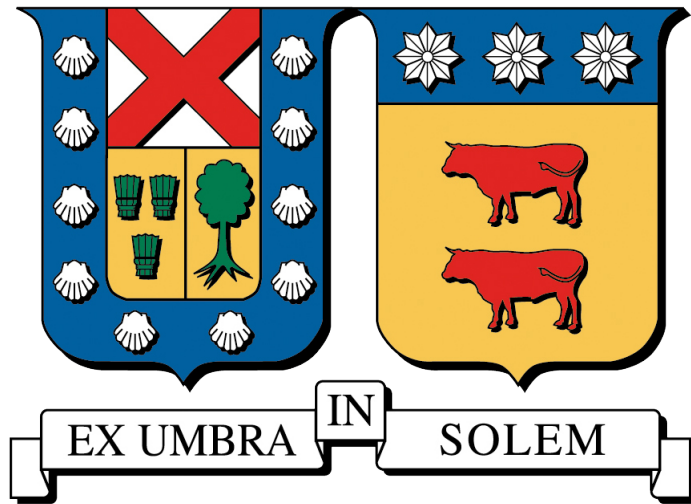




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

EL USO DEL HIDRÓGENO VERDE COMO COMBUSTIBLE EN EL
TRANSPORTE MARÍTIMO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL
INDUSTRIAL

AUTOR Luis Canessa

PROFESOR GUÍA Francisco Dall'orso

SANTIAGO DE CHILE, 19 DE SEPTIEMBRE DE 2022

ÍNDICE

1. Abstract	4
2. Problema de Investigación	7
3. Objetivos	9
3.1. Objetivo General	9
3.2. Objetivos Específicos	9
4. Marco Teorico	10
4.1. Contexto climático mundial	10
4.1.1. Gases de efecto invernadero	10
4.1.2. Emisiones Mundiales	11
4.1.3. Límites planetarios	13
4.1.4. Acuerdo de París	16
4.1.5. Fuentes críticas de emisiones	17
4.1.6. Emisiones Chilenas	17
4.2. Contexto energético	20
4.2.1. Mundial	20
4.2.2. Chileno	23
4.3. Transporte Marítimo de Carga:	26
4.3.1. Tipos de Barcos:	26
4.3.2. Tipos de Motores:	29

4.3.3.	Contexto energético del transporte marítimo y sus emisiones	30
4.4.	¿Qué es el Hidrogeno?	34
4.4.1.	Definición:	34
4.4.2.	De donde proviene:	34
4.4.3.	Tipos de Hidrógeno:	35
4.4.4.	Proyección de costos de producción y oferta de Hidrógeno verde en Chile:	36
4.4.5.	Contexto Mundial del Hidrógeno verde	36
4.4.6.	Estrategia nacional de Hidrógeno verde:	37
4.4.7.	Características del Hidrógeno:	39
4.4.8.	Usos del Hidrógeno en la actualidad	39
4.4.9.	Tecnologías existentes asociadas al uso de Hidrógeno	42
5.	Metodología:	50
5.1.	Levantamiento de Información:	50
5.2.	Estudio de Factibilidad Técnica:	51
5.3.	Estudio de Factibilidad Económica:	52
5.4.	Análisis de impactos ambientales:	53
5.5.	Comparación entre lo propuesto y el contexto actual en relación con la factibilidad ambiental:	53
6.	Desarrollo	55
6.1.	Levantamiento de información	55
6.1.1.	Motor seleccionado para el estudio	55

6.1.2.	Celda de combustible seleccionada para el estudio	56
6.1.3.	Modificaciones a un motor diesel para que funcione como motor de co-combustión de hidrógeno y diesel	56
6.1.4.	Modificaciones a un motor diesel para que funcione totalmente con hidrógeno	57
6.1.5.	Proyecciones del precio de los combustibles asociados al estudio: . .	58
6.1.6.	Emisiones de un motor de combustión enriquecido con hidrógeno . .	59
6.2.	Estudio de factibilidad técnica	61
6.2.1.	Existencia de tecnologías	61
6.2.2.	Análisis energético	63
6.2.3.	Reducción de capacidad de carga	65
6.2.4.	Peso:	69
6.2.5.	Sutilezas técnicas	70
6.3.	Estudio de factibilidad económica	71
6.4.	Análisis de impactos ambientales	78
6.5.	Comparación entre lo propuesto y el contexto actual en relación con el análisis de impactos ambientales	84
7.	Conclusiones	87
	Bibliografía	90

1. Abstract

En el presente estudio se evalúa la implementación del hidrógeno verde en el transporte marítimo de carga general, considerando la factibilidad en ámbitos técnicos, económicos y ambientales. En el primero de estos, se busca conocer y visualizar la existencia de la tecnología necesaria para implementar el hidrógeno como combustible en esta área en específico, además de otros factores importantes a considerar, como pueden ser el impacto en la capacidad de carga generado por las medidas, el consumo de hidrógeno estimado, entre otros. Por otra parte, se busca conocer la rentabilidad de las medidas propuestas presentadas, considerando el indicador conocido como Valor Anual Neto (VAN) para calcular el valor de las diferentes variables involucradas y la realización de análisis de sensibilidad para conocer el comportamiento de las variables en diversos casos. Finalmente, el impacto ambiental corresponde a uno de los factores más importantes a la hora de evaluar un proyecto de esta índole, debido al contexto actual asociado al cambio climático, por lo que se procede a realizar una estimación de emisiones de CO_2 Y NO_x y realizar una comparación con el caso base presentado en esta memoria.

En términos de rentabilidad a nivel general, las medidas propuestas son recomendables siempre y cuando se cumplan las diferentes condiciones propuestas en la presente memoria, correspondiendo en términos técnicos a la reducción de la capacidad de carga debido a los grandes tanques de hidrógeno y en términos económicos a los niveles de inversión o al consumo de hidrógeno máximo en el caso de una de las opciones propuestas.

Finalmente, se considera el impacto ambiental generado por las diferentes propuestas, entregando resultados positivos e importantes a considerar en el contexto del transporte

marítimo de carga general, provocando una disminución en un 100 % de las emisiones de dióxido de carbono en dos de los casos de los tres propuestos, además de mitigar las emisiones equivalentes al porcentaje de sustitución del petróleo diésel por hidrógeno en el último caso.

In this study, the implementation of green hydrogen in the maritime transport on general charges is evaluated, considering the feasibility in technical, economic and environmental. In the first of these, we want to know and visualize the existence of the necessary technology to implement the hydrogen as fuel in this specific area, in addition to other important factors too, such as the impact on the load capacity generated by the measures, the estimated hydrogen consumption, among others. On the other hand, it is sought to know the profitability of the proposed measures presented, considering the indicator known as Net Annual Value (NPV) to calculate the impact of the different variables involved and the performance of sensitivity analysis to know the behavior of the variables in various cases. Finally, the environmental impact corresponds to one of the most important factors when evaluating a project regarding hydrogen, due to the current context associated with climate change, for which an estimate of CO₂ and NO_x emissions is made. Then we proceed to make a comparison with the base case presented in this study.

In terms of profitability at a general level, the proposed measures are recommendable as long as the different conditions proposed in this report are met, corresponding in technical terms to the reduction of cargo capacity due to the large hydrogen tanks and in economic terms to the levels of investment or maximum hydrogen consumption in the case of one of the proposed options.

Finally, the environmental impact generated by the different proposals is considered,

delivering positive and important results to be considered in the context of general cargo shipping, causing a 100 % decrease in carbon dioxide emissions in two of the three proposed options, in addition to mitigating emissions equivalent to the percentage of substitution of diesel oil by hydrogen in the last case.

