 , debe sufrir una conversión hacia el hexafluoruro de uranio, UF_6 . Esta forma del uranio se encuentra en estado gaseoso y se requiere mayormente por las instalaciones de enriquecimiento de uranio. Es un requisito crucial para preparar el uranio destinado a ser empleado como combustible nuclear.

Etapas 3: Proceso de Enriquecimiento. La concentración natural del isótopo fisionable U-235 (que representa un 0,71% en el uranio natural) es insuficiente para respaldar una reacción nuclear constante en los reactores de agua ligera. Por lo tanto, el UF_6 en su forma natural debe ser sometido a un proceso de enriquecimiento isotópico. Esto implica aumentar la proporción del isótopo U-235 para lograr su utilidad como material combustible en el ámbito nuclear. El grado de enriquecimiento varía según el reactor, pero para reactores de agua ligera, típicamente se enriquece hasta alrededor del 5% de U-235. Sin embargo, también se necesita uranio enriquecido con niveles más bajos de concentración. Para este proceso de enriquecimiento, se emplean métodos como la difusión gaseosa o la centrifugación del gas.

Etapas 4: Siguiendo Transformación (UF_6 a UO_2). Con el propósito de emplearlo como combustible en reactores nucleares, el UF_6 enriquecido se transforma en una forma en polvo conocida como dióxido de uranio (UO_2). Este polvo es comprimido en pequeñas pastillas cerámicas cilíndricas de alrededor de 1 cm de diámetro y 1 cm de altura. Estas pastillas exhiben propiedades estables a temperaturas elevadas, ya que están destinadas a soportar las condiciones internas del reactor nuclear.

Etapas 5: Elaboración de Componentes para la Generación de Energía. Esta fase se lleva a cabo exclusivamente en España, específicamente en la planta de producción de componentes para la generación de energía de ENUSA Industrias Avanzadas, ubicada en Juzbado (Salamanca). Esta etapa comprende:

Producción de Varillas de Combustible: Estas varillas constituyen la primera línea de defensa en una central nuclear. En su interior, se colocan las pastillas de uranio y se brinda espacio para la acumulación de los subproductos de fisión que se liberan durante el proceso de quemado del combustible.

Componente Combustible: Una vez que las varillas de combustible han sido elaboradas, se ensamblan en estructuras especiales que forman los componentes de generación de energía. La función principal de estos elementos es mantener las varillas a una distancia adecuada entre sí, permitiendo que el refrigerante circule y absorba el calor generado en el proceso.

En nuestro caso para realizar la travesía con nuestro buque, necesitaremos 6,46 kg UO_2 como indica en la tabla siguiente:

Producción anual media PWR	8500000000	kWh	30000	kg UO_2
Combustible quemado	4000000000	kJ/kg		
Producción para 11 días de travesía PWR	7179487,2	kWh	6,46	kg UO_2

Tabla 16. Producción anual y producción para 11 días para un reactor PWR de uranio.

En cuanto a la emisión de CO_2 a la atmósfera, basándonos en la tabla siguiente:

Fase	Cantidad de CO_2 emitido (gramos)	Porcentaje respecto el total (%)
Fabricación del combustible	25,09	38
Construcción del reactor	8,20	12
Funcionamiento	11,58	17
Tratamiento del combustible gastado	9,20	15
Desmantelamiento	12,01	18
Total	66,08	

Tabla 17. Cantidad de CO_2 emitidas a la atmósfera en la producción de 1 kWh de electricidad, para cada fase de la vida del reactor nuclear. (32)

Producción			
1	kWh	0,02509	kg CO_2
7179487,2	kWh	180133	kg CO_2

Tabla 18. Emisiones de CO_2 para la producción de la potencia necesaria para realizar la travesía.

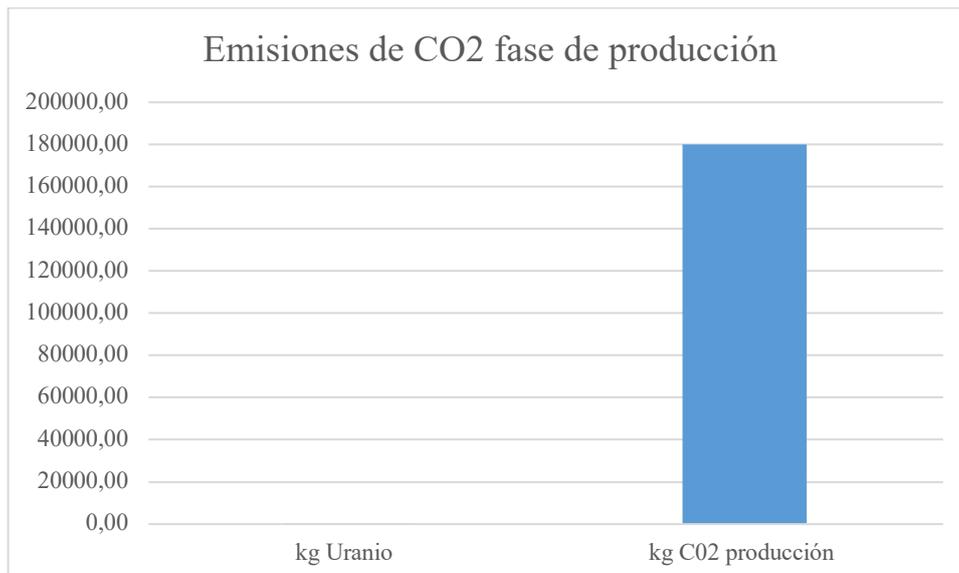


Ilustración 18. Gráfico de emisiones de CO₂ en la fase de producción de Uranio.

Fase de operación con reactor PWR en el transporte marítimo:

Los reactores PWR son una tecnología de propulsión utilizada en algunos buques, especialmente en portaviones y submarinos nucleares. Durante la operación de un reactor PWR, se produce una reacción nuclear de fisión en la que los núcleos de uranio se dividen en dos, liberando energía en forma de calor. Este calor se utiliza para generar vapor de agua que mueve turbinas y genera electricidad que alimenta el motor del buque.

Es importante destacar que durante la operación del reactor PWR, no se generan emisiones directas de CO₂, ya que no se queman combustibles fósiles como ocurre en los motores de combustión interna. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta las emisiones asociadas a la fase de producción del UO₂ y el ciclo de vida completo del combustible nuclear, que incluye su enriquecimiento, uso y almacenamiento posterior.

Operación			
1	kWh	0,01158	kg CO₂
7179487,2	kWh	83138	kg CO₂

Tabla 19. Emisiones de CO₂ en la fase de operación del UO₂

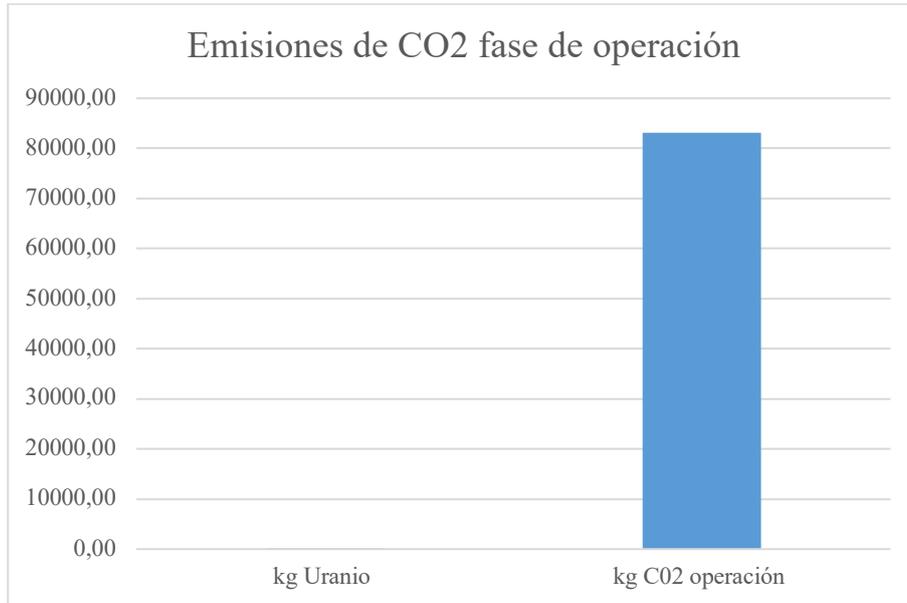


Ilustración 19. Gráfico de emisiones de CO₂ en la fase de operación con uranio

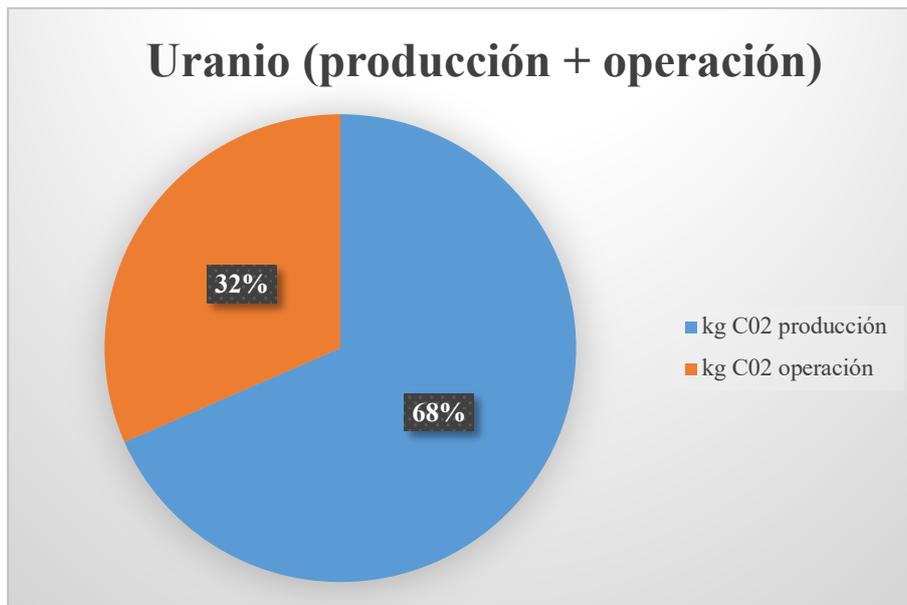


Ilustración 20. Gráfico comparativo de emisiones de CO₂ en la fase de producción de uranio y operación.

Con los datos obtenidos se observa que la fase de producción del combustible de uranio es la que contribuye en mayor medida a las emisiones de CO₂ en todo el ciclo de vida de la generación de energía nuclear, representando el 68% del total. Esto se debe a la intensidad energética y las emisiones asociadas con el enriquecimiento y fabricación del combustible. Por otro lado, la fase de operación de reactores nucleares, a pesar de ser

relativamente más limpia en términos de emisiones de CO_2 , aún contribuye significativamente con el 32% restante. Esta comparativa destaca la importancia de considerar ambas etapas para reducir el impacto ambiental de la energía nuclear y avanzar hacia prácticas más sostenibles en la industria energética.

9.6 Gas Natural Licuado (GNL)

Las emisiones de CO_2 en la producción de Gas Natural Licuado pueden variar en cuanto a su fuente de obtención, las tecnologías utilizadas en los procesos de licuefacción y transporte. El proceso de producción de GNL consiste en el enfriamiento de gas natural a bajas temperaturas para convertirlo en líquido y una vez convertido su almacenamiento y transporte será más eficiente. Por tanto, las emisiones de CO_2 en la fase de producción se deberán a los procesos de extracción y purificación del gas natural, licuefacción y su posterior transporte.