2. Problema de Investigación

En plena revolución industrial, a mediados del siglo 20, la utilización de combustible fósiles incremento de manera importante, siendo el principal referente de estos el carbón. En este contexto, la utilización de estos tipos de combustible se ligó principalmente a la generación de energía eléctrica y a la movilización de maquinarias a vapor, como por ejemplo pueden ser los diferentes buques de la época.

Con el pasar de los años, de manera paulatina, el carbón comenzó a ser sustituido por el petróleo y sus derivados, ocasionado principalmente por los valores de mercado de estos activos. En el contexto del transporte marítimo, estos últimos sustituyeron en su totalidad al carbón, causado principalmente por la causa previamente mencionada, y fortaleciéndose gracias al surgimiento de la movilización particular (Kelkar, 2015, p.59).

Como estos tipos de combustible se asocian al concepto de no renovables, su uso continuo ha generado una preocupación sobre el futuro, sobre cuáles serán las fuentes de energía cuando se agoten todas las reservas de estas. Esta ha generado grandes discusiones, además del contexto actual, el cual incentiva la búsqueda de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ha nacido la necesidad de encontrar sustitutos que sean amigables con el medio ambiente (Bolívar, Mostany y García, 2006).

La utilización del hidrógeno como combustible a surgido gracias a esta problemática, mediante la utilización de este acompañando a los motores de combustión, funcionando como almacenaje de energía eléctrica, entre otras variadas funciones. Sus reservas no son un problema para las personas, debido a que este es el recurso más abundante del planeta (Linares y Moratilla). Buscar fuente de reducción de emisiones de gases de efecto

invernadero debido a la utilización de este como apoyo en la combustión. Junto a esto, las diferentes aplicaciones de este han sido un foco importante de estudio, buscando abrir un mundo de posibles utilidades en un nuevo ámbito industrial y del transporte.

En el transporte marítimo se usa principalmente como combustible el petróleo y sus derivados, generando cantidades importantes de gases de efecto invernadero, además de utilizar grandes cantidades de este combustible para la movilización de estos. En este contexto nace la problemática sobre la rentabilidad de la aplicación del hidrógeno verde como sustituto al combustible usado convencionalmente, surgiendo así las siguientes preguntas:

- ¿Existe la tecnología para realizar el cambio?
- ¿Cuánto tiempo tomará este cambio?
- ¿Es eficiente realizarlo?
- ¿Es eficiente para viajes de corta y larga distancia?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar la factibilidad e impactos ambientales asociados de implementar el hidrógeno verde como apoyo a los combustibles convencionales para la movilización del transporte marítimo de carga en largas distancias dentro del territorio chileno

3.2. Objetivos Específicos

- Conocer el contexto actual del transporte marítimo en Chile, identificando los diferentes buques utilizados para diferentes contextos y el impacto generado por estos con respecto a las emisiones de dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno.
- Realizar un estudio técnico de las diferentes propuestas planteadas en la presente memoria, con el fin de evaluar una futura implementación de estas, considerando factores como disponibilidad de tecnologías, peso, consumo de combustible, entre otros.
- Evaluar la posibilidad de implementar las medidas propuestas en la presente memoria, utilizando el concepto de rentabilidad económica.
- Determinar el impacto en la emisión de gases de efecto invernadero debido al cambio, y el efecto medioambiental que genera.
- Realizar una comparación en ámbitos ambientales con respecto a lo propuesto en la presente memoria y el contexto actual del transporte marítimo de carga general.

4. Marco Teorico

4.1. Contexto climático mundial

La crisis ambiental actual he generado que diferentes países del mundo se reúnan constantemente a hablar sobre los diferentes temas asociados. La cumbre de París, Francia, fue un punto culmine en el ámbito medioambiental, proponiendo diferentes puntos en los cuales deben trabajar los países asociados para así reducir el impacto medioambiental. Como finalidad principal, en el corto plazo se busca mantener la temperatura mundial por debajo de los 2 grados Celsius, proponiendo posteriormente una meta a largo plazo que busca que esta temperatura se encuentre por debajo de 1,5 grados (United Nations Climate Change).

4.1.1. Gases de efecto invernadero

Basándonos en lo mencionado por Alberto Pino en el documento "Estimación de emisiones contaminantes atmosféricas producidas por embarcaciones marítimas en Chile", existen diferentes gases de efecto invernadero, los cuales se presentan a continuación:

- Dióxido de Carbono (CO_2): Gas incoloro e inoloro cuyas principales fuentes son la quema de combustible fósil, además de la actividad volcánica, agua termales, entre otras fuentes naturales.
- Óxido de Nitrógeno (N_2O): importante gas de efecto invernadero generado a partir de la combustión de combustibles fósiles, la producción de ácido nítrico y la combustión de biomasa. También se puede generar debido a bacterias en ambientes oceánicos o

tropicales.

- Metano (CH_4): Hidrocarburo que se origina principalmente debido a la combustión incompleta de combustibles fósiles. También se genera debido a la descomposición anaeróbica de residuos, la digestión animal, la descomposición de residuos animales, entre otras fuentes. Es el segundo gas que más contribuye al efecto invernadero, después del dióxido de carbono.
- Vapor de agua (H_2O): Las actividades humanas no contribuyen de manera importante a la generación de vapor de agua, este se encuentra principalmente en la atmósfera debido al ciclo del agua. Estas moléculas atrapan la radiación y la reflejan en diferentes direcciones, lo que provoca un aumento en la temperatura de la superficie de la tierra.
- Arsénico (As): Se puede generar debido a actividades humanas, como la minería, fundiciones o la agricultura. Es uno de los elementos más tóxicos que se pueden encontrar en la atmósfera.
- Plomo (Pb): Contaminante presente en las emisiones de los vehículos que utilizan combustibles que contienen plomo, además de las emisiones generadas debido a las operaciones asociadas a la minería de este.
- Mercurio (Hg): Metal pesado que se puede producir en la combustión.

4.1.2. Emisiones Mundiales

En el presente gráfico se encuentran la evolución de las emisiones a nivel mundial entre los años 1757 y 2020, las cuales muestran un incremento importante a partir de 1865, en

pleno auge de la revolución industrial.