GNL		Producción (extracción materias primas, transporte, refinado) (kg CO_2 /kg GN)	Operación (kg CO_2 /kg GN)	kg CO_2 producción	kg CO_2 operación
261322,33	kg	0,045	0,04	11759,5	10452,9

Tabla 20. Emisiones de CO_2 en la fase de producción y operación con GNL

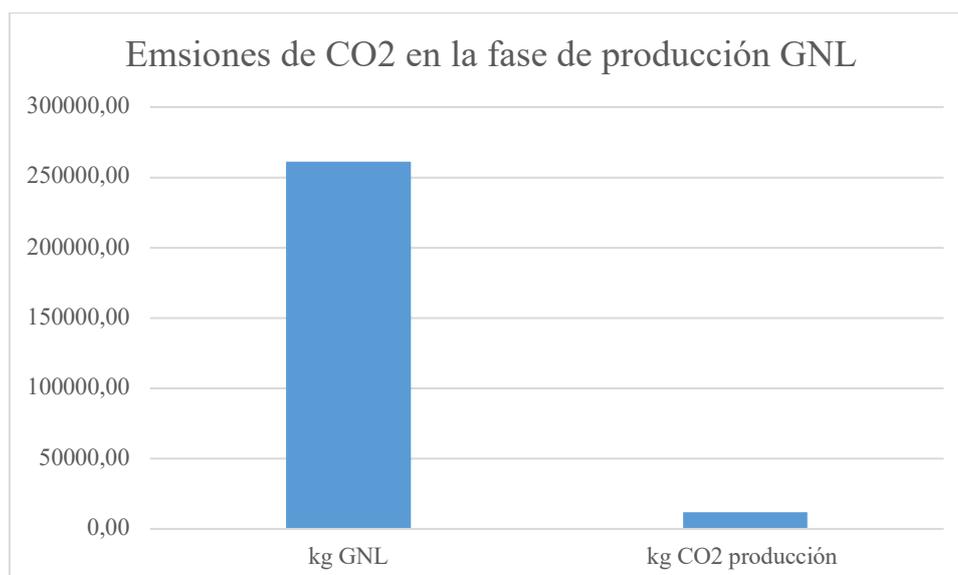


Ilustración 21. Gráfico de emisiones de CO_2 en la fase de producción de GNL

A continuación, se explicará los factores que influyen en las emisiones de CO_2 durante la producción de GNL:

En primer lugar, si el gas proviene de fuentes no convencionales, pueden existir emisiones adicionales a la extracción. Dependiendo de la eficiencia del proceso que se lleve a cabo durante la licuefacción puede llegar a tener un impacto importante en las emisiones. Las tecnologías más eficientes pueden reducir las pérdidas de energía y con ello las emisiones. Algunas instalaciones de producción de GNL implementan tecnologías de captura y utilización de carbono para reducir las emisiones, como la inyección de CO_2 en yacimientos petroleros.

Por último, el transporte de GNL puede generar emisiones de CO_2 , como se expone en este trabajo, en buques metaneros, por ello es muy importante tener en cuenta la eficiencia del transporte y las diversas tecnologías de recuperación de calor que pueden influir en las emisiones.

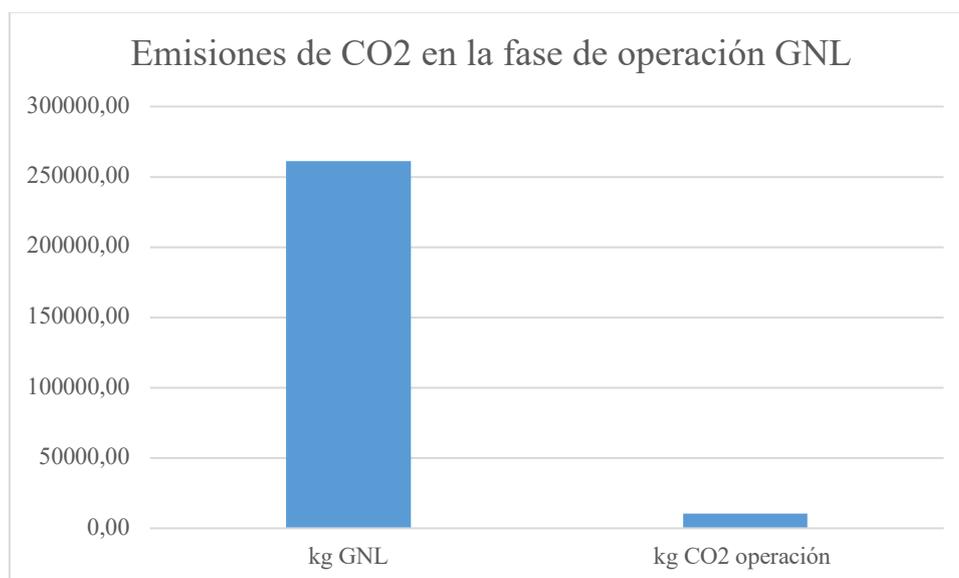


Ilustración 22. Gráfico de emisiones de CO_2 en la fase de operación con GNL

En cuanto a las emisiones que se producen en la fase de operación del buque con Gas Natural Licuado (GNL), son más bajas, como podemos observar el gráfico de abajo, en comparación con su fase de producción. Estas emisiones dependen de diversos factores, como el diseño y la eficiencia del motor, la calidad del GNL y las prácticas de operación. El gas natural es considerado una opción más limpia en comparación con otros

combustibles fósiles, debido a que su combustión produce menos emisiones de CO_2 por unidad de energía liberada.

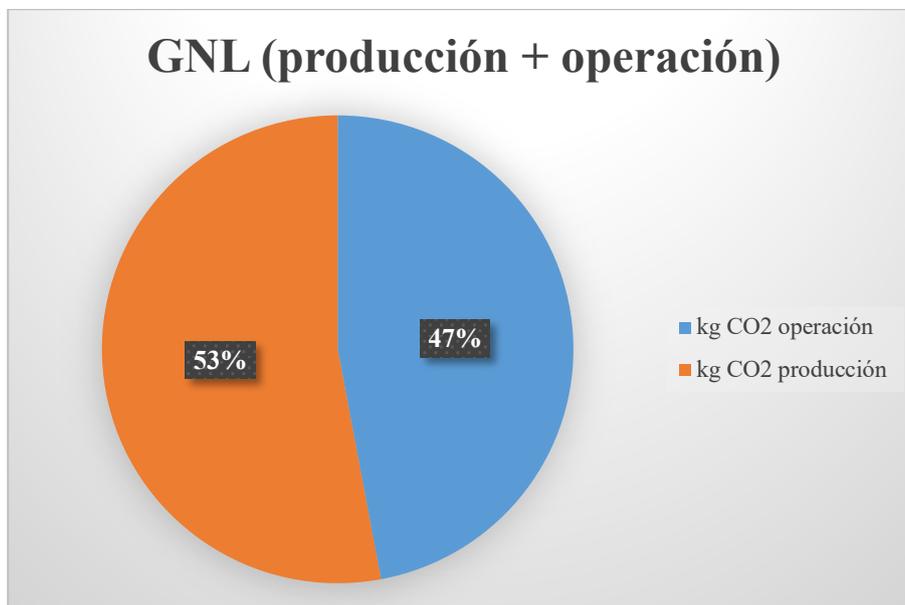


Ilustración 23. Gráfico emisiones de CO_2 en la etapa de producción y operación de GNL

Como observamos en el siguiente gráfico, una vez analizadas las emisiones de CO_2 que se producen en la fase producción y operación del GNL, existe un ligero despunte en las emisiones de CO_2 durante su fase de producción en un 53% por encima de un 47% de las emisiones que se producen en la fase de operación del buque.

9.7 Comparación de resultados

	DIESEL	HIDRÓGENO	AMONIACO	METANOL	UO_2	GNL
	591862,7		861538461,5		1013,6	11759,5
Carbón		4523076,9		2597603,4		
GN		904615,4		1071511,4		
Biomasa				1298801,7		

Tabla 21. Resultados de kg de CO_2 emitidos en la fase de producción de los combustibles.

Según los datos obtenidos en la tabla, el UO_2 tiene las emisiones de CO_2 más bajas en su producción, con solo 1013.6 kg de emisiones de CO_2 . Esto es significativamente más bajo que los otros combustibles enumerados, como el diésel, el amoníaco, el hidrógeno, el

metanol y el GNL. Por lo tanto, si el objetivo es seleccionar el combustible con las emisiones de CO_2 más bajas en su producción, el Uranio sería la mejor opción.

DIESEL	HIDRÓGENO	AMONIACO	METANOL	UO_2	GNL
628879,8	0,0	0,0	0,0	83138,5	10452,9

Tabla 22. Resultados de kg de CO_2 en la fase de operación de los combustibles.

En cuanto a la fase de operación del buque, el combustible más sostenible en términos de emisiones de CO_2 producidas en la fase de operación sería el amoniaco, el hidrógeno el metanol y el UO_2 , ya que todos ellos tienen una emisión de 0. Este último se ha supuesto un 0 de emisiones de CO_2 durante la travesía del barco, las emisiones producidas en la Tabla 19. Emisiones de CO_2 en la fase de operación del UO_2 , corresponden al ciclo de vida total del combustible. El siguiente combustible más sostenible sería el GNL, con una emisión de 10452,9 kg de CO_2 . El combustible menos sostenible en términos de emisiones de CO_2 producidas al producirlo sería el diésel, con una emisión de 628879,8 kg.

10. ANÁLISIS ECONÓMICO

La elección del combustible en la industria marítima es una decisión crucial desde una perspectiva económica, ya que el costo total del depósito necesario para una travesía en un buque puede impactar significativamente en la rentabilidad de la operación.

En este análisis económico, examinaremos los precios y factores económicos asociados con cinco combustibles diferentes: diésel, amoniaco, hidrógeno, metanol, uranio y gas natural en el contexto de la propulsión de los buques metaneros Knutsen.

10.1 Diésel:

El diésel es un combustible tradicionalmente utilizado en la industria marítima. Los precios del diésel pueden variar según las condiciones del mercado internacional del petróleo. Para obtener el coste total del depósito para realizar la travesía, hemos obtenido los datos del precio de combustible diésel €/litro (33) en la provincia de Vizcaya, y hemos multiplicado por los litros necesarios que hemos obtenido anteriormente, obteniendo así los resultados que aparecen en la siguiente tabla.

Combustible	Precio €/l	Total €
Diésel	1,603	376154,53

Tabla 23. Precio total combustible diésel.

10.2 Hidrógeno:

Los factores que intervienen en el precio del hidrógeno son principalmente:

- El gasto asociado a la electricidad consumida durante el proceso de electrólisis
- El desembolso vinculado a la infraestructura de la planta de electrólisis. A medida que la capacidad de generación aumenta, la relación entre el coste y la potencia en megavatios (€/MW) disminuirá.
- Las horas en la cuales la planta permanece en funcionamiento. Un mayor número de horas operativas resultará una mayor producción de hidrógeno con la misma inversión, lo que reducirá el coste por unidad.