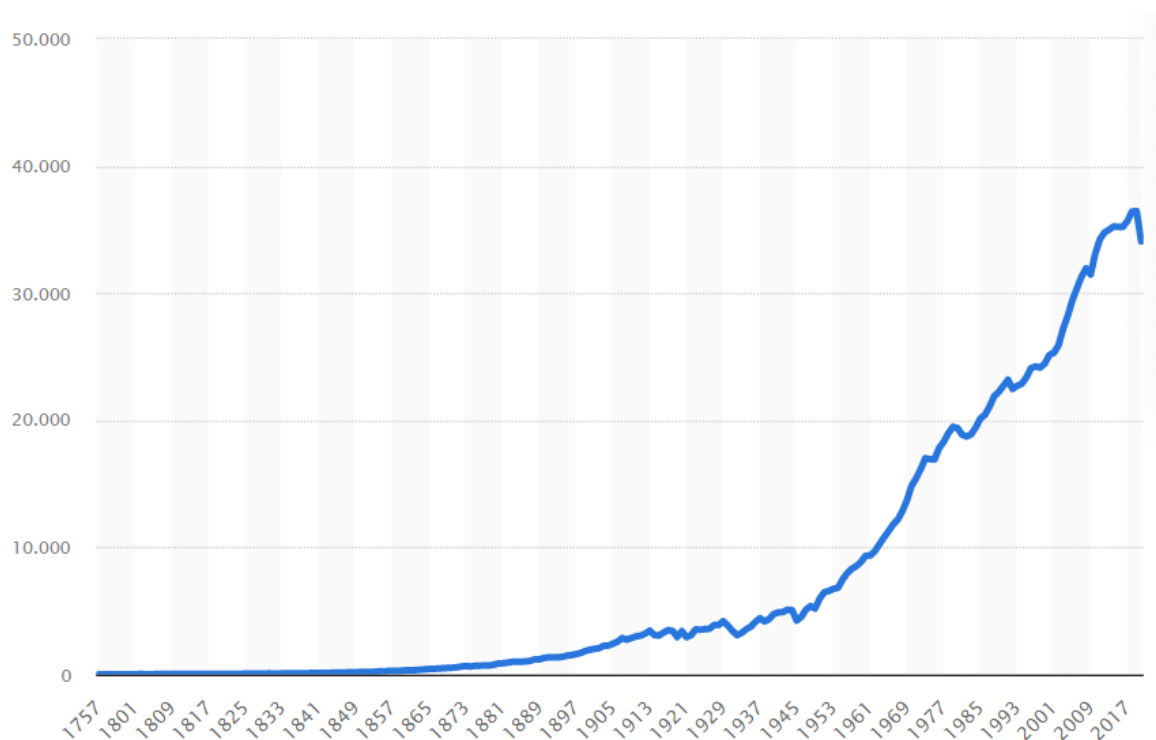


Figura 1: Evolución de las emisiones a nivel mundial entre los años 1757 y 2020. Fuente: Statista.

Junto al gráfico anterior, en el siguiente se presenta un desglose de las emisiones de gases de efecto invernadero entre los años 1970 y 2020.

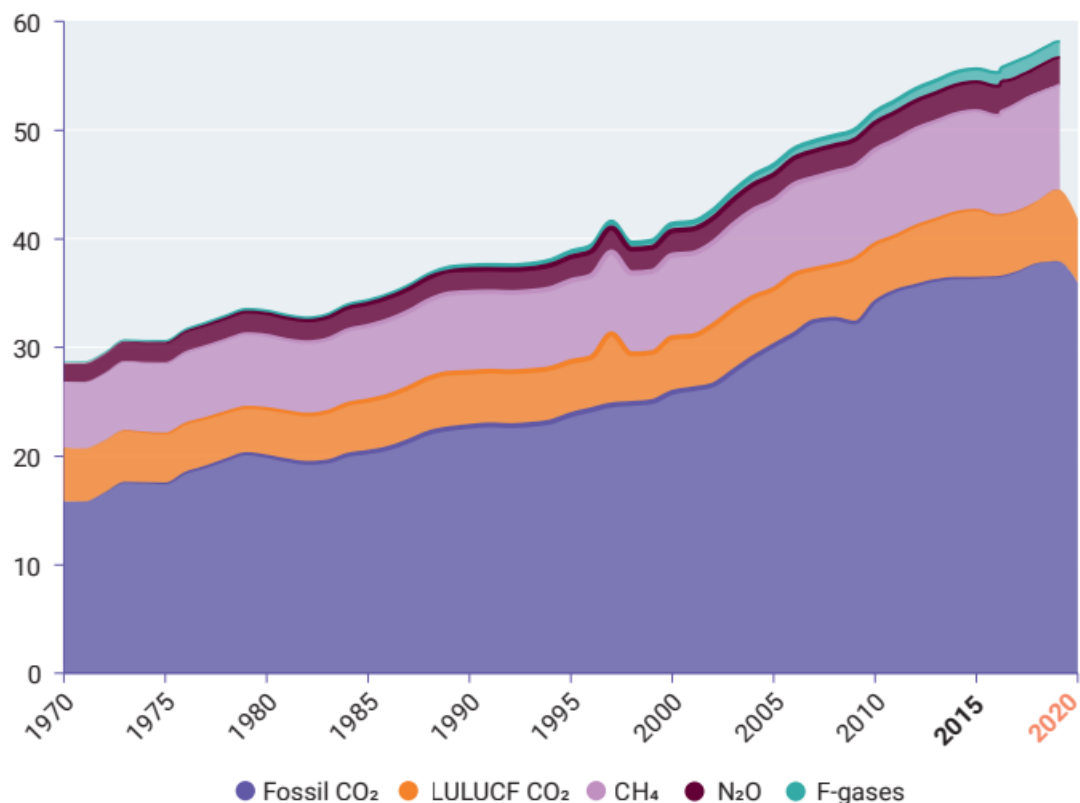


Figura 2: Desglose de emisiones entre los años 1970 y 2020 en giga toneladas de CO equivalente. Fuente: The Heat is On. Naciones Unidas.

Cabe destacar que debido a la pandemia de Covid 19, las emisiones de CO₂ proveniente de combustible fósiles cayó un 5,4 %. Además de esto, las emisiones de otros gases de efecto invernadero también caen, pero en una proporción menor al 5,4 %. Junto a lo previamente mencionado, las emisiones de dióxido de carbono durante el año 2021 apuntan a crecer nuevamente, en una proporción estimada de 4,8 % (The Heat is On. Naciones Unidas.).

4.1.3. Límites planetarios

En la presente imagen, extraída de la revista Science, se pueden apreciar los diferentes límites planetarios, los cuales se utilizan para conocer el estado del planeta y la evolución de las medidas tomadas para regularlos.

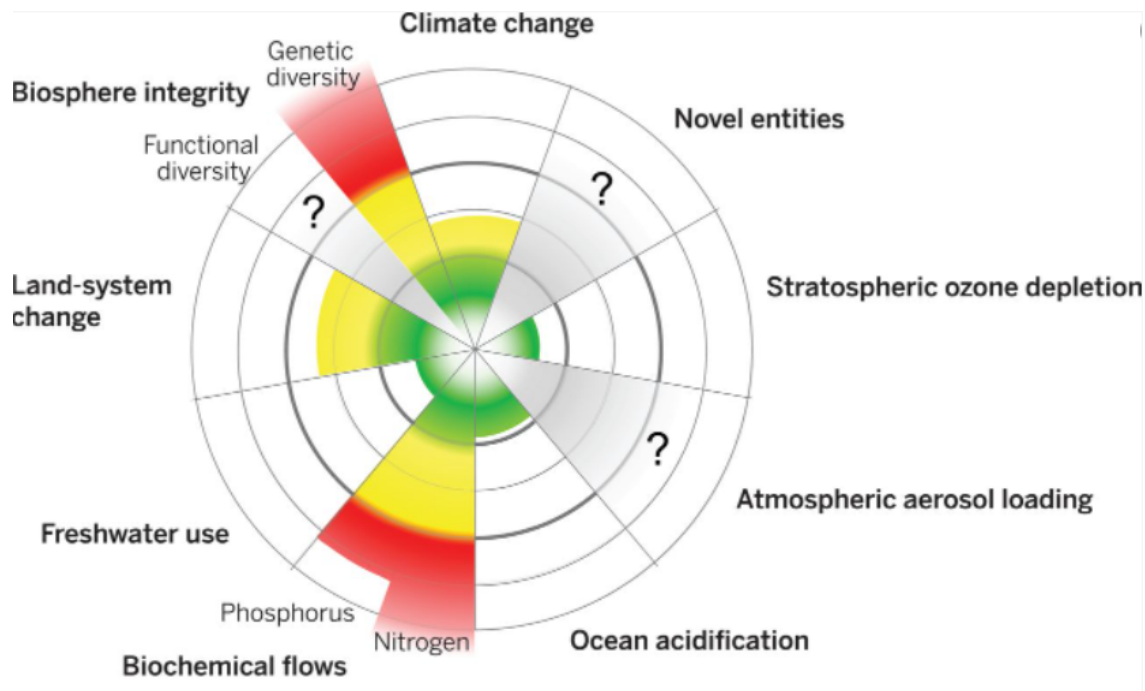


Figura 3: Límites planetarios. Fuente: Science, 2015

Estos límites cuentan con la siguiente descripción, extraída a partir de la revista Science:

- Cambio climático: Cuenta con dos variables de control, la concentración de CO atmosférico y el desequilibrio energético en la parte superior a la atmosfera. En el caso de la concentración de CO, la zona de incertidumbre se encuentra entre los 350 y 450 ppm, por otra parte, la segunda variable, su zona de incertidumbre se encuentra entre 1 y 1,5 Wm-2. Este límite planetario se encuentra en la zona de incertidumbre.
- Contaminación química: este límite aún no cuenta con un criterio establecido para realizar una medición.
- Agotamiento de la capa de ozono: El agotamiento de la capa de ozono se mide a base de la concentración de O3 en la atmosfera, encontrándose en una zona segura, encontrándose debilitada solamente en la zona de la antártica.