Considerando todos estos factores, el precio del hidrógeno podría variar desde 3 a 4 €/kg hasta alrededor de 10€/kg. Sin embargo, al analizar el precio de venta en hidrogeneras, el coste del hidrógeno se sitúa en unos 8-10€/kg. (35)

Combustible	Precio €/kg	Total €
Hidrógeno	9	775384,2

Tabla 24. Precio total hidrógeno

10.3 Amoniacó:

El amoniacó ha emergido como una opción prometedora debido a su potencial para generar cero emisiones de carbono. Según la información encontrada en la página web de la empresa Fuel Positive (34) cada una de sus unidades modulares de producción de amoniacó, se ha podido obtener el total del depósito de combustible, realizando los mismos cálculos que para el combustible diésel, multiplicando el valor de amoniacó verde y amoniacó gris por la cantidad necesaria para realizar la travesía:

Combustible	Precio USD/t	Total USD	Total €
Amoniacó verde	444	191261,52	178906,03
Amoniacó gris	714,50	307784,59	287901,71

Tabla 25. Precio total combustible amoniacó.

A principios de noviembre de 2021 los precios del amoniacó superaban de media los 1.250 USD/t, frente a los 550 USD/t en 2018. (34)

10.4 Metanol

El metanol es un combustible versátil que puede producirse a partir de diversas fuentes, incluidas las renovables. Se calcularán los costos de producción y distribución de metanol, teniendo en cuenta los precios de las materias primas y la infraestructura requerida. Además, se analizarán las implicaciones económicas y logísticas de la adaptación de motores y sistemas para el uso de metanol. Para calcular el coste total de metanol que es necesario para realizar la travesía, se ha multiplicado el valor obtenido en la referencia (36), por el total de metanol necesario, calculado anteriormente.

Combustible	Precio USD/t	Total USD	Total €
Metanol verde	643	417564,78	390593,94
Metanol gris	417	270800,18	253306,49

Tabla 26. Coste total de combustible metanol.

10.5 UO_2

El uso de UO_2 en la propulsión marítima plantea desafíos únicos debido a la tecnología nuclear necesaria. Se evaluarán los costos de adquisición de uranio en el mercado mundial, así como los costos de diseño, construcción y mantenimiento de sistemas nucleares a bordo. También se considerarán los aspectos regulatorios, de seguridad y gestión de desechos radiactivos.

En cada caso, se realizará un análisis de costos completo que abarque la cadena de suministro, la infraestructura requerida, la inversión inicial y los gastos operativos a lo largo del ciclo de vida de los combustibles. Además, se tendrán en cuenta las implicaciones económicas de las regulaciones ambientales y las políticas gubernamentales relacionadas con la sostenibilidad y las emisiones. El resultado será un panorama detallado de la viabilidad económica de cada combustible en la propulsión del buque metanero Knutsen, lo que permitirá tomar decisiones informadas en función de criterios económicos y ambientales. (37)

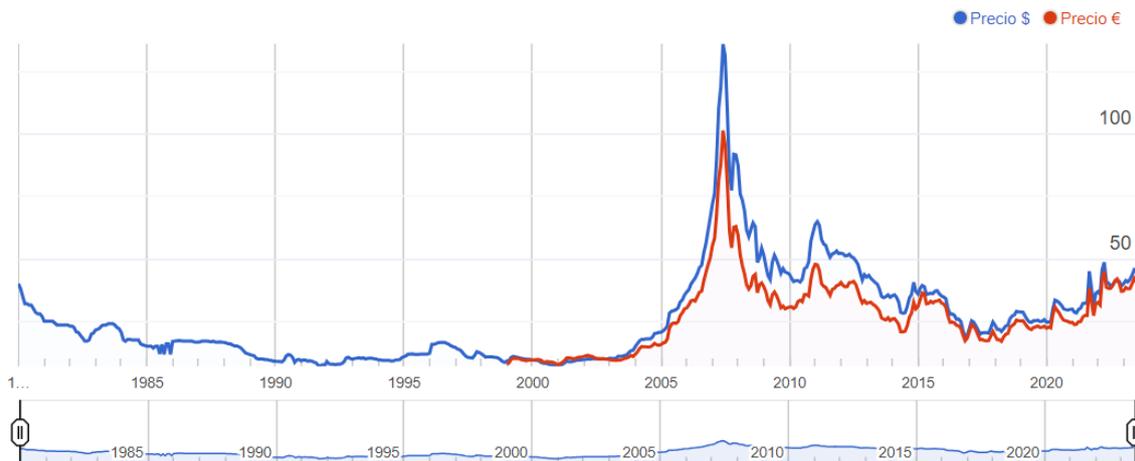


Ilustración 24. Evolución del Uranio precio por tonelada métrica 2023 (37)

Para llevar a cabo la travesía, el reactor utilizado en la propulsión como se ha mencionado anteriormente es un PWR, y el combustible necesario son 6,46 kg de UO_2 , por tanto:

UO_2 kg	\$/libra	€/kg	Total €
6,46	50,4 (38)	105,28	680,27

Tabla 27. Coste total de UO_2

10.6 GNL

El precio del Gas Natural Licuado (GNL) en Bizkaia es un factor crucial en la industria del transporte marítimo y la logística de la región. Se trata de una fuente de energía limpia y eficiente que se utiliza ampliamente en buques metaneros para propulsión y generación de energía a bordo. El precio de GNL está sujeto a una serie de factores que influyen en su fluctuación y que son esenciales para calcular el coste total de una travesía de un buque metanero. El precio está sujeto a factores de oferta y demanda en el mercado internacional de energía, la disponibilidad de infraestructuras de importación y regasificación, los costes de licuefacción y transporte, así como los impuestos y regulaciones gubernamentales. Además, el precio del GNL puede variar estacionalmente y estar sujeto a eventos geopolíticos y cambios en la producción global de gas natural.

Para llevar a cabo el cálculo del coste total de nuestra travesía, se tendrá en cuenta la capacidad de carga del buque, la distancia que recorrerá el buque, el consumo de GNL por parte de la embarcación, los costes de operación y mantenimiento.

GNL	€/l	Total €
617129,282	0,824 (40)	508514,53

Tabla 28. Coste total GNL

10.7 Comparación de resultados

Combustible	Precio/L	Unidades	Total €
Diésel	1,603	€/L	376154,58
Hidrógeno	9	€/kg	775384,20
Amoniaco verde	444	USD/t	177873,22
Amoniaco gris	714,5	USD/t	286239,67
UO ₂	105,28	€/kg	680,27
GNL	0,824	€/L	508514,53
Metanol verde	643	USD/t	388335,24
Metanol gris	417	USD/t	251844,16

Tabla 29. Comparación de precio total por combustible

En la Tabla 29. Comparación de precio total por combustible se han representado en la primera columna los posibles combustibles, seguida a ella los precios establecidos en el mercado a día 3 de septiembre de 2023, la tercera columna las unidades de medida en las que se han encontrado los precios y por último el precio del coste del depósito de combustible necesario para realizar la travesía. En primer lugar, las celdas en color rojo representan el menor valor económico, seguida de esta el color naranja, a continuación, le sigue el color amarillo y lima y por último el color verde, representando así el mayor coste económico.

Centrándonos en solo una visión económica, el combustible más barato sería el UO_2 con un precio total de 680,27 euros, aunque su uso en el transporte marítimo puede presentar desafíos técnicos y regulatorios, su bajo costo lo convierte en una opción atractiva desde el punto de vista económico.

El amoniaco verde, por otro lado, tiene un costo total de 177.873,22 euros. Aunque es más caro que el UO_2 sigue siendo significativamente más barato que otras opciones como el diésel o el hidrógeno.

Pero la elección no se limita a estos dos combustibles. También se pueden considerar otras opciones, cada una con su propio precio característico. Por ejemplo, el diésel, con un costo de 376.154,53 euros, es una alternativa más tradicional, ampliamente utilizada en la navegación, pero también más costosa en comparación con el UO_2 . El hidrógeno, con un precio de 775.384,20 euros, es una opción más limpia desde el punto de vista ambiental, pero su alto costo inicial puede ser una barrera.

Además, el amoníaco, tanto el "verde" con un costo de 177.873,22 euros como el "gris" con 286,239,67 euros, es otra opción para considerar. El amoníaco, aunque menos común en la navegación, es conocido por su potencial de reducción de emisiones. Por último, el metanol, en sus variantes "verde" a 388.335,24 euros y "gris" a 251.844,16 euros, es otra alternativa con un precio para tener en cuenta.

En resumen, la elección del combustible para una travesía de buque es una decisión compleja que debe ser analizada cuidadosamente, considerando no solo los precios de UO_2 y amoniaco verde, sino también los costos y beneficios asociados con otros combustibles disponibles en el mercado, así como los aspectos ambientales y regulatorios. No se trata únicamente del precio por unidad de combustible, sino de una decisión estratégica que puede tener un impacto significativo en la economía y la sostenibilidad de la operación marítima.

11. ANÁLISIS TÉCNICO

Elegir un combustible con menor masa y que ocupe un menor volumen para un buque metanero es una decisión estratégica y técnica que genera una serie de ventajas significativas en términos de eficiencia, operatividad y sostenibilidad. En este sentido, optar por un combustible con estas características, en lugar de opciones más pesadas y voluminosas, presenta varios beneficios clave.

En primer lugar, cuanto menor peso tenga el combustible mejorará la capacidad de carga del buque metanero. El buque Knutsen está diseñado para transportar grandes volúmenes de gas natural licuado, un combustible más liviano permite que el barco transporte una mayor cantidad de carga útil sin exceder los límites de peso. Con ello se obtendrá una mayor eficiencia en términos de carga transportada por unidad de masa total, por ello se reducirán los costos operativos y aumenta los márgenes de beneficio para las empresas de transporte marítimo.

En segundo lugar, un combustible de menor masa y menor volumen permite una mejor utilización del espacio interno del buque. El espacio en un buque metanero es un recurso valioso, ya que cada centímetro cúbico de capacidad adicional se traduce directamente en la posibilidad de transportar más carga. Elegir un combustible con menor volumen libera espacio que puede ser utilizado para almacenar una mayor cantidad de GNL, maximizando así la eficiencia de transporte y optimizando la relación entre la carga transportada y el espacio utilizado.

Combustible	Volumen (L)	Masa (kg)
Diésel	234656,6	207671,1
Hidrógeno	958329,8	86153,8
Amoniaco	558715	430769,2
Metanol	820157,7	649400,9
UO_2	0,6	6,46
GNL	580716,3	261322,3

Tabla 30. Comparación combustibles volumen-masa

En la Tabla 30. Comparación combustibles volumen-masa aparecen representados los volúmenes y las masas que ocupan las distintas alternativas de combustible que se han expuesto anteriormente. Los valores aparecen sombreados en una escala de color rojo son los menores. Observando los resultados de los colores, el combustible que menor volumen ocupa y de menor masa es el UO_2 , seguido a este, la siguiente opción a considerar sería el diésel y con un tercer puesto tendríamos el GNL. De estos tres resultados, basándonos en términos de menor masa tendríamos los siguientes resultados:

Combustible	Volumen (L)	Masa (kg)
Diésel	234656,6	207671,1
UO_2	0,6	6,46
GNL	580716,3	261322,3

Tabla 31. Comparación combustibles diésel, UO_2 , GNL volumen-masa

El combustible de menor masa sería el UO_2 y el diésel, con esto como se ha expuesto anteriormente, el buque propulsado con combustible diésel llevará un exceso de carga de 207664,7 kg.

El combustible que menor volumen ocupará será el UO_2 , en segundo lugar, será el combustible diésel. El buque propulsado con diésel tendrá un espacio reservado para almacenar el combustible para concluir la travesía, en comparación con el volumen que ocupa el UO_2 será una diferencia de 233836,4 l, que afectará en el espacio del buque.