-
- Aerosoles: Considera para su cálculo dos criterios, los cuales ambos utilizan un indicador conocido como AOD (Aerosol Optical Depth), el primero de ellos considera este indicador como un promedio estacional en una región, en cambio, el segundo considera este indicador como si para una alta variación regional.
 - Acidificación del océano: cuenta con un solo indicador para medirlo, siendo este la concentración de ion carbonato en la superficie marina. Este límite se encuentra dentro de los rangos seguros.
 - Ciclo del nitrógeno y del fósforo: este límite considera 2 criterios para el fósforo y uno para el nitrógeno. En el caso del fósforo, este límite considera el flujo de este en el agua y en los fertilizantes. Por otra parte, en el caso del nitrógeno considera la fijación biológica, industrial e intencional de N.
 - Consumo de agua dulce: este límite considera 2 criterios para medir el consumo de agua dulce, el primero consiste en la cantidad máxima de aguas azules consumida, siendo este un total de 4000 km³/año-1. El segundo criterio consta de un porcentaje de extracción caudal del caudal medio mensual del río.
 - Cambios en el uso de suelo: relacionado con las áreas boscosas, considerando dos formas de medirlo, uno con respecto a los porcentajes de áreas boscosas a cubrir sobre la base de las originales u otro con respecto a los potenciales bosques.
 - Integridad de la biosfera: Cuenta con dos variables de control, las cuales corresponden a la tasa de extinción y la biodiversidad. Este límite se divide en dos, una correspondiente a la diversidad funcional, la cual no cuenta con registros, y la diversidad genética, la

cual se encuentra en un estado de alto riesgo.

Cabe destacar que la forma de medir estos límites planetarios utilizan uno u otro criterio para macrozonas o para zonas más pequeñas.

4.1.4. Acuerdo de París

Los líderes mundiales en la conferencia de las naciones unidas sobre el cambio climático, en París, realizaron un avance el 12 de diciembre de 2015 con el histórico Acuerdo de París ("El Acuerdo de París", Naciones Unidas).

Este plantea objetivos a largo plazo para guiar a las diferentes naciones, los cuales se encuentran a continuación:

- Reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el aumento de la temperatura global en este siglo a 2°C y esforzarse para limitar este aumento a 1,5°C.
- Revisar el compromiso de los países cada cinco años.
- Ofrecer financiación a los países en desarrollo para que puedan mitigar el cambio climático, fortalecer la resiliencia y mejorar su capacidad de adaptación a los impactos del cambio climático.

Esté entró en vigor el 4 de noviembre del año 2016 y en la actualidad forman parte 192 países, además de la unión europea. Incluye compromisos de todos los países para reducir sus emisiones y colaborar para adaptarse a los impactos del cambio climático, además de realizar llamamientos a estos últimos para que aumenten sus compromisos en el tiempo (^{EI} Acuerdo de París", Naciones Unidas).

4.1.5. Fuentes críticas de emisiones

En relación con las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, la OCDE, en su página web oficial, en el artículo "The Annual Climate Action Monitor", redactado el 16 de diciembre del año 2021, menciona que los sectores emisores de gases de efecto invernadero cambian dependiendo de la estructura de un país. Un ejemplo de esto son las emisiones generadas por el sector energético, las cuales son mayores en países como Japón o Corea que en Francia o Suiza, lo que se debe a su alta dependencia a los combustibles fósiles de estos.

A base de esta información, en los países pertenecientes a la OCDE, la principal fuente emisora de gases de efecto invernadero corresponde a la industria energética, con un 27,971 % del total de las emisiones, seguido por el sector transporté, el cual constituye un 24,089 %. Posterior a este sector se encuentran los sectores asociados a la industria manufacturera y construcción, con un 12,167 % de las emisiones totales, y el sector residencial, con un 10,564 %. Finalmente, destacar también el sector agricultor, con un 9,693 % de las emisiones.

4.1.6. Emisiones Chilenas

"En el 2018, las emisiones de gases de efecto invernadero totales del país (excluyendo UTCUTS) fueron de 112.313 ktCO₂ equivalente, incrementándose en un 128 % desde 1990 y en un 2 % desde 2016. El principal GEI emitido fue el CO (78 %), seguido del CH₄ (13 %), N₂O (6 %), y los Gases fluorados (3 %)"(Ministerio del Medio Ambiente).

El siguiente gráfico muestra el balance nacional de gases de efecto invernadero en kt de CO equivalente, separados por sector.

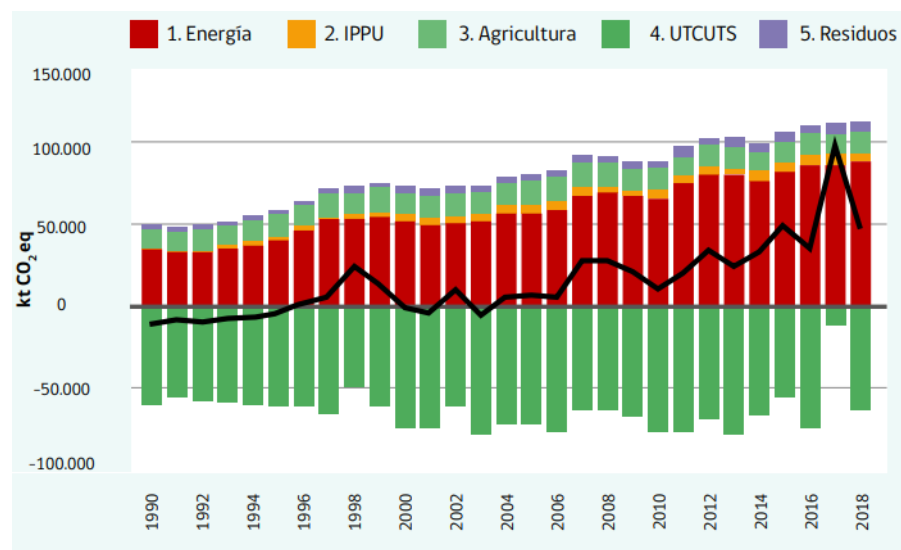


Figura 4: Balance nacional de gases de efecto invernadero en kt de CO equivalente. Fuente: Cuarto Informe Bial de actualización de Chile sobre el cambio climático.

Cabe destacar que los diferentes sectores especificados en el gráfico cuentan con subdivisiones, las cuales se presentan a continuación:

- **Energía:** Principal emisor nacional de gases de efecto invernadero, alcanzando un 77 % de las emisiones a nivel nacional. Las principales subcategorías presentes en este sector corresponden a industrias de la energía con el 39 % de participación, el sector transporté con un 33 %, 18 % de la industria manufacturera y un 9 % otros sectores.
- **IPPU:** En el año 2018, este sector genera un 6 % de las emisiones totales. Se encuentra subdividido en Uso de productos sustitutos de las sustancias que agotan la capa de ozono, con un 58 % de estas emisiones, seguido por las industrias de los minerales con un 23 %.
- **Agricultura:** Representa el 11 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero. Se encuentra subdividido Fermentación Entérica, Suelos Agrícolas y Gestión del Estiércol, con un 42 %, 40 % y 13 % de participación respectivamente.