Por último, el GNL como observamos en la Tabla 31. Comparación combustibles diésel, UO_2 , GNL volumen-masa, tanto el valor de masa como el valor de volumen son superiores a los valores de diésel y UO_2 . Una de las ventajas de que sea combustible GNL, el buque Knutsen, al ser un buque metanero, parte de su mercancía es utilizada como combustible para la propulsión de el mismo, es por ello, que el volumen depósito no se vería tan influenciado respecto a los anteriores.

Por ello, la mejor opción para una navegación eficiente, teniendo en cuenta como aspecto técnico el volumen que ocuparán os depósitos en buque, y con ello una reducción de espacio para la mercancía, será el UO_2 .

12. CONCLUSIONES

Combustible	Emisiones CO ₂ (producción + operación)			
	Volumen	Masa	Precio	
Diésel	1220742,4	234656,6	207671,1	376154,5
Hidrógeno	4523076,9	958329,8	86153,8	775384,2
Amoniaco	861538461,5	558715,0	430769,2	232056,4
Metanol	2597603,4	820157,7	649400,9	320089,7
UO ₂	84152,1	820,2	25,3	680,3
GNL	22212,4	580716,3	261322,3	604,2

Tabla 32. Resumen comparativo de los diferentes combustibles

Finalmente, se ha realizado un análisis exhaustivo de diversas opciones de combustibles con el objetivo de identificar la alternativa más adecuada para la descarbonización del transporte marítimo. Esta conclusión se ha fundamentado en los datos proporcionados en la Tabla 32. Resumen comparativo de los diferentes combustibles, que presenta una comparativa de los diferentes combustibles. En esta tabla, se han resumido todos los datos recopilados en los apartados anteriores para llegar a una conclusión general. Es importante destacar que las emisiones de hidrógeno y metanol incluidas en esta tabla se refieren exclusivamente a las producidas durante la fase de producción a partir de carbón. En Tabla 32. Resumen comparativo de los diferentes combustibles se ha evaluado los combustibles en términos de emisiones de CO₂, volumen, masa y precio. A partir de estos hallazgos, se han extraído conclusiones esenciales que servirán de guía en la toma de decisiones en este ámbito.

En primer lugar, se ha demostrado que el diésel, a pesar de su atractivo precio y dimensiones relativamente compactas, presenta emisiones de CO₂ significativas que lo descartan como una opción viable desde el punto de vista medioambiental. Por otro lado, el hidrógeno, aunque ofrece un volumen y una masa bajos, se ve limitado por sus altas emisiones de CO₂ y su costo elevado, lo que podría dificultar su adopción generalizada. El amoniaco, debido a sus emisiones extremadamente altas, se ha revelado como una opción inviable para la descarbonización del transporte marítimo, a pesar de su moderado volumen y masa y su precio relativamente bajo. En cuanto al metanol, aunque sus emisiones son más bajas que las del hidrógeno y el amoniaco, todavía se consideran

bastante altas, y su volumen y masa elevados, aunque su precio es moderado, plantean desafíos en términos de almacenamiento y estabilidad del buque.

El UO_2 , por otro lado, ha surgido como una opción altamente atractiva desde el punto de vista medioambiental, con las emisiones de CO_2 más bajas de todos los combustibles estudiados. Además, su volumen y masa extremadamente bajos y su precio competitivo lo posicionan como una elección destacada para la descarbonización del transporte marítimo. Finalmente, el GNL (Gas Natural Licuado) ha demostrado tener emisiones de CO_2 considerablemente bajas y un precio atractivo. A pesar de su volumen y masa altos, podría considerarse una opción viable, siempre y cuando se aborden los desafíos relacionados con el almacenamiento y la estabilidad del buque.

Para finalizar, las conclusiones de este trabajo indican que, en términos de reducción de emisiones de CO_2 , el GNL y el UO_2 son las opciones más prometedoras para la descarbonización del transporte marítimo. Sin embargo, se enfatiza la importancia de considerar otros factores, como la seguridad y la viabilidad económica, en la toma de decisiones finales. El equilibrio entre los requisitos de espacio, los impactos medioambientales y los costos será esencial para lograr una transición exitosa hacia un transporte marítimo más sostenible.

REFERENCIAS

1. **Rodríguez, Daniela.** Transporte marítimo: historia características, tipos, ventajas. *Lidefer*. [En línea] julio de 2019. <https://www.lifeder.com/transporte-maritimo/>.
2. **Varela, Adrián Francisco.** Un informe de la UE asegura que el transporte marítimo supone el 14% de las emisiones contaminantes del sector logístico y pide una transición ágil para descarbonizar Europa en 2050. *Business Insider*. [En línea] septiembre de 2021. <https://www.businessinsider.es/ue-transporte-maritimo-emite-14-emisiones-contaminantes-924221>.
3. **Internacional, Organización Marítima.** OMI. *Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los buques*. [En línea] <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>.
4. **Demográfico, Minsiterio para la Transición Ecológica y el Reto.** Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. [En línea] https://www.miteco.gob.es/gl/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/trafico_maritimo.aspx.html.
5. **Internacional, OMI Organización Marítima.** OMI Organización Marítima Internacional. [En línea] <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>.
6. **Internaional, OMI Organización Marítima.** OMI Organización Marítima Internaional . [En línea] <https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/pages/CII-and-EEXI-entry-into-force.aspx>.
7. **Internacional, OMI Organización Marítima.** OMI Organización Marítima Internacional . [En línea] <https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-%28MARPOL%29.aspx>.
8. —. ANÁLISIS CLÁUSULA A CLÁUSULA DEL ANEXO VI DEL CONVENIO. [En línea] <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/02/ES-SET-Guide-2-Clause-by-clause-analysis-of-MARPOL-Annex-VI-1.pdf>.
9. **Graaf, Thijs Van de.** Fondo Monetario Internacional. La década del Hidrógeno. [En línea] Diciembre de 2022. <https://www.imf.org/es/Publications/fandd/issues/2022/12/hydrogen-decade-van-de-graaf>.
10. **Servicios Náuticos en Sanxenxo. Servinauta.** [En línea] 4 de octubre de 2019. <https://www.servinauta.com/terminologia-naval-la-eslora-barco/#:~:text=La%20eslora%20es%20la%20dimensi%C3%B3n%20de%20un%20barco,parte%20m%C3%A1s%20saliente%20a%20proa%20de%20la%20embarcaci%C3%B3n..>
11. **Wikipedia. Tonelaje de peso muerto.** [En línea] https://es.wikipedia.org/wiki/Tonelaje_de_peso_muerto.
12. **Vessel Finder .** [En línea] <https://www.vesselfinder.com/es/vessels/details/9236432>.
13. **Wikipedia. Wikipedia.** [En línea] <https://es.wikipedia.org/wiki/Di%C3%A9sel>.