- UTCUTS: Es el único sector que consistentemente absorbe CO en el país. Los subsectores más importantes que considera son las tierras forestales y los productos de madera recolectados, con un 83 % y 10 % de participación respectivamente.
- Residuos: Este sector equivale al 6 % de las emisiones totales. Se subdivide en dos principales subsectores, siendo estos la disposición de residuos sólidos y el tratamiento y descarga de aguas residuales, con una participación del 65 % y 30 % respectivamente.

Cabe destacar que lo mencionado es extraído del Cuarto Informe Bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático y los valores porcentuales corresponden al año 2018.

Además de esto, en el siguiente gráfico se encuentra un desglose de emisiones y absorción de gases de efecto invernadero por región para el año 2018, mostrando también un desglose por sector emisor de estos gases.

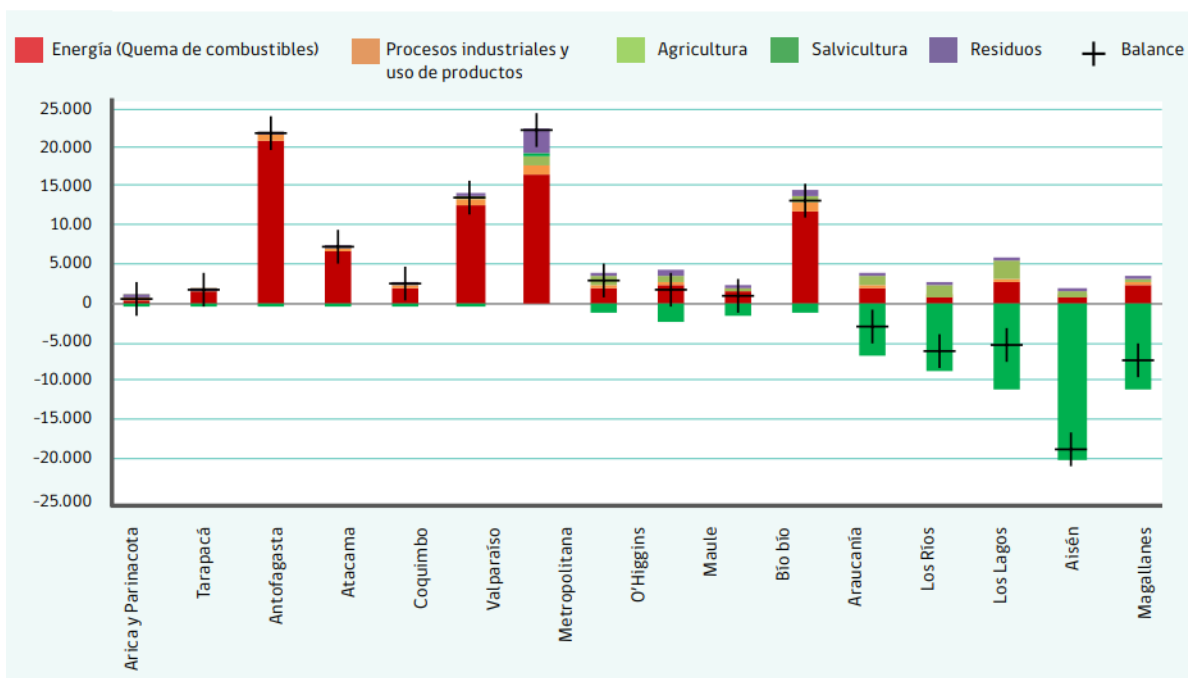


Figura 5: Emisiones y absorciones de GEI (kt CO₂eq) por región y sector, año 2018. Fuente: Cuarto Informe Bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.

Con relación al sector transporte en específico, en el siguiente gráfico se encuentra un desglose de las emisiones generadas por este sector.

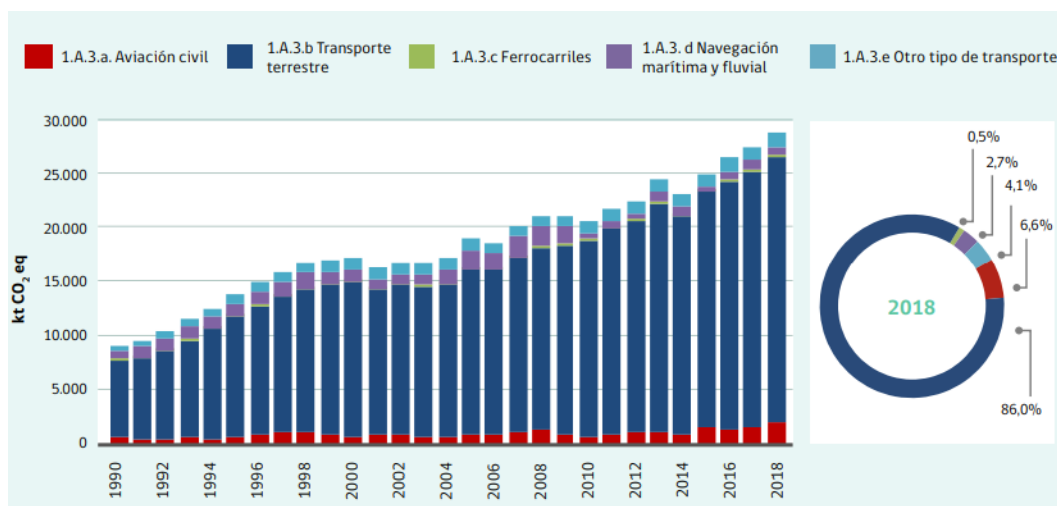


Figura 6: Emisiones de GEI en el sector transporte (kt CO₂ eq) por componente, serie 1990-2018. Fuente: Cuarto Informe Bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático.

La siguiente frase, extraída del Cuarto Informe Bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático, hace referencia al total de emisiones generadas por el sector transporte, el cual considera todas las actividades de transporte nacional, excluyendo el transporte militar y el internacional, tanto en vía aérea como marítima.

"En 2018, las emisiones de GEI contabilizaron 28.615 kt CO₂ eq, incrementándose en un 215 % desde 1990 y en un 8 % desde 2016" (Ministerio del Medio Ambiente).

4.2. Contexto energético

4.2.1. Mundial

Según la International Energy Agency, la producción total de energía por parte de los diferentes países pertenecientes a la OECD para el año 2020 están presentes en la siguiente tabla.

Fuente	Electricidad Generada en TWh
Carbón	2019
Gas	3367
Renovable	3243
Nuclear	1861
Petroleo	185

Figura 7: Total de energía generada por tipo de fuente. Fuente: elaboración propia a partir de la información extraída de la International Energy Agency

En el siguiente gráfico, extraído de la International Energy Agency se puede apreciar la evolución en la generación de energía por parte de los países pertenecientes a la OECD por tipo de fuente desde el año 2000 hasta el año 2020.

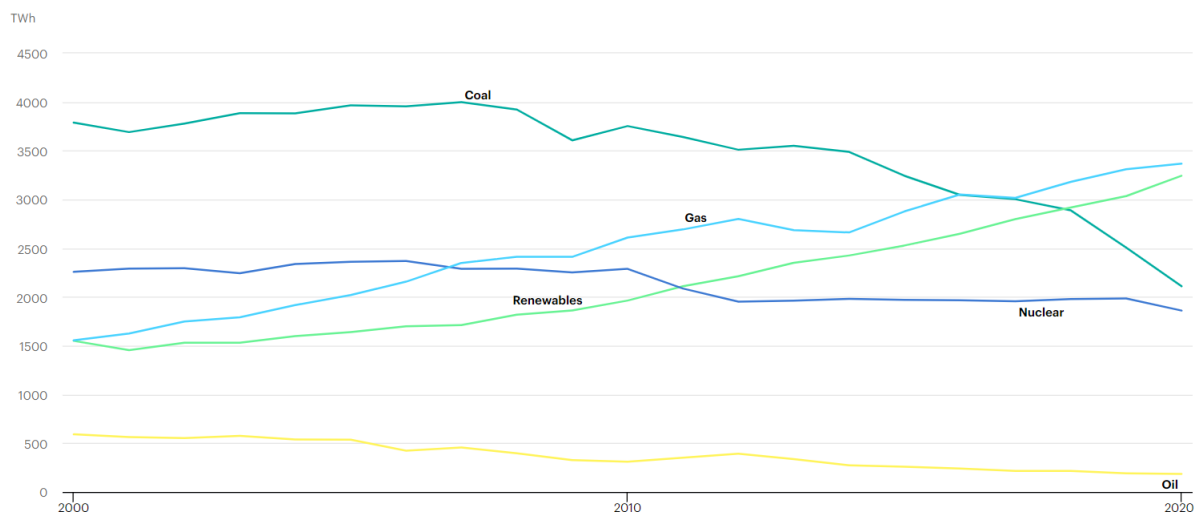


Figura 8: Evolución de la generación de energía por tipo de fuente por los países pertenecientes a la OCDE entre los años 2000 y 2020. Fuente: International Energy Agency

Hablado en términos de producción energética mundial, la información principalmente se encuentra en variaciones con respecto a periodos anteriores para cada una de las fuentes productoras de energía.

En el siguiente gráfico se puede apreciar el cambio en la producción energética para los diferentes fuentes fósiles, como pueden ser el carbón, petróleo, entre otras fuentes.

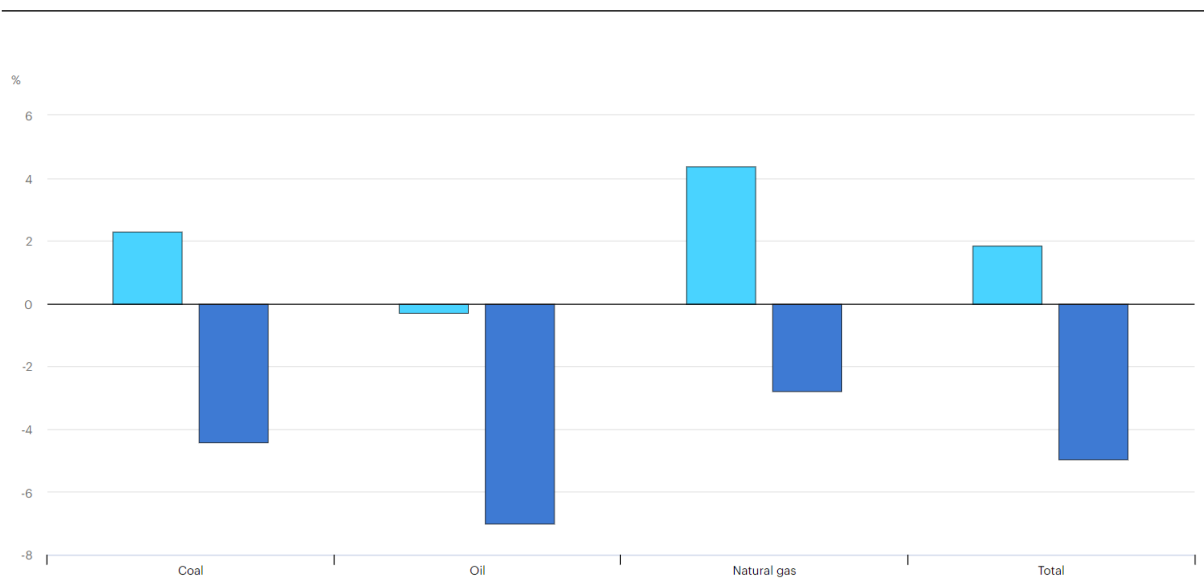


Figura 9: Cambio en la producción de energía mediante fuentes fósiles. Fuente: International Energy Agency

Las columnas de color celeste grafican el cambio en la producción entre los años 2018 y 2019, mientras que el color azul el cambio entre 2019 y 2020, mostrando una tendencia a la disminución en la producción de combustible utilizando combustibles fósiles.

Junto a lo previamente mencionado, en el siguiente gráfico, extraído de la International Energy Agency, se puede apreciar la evolución que ha tenido la producción energética por tipo de fuente desde el año 1971 hasta el 2019, graficado como una proporción del total de energía generada para el respectivo año.

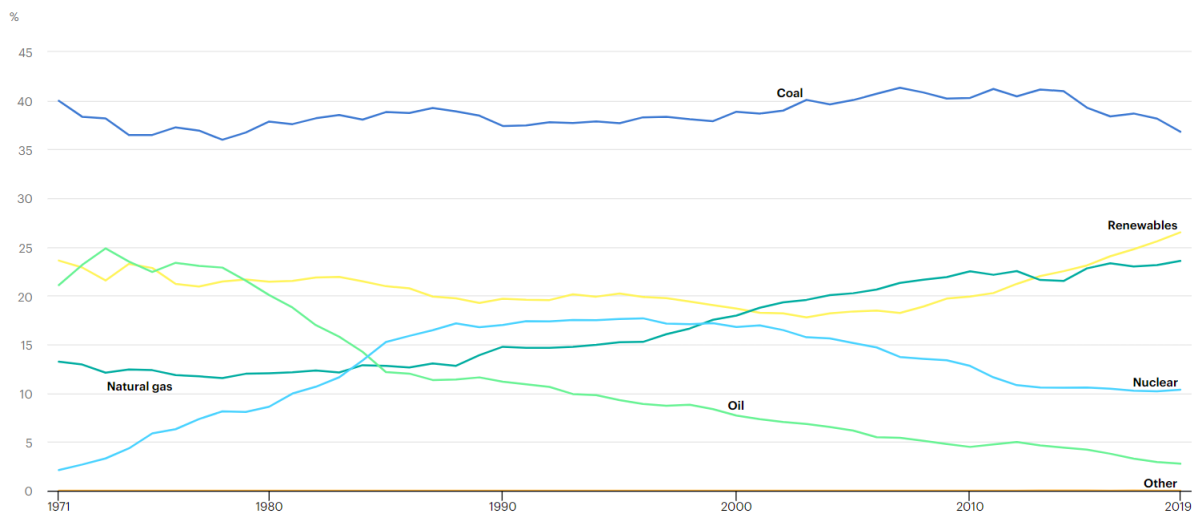


Figura 10: Evolución mundial de la generación de energía por tipo de fuente entre los años 1971 y 2019. Fuente: International Energy Agency

En este se aprecia que la mayor cantidad de energía generada es mediante la utilización de carbón, seguida por fuentes renovables. Por otra parte, existe una caída en la proporción asociada a la producción de energía mediante petróleo. La fuente productiva del tipo gas natural ha aumentado de manera importante en relación con los años estudiados y finalmente la energía nuclear experimento un aumento importante en los primeros años, pero en los años cercanos ha experimentado una leve caída.

4.2.2. Chileno

Con respecto a la generación energética chilena, en el siguiente gráfico, extraído del Anuario CNE 2020, se aprecia la generación eléctrica bruta a nivel país.