14. **Diésel (combustible) – Características, propiedades y usos. [En línea]** <https://como-funciona.co/el-diesel/#:~:text=Propiedades%20del%20di%C3%A9sel%201%20Color%3A%20Blanquecino%20o%20verdoso%3B,Densidad%3A%20850%20kg%2Fm3%3B%203%20Poder%20Calor%C3%ADfico%3A%208.800%20kcal%2Fkg..>
15. **Wikipedia. Amoniac. [En línea]** <https://es.wikipedia.org/wiki/Amon%C3%ADaco#:~:text=El%20amon%C3%ADaco%20se%20ha%20propuesto,aproximadamente%20la%20mitad%20del%20di%C3%A9sel..>
16. **Formulación química . [En línea]** <https://www.formulacionquimica.com/NH3/>.
17. **Badía, Clara Fenández Bolaños. 2.4 Propiedades del hidrógeno .**
18. **Chile, Química Industrial. Química Industrial Chile . [En línea]** <https://quimicaindustrialchile.cl/producto/metanol/#:~:text=Densidad%3A%20La%20densidad%20del%20metanol%20es%20de%20791%2C8,formulaci%C3%B3n%20de%20mezclas%20y%20la%20determinaci%C3%B3n%20de%20flotabilidad..>
19. **PRIMAGAS. ¿Qué es el poder calorífico? [En línea]** <https://www.primagas.es/blog/ques-poder-calorifico.>
20. **Herrera, Hugo Talavera. MEDIOS DE TRANSPORTE DE GAS NATURAL LICUADO: GNL. La Revista del Gas Natural .**
21. **Statista. Annual fuel consumption by ships worldwide from 2019 to 2020, by fuel type. [En línea]** <https://www.statista.com/statistics/1266963/amount-of-fuel-consumed-by-ships-worldwide-by-fuel-type/>.
22. **Climàtic, Oficina Catalana del Canvi. Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). 2011.**
23. **Insider, Business. Un informe de la UE asegura que el transporte marítimo supone el 14% de las emisiones contaminantes del sector logístico y pide una transición ágil para descarbonizar Europa en 2050. [En línea]** <https://www.businessinsider.es/ue-transporte-maritimo-emite-14-emisiones-contaminantes-924221.>
24. **Miteco. Fabricación de amoniac (emisiones de proceso).**
25. **The Haber-Bosch process revisited: On its real kinetics. Javier Pérez - Ramírez, Christoph R. Müller, Rutger A.van Santen. s.l. : Nature Communications, 2017.**
26. **Acogen, Everis, COGEN España. Entendimiento del Mercado del Hidrógeno y sus oportunidades para la Cogeneración. 2021.**
27. **Wikipedia. Hydrogen production . [En línea]** https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_production.
28. **Ortega, Daniel José Copa. Economía del hidrógeno hasta 2030. 2020.**
29. **INSTITUTE, IRENA & METHANOL. Innovation outlook Renewable Methanol . 2021.**
30. **Romeo, Germán García Calderón. CAPACIDAD ACTUAL E INMEDIATA EN EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR. 2006.**

- 31. Gobierno, Vicepresidencia Tercera del. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Enriquecimiento del uranio.* [En línea]**
<https://energia.gob.es/nuclear/Combustible/Paginas/enriquecimiento.aspx>.
- 32. Bohigas, Xavier. *Centrales nucleares, emisiones de CO2 y cambio climático.***
- 33. Gasolina, Diesel o.** [En línea] <https://www.dieselgasolina.com/>.
- 34. Atlas, New. World Energy Trade.** [En línea]
<https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/gas/fuelpositive-promete-amoniaco-verde-a-un-60-del-coste-del-gris-actual>.
- 35. H2, Hidrógeno Verde.** [En línea] <https://hidrogeno-verde.es/precio-del-hidrogeno/#:~:text=Teniendo%20en%20cuenta%20todos%20estos,y%2010%20euros%20por%20kilogramo>.
- 36. Martin, Abigail. ICCT .** [En línea] septiembre de 2021.
- 37. Expansion.** [En línea] <https://datosmacro.expansion.com/materias-primas/uranio>.
- 38. Investing.com. *Futuros Uranio .*** [En línea] <https://es.investing.com/commodities/uranium-futures>.
- 39. Wikipedia. *Amoniaco.*** [En línea]
<https://es.wikipedia.org/wiki/Amon%C3%ADaco#:~:text=El%20amon%C3%ADaco%20se%20ha%20propuesto,aproximadamente%20la%20mitad%20del%20di%C3%A9sel..>
- 40. G, J., 2023. ¿Cuál es el precio del gas licuado de petróleo GLP? Luz y Gas [en línea],**
Disponible en: <https://www.luz-gas.es/precio-gas-natural/licuado/#:~:text=El%20precio%20del%20gas%20licuado%20de%20petr%C3%B3leo%20o%20GLP%20est%C3%A1,la%20demanda%20en%20cada%20zona>.