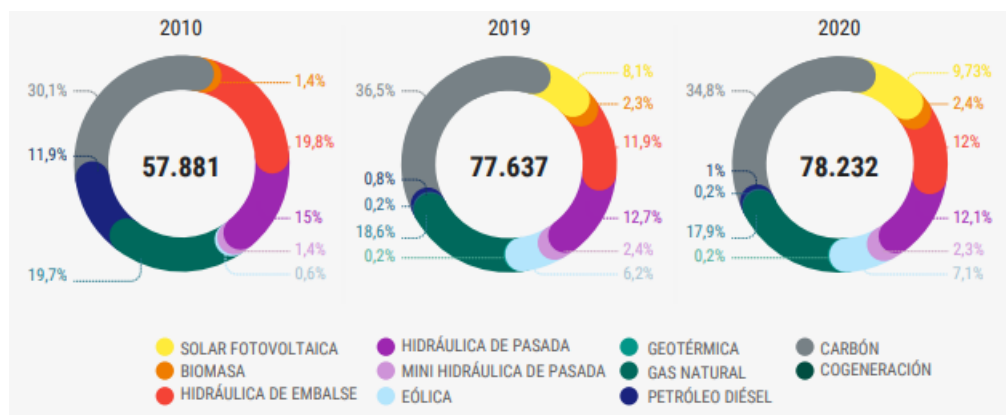


Figura 11: Generación eléctrica chilena para el año 2019 por tipo de fuente. Fuente: Anuario CNE 2020

En el año 2019, la generación eléctrica principal fue llevada por el Sistema eléctrico nacional, con un total de 77.090 GWh. Los sistemas en conjunto, incluyendo los sistemas SSMM Aysén, Magallanes y Los Lagos, alcanzaron un total de 77.637 GWh de electricidad producida (Anuario CNE 2020).

Junto a esto, en el siguiente gráfico se aprecia la evolución de la generación de electricidad desde el año 2010 hasta el 2020, mostrando además el porcentaje de energía generada por cada uno de los sistemas. Cabe destacar que en el año que el día 27 de noviembre del año 2017 el sistema interconectado del norte grande y el sistema interconectado central se unen, formando el sistema eléctrico nacional (Histórica interconexión eléctrica SIC – SING, Generadoras de Chile.)

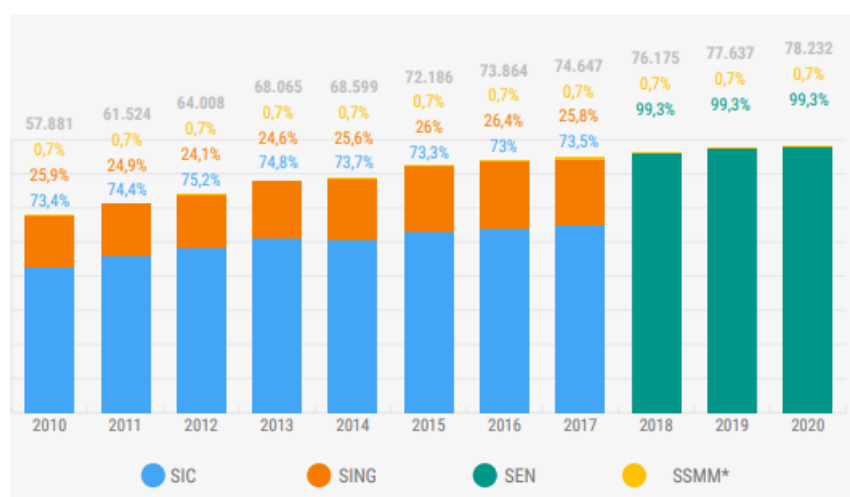


Figura 12: Evolución de la generación eléctrica bruta por sistema en GWh. Fuente: Anuario CNE 2020

Finalmente, en la siguiente tabla se muestra la energía producida por diferentes tipos de fuentes y la cantidad de energía exportada e importada para el año 2019. La información correspondiente fue extraída del documento "Matriz energética y eléctrica en Chile" redactado por el autor Nicolás García Bernal.

Energético	Producción bruta	Importación	Exportación
Petróleo Crudo	1.814,68	101.073,63	-
Gas Natural	14.257,15	42.259,88	-
Carbón	5.992,69	67.045,03	-
Biomasa	80.747,58	-	-
E. Hídrica	18.438,68	-	-
E. Eólica	4.209,89	-	-
E. Solar	5.519,96	-	-
Biogás	1.011,44	-	-
Geotermia	1.737,20	-	-
Total	133.729,27	210.378,54	0,00

Figura 13: Energía producida por tipo de fuente para el año 2019. Fuente: Matriz energética y eléctrica en Chile

4.3. Transporte Marítimo de Carga:

4.3.1. Tipos de Barcos:

Según la armada de Chile, la flota mercante a nivel nacional cuenta con un total de 266 barcos encargados de distribuir mercaderías a lo largo del país. En la siguiente imagen, extraída de la subsecretaría de transporte, se pueden apreciar las diferentes rutas realizadas por los diferentes barcos a nivel nacional en el año 2016.

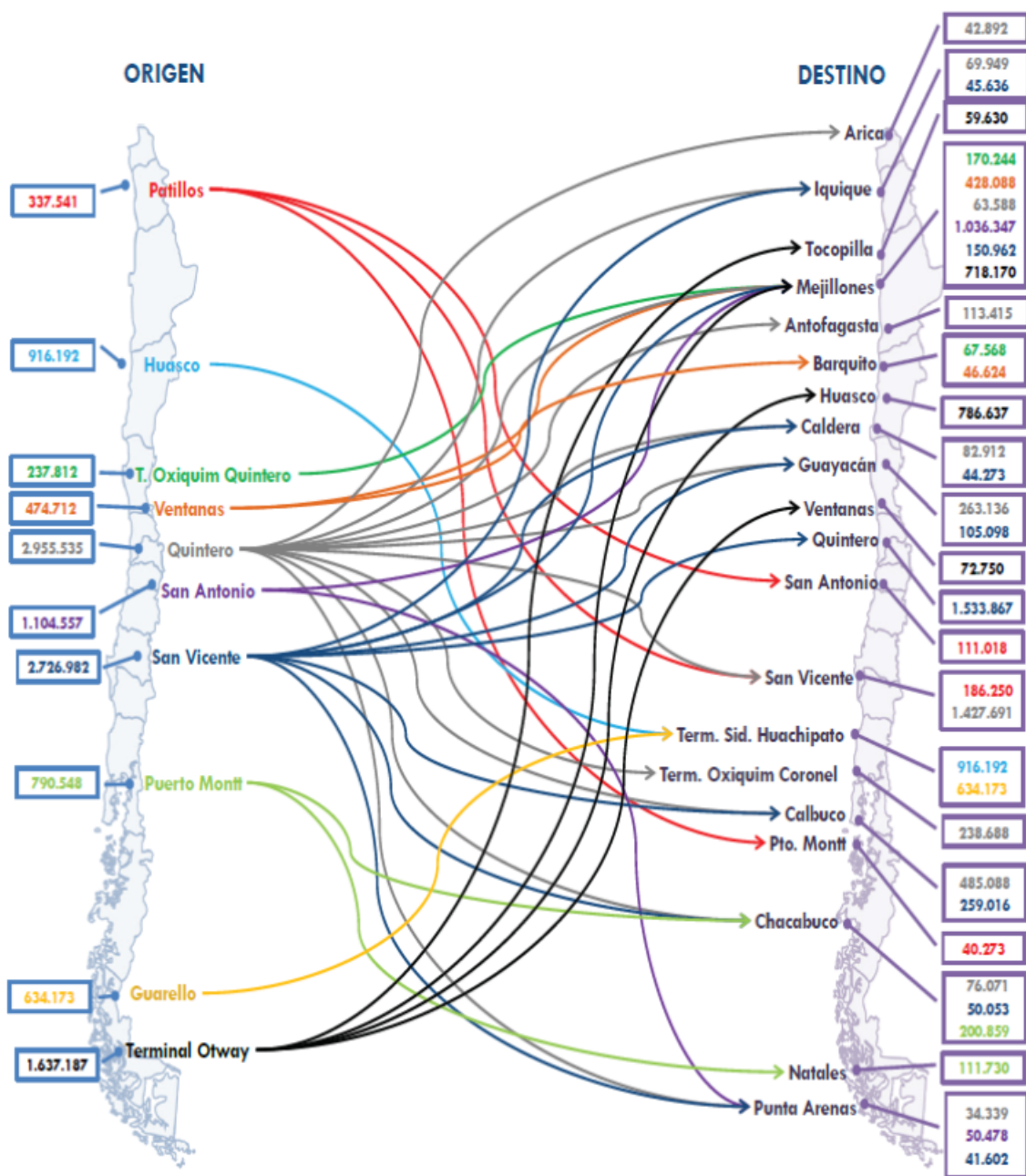


Figura 14: Rutas realizadas por diferentes navíos mercantes a nivel nacional el año 2016.
Fuente: Subsecretaría de Transporte.

En la siguiente tabla, elaborada a partir del boletín estadístico marítimo del año 2021, elaborado por la armada chilena, se encuentran los diferentes países y la cantidad de barcos elaborados en estos.

País de Construcción	Cantidad de Barcos Ensamblados
Alemania	11
Argentina	9
Australia	2
Bulgaria	1
Chile	129
China	14
Corea	8
Corea del Sur	3
Cuba	1
Dinamarca	12
EE. UU	5
España	4
Francia	3
Grecia	7
Holanda	9
Inglaterra	6
Islandia	1
Italia	2
Japón	11
Malasia	3
Noruega	10
Nueva Zelanda	1
Perú	6
Polonia	1
Rumania	2
Rusia	1
Serbia	1
Sin registro	1
Turquía	1
Ucrania	1

Figura 15: Registro que contiene el país de construcción de los buques y la cantidad de estos. Fuente: Boletín Estadístico Marítimo.

Con base en esto último, el presente estudio busca plantear una medida para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para el transporte de tipo carga general. Esto último se debe a la cantidad de navíos de este tipo.

Finalmente, sobre la base de este boletín, se construye la siguiente tabla que incluye los diferentes tipos de naves, la cantidad existente de cada una de ellas y el tonelaje T.R.G, T.R.N y T.D.W promedio para cada uno de estos.

Tipo de nave	Cantidad	Promedio Tonelaje		
		T.R.G	T.R.N	T.D.W
Barcaza	3	469	141	345
Carga General	140	658	297	841.0
Carga Rodada	3	6.377	1.921	4.351
Científico	1	95	28	170
Embarcación Deportiva Costera	6	120	65	42
Embarcación Deportiva de Alta Mar	1	145	43	29
Granelero	6	17.478	13.591	28.155
Lancha de apoyo práctico	4	122	37	28
Pasaje	5	1.908	640	312
Pasaje Cabotaje	19	352	124	153
Pasaje Transbordo Rodado	9	2.730	1.014	940
Petrolero	13	13.118	8.459	29757
Portacontenedor	5	21.598	9.529	26.897
Supply Vessel	2	635	191	715
Tanque Químico	5	20.248	9526	33530
Transbordador	44	702	218	424

Figura 16: Registro de buques que incluyen el tipo de nave, la cantidad de estos, y los tonelajes promedio para estos. Fuente: Boletín Estadístico Marítimo.

4.3.2. Tipos de Motores:

Los motores asociados a la movilización marítima se clasifican en tres grupos, los cuales se diferencian con base en su velocidad de operación de cada uno de estos. En la primera categoría se encuentran los motores lentos o de velocidad baja, los cuales cuentan con velocidades entre 60 y 300 [rpm], seguidos por los motores de velocidad media, considerados entre las 300 y 1000 [rpm]. Finalmente, se encuentran los motores de alta velocidad, los cuales rondan valores entre 1000 y 3000 [rpm] (Cooper y Gustafsson, 2004).

Junto a esto, los diferentes navíos cuentan con motores principales, auxiliares y de emergencia. El primero de estos es el encargado de la movilización principal del navío, rondando las velocidades bajas y medias. Por otra parte, el motor auxiliar es el encargado de la satisfacción de la demanda energética del navío, como pueden ser iluminación, ventilación,

entre otros factores, los motores asociados a estas operaciones son de velocidades medias o altas. Finalmente, está el motor de emergencia, el cual es el encargado de suplir al motor auxiliar cuando este falla y tiende a contar con las mismas características que este último (Pino A., 2017).

4.3.3. Contexto energético del transporte marítimo y sus emisiones

En ámbitos generales, el transporte es uno de los sectores que más energía consume a nivel mundial, correspondiente al 22 % del consumo total de energía (CEPAL 2019). Lo que se puede ver plasmado en el siguiente gráfico.

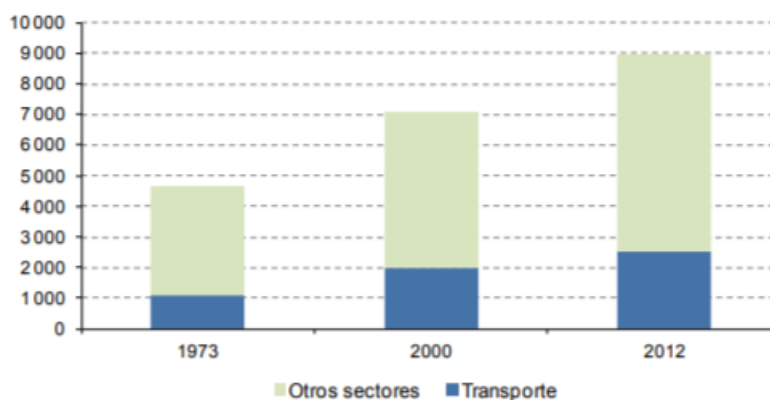


Figura 17: Consumo energético mundial. Fuente: CEPAL, Recursos naturales e infraestructura: transporte marítimo y puertos, 2019

Además, es el sector industrial que más combustible derivado del petróleo consume, seguido por los usos no energéticos, la industria y otros sectores respectivamente. Las razones específicas de estos consumos se pueden apreciar en la siguiente gráfica.

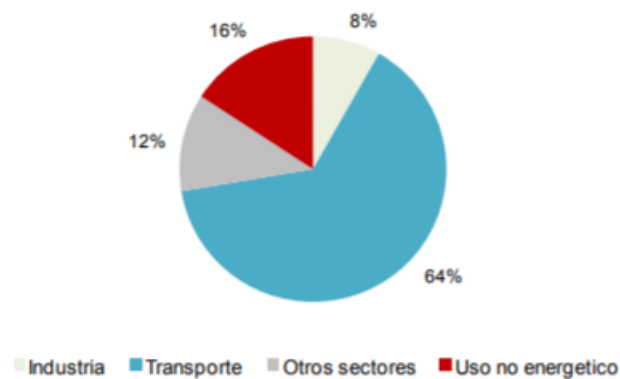


Figura 18: Consumo mundial de petróleo o derivados. Fuente: CEPAL, Recursos naturales e infraestructura: transporte marítimo y puertos, 2019

El transporte comercial vía marítima concentra un 80 % del volumen del comercio internacional y transporta más del 70 % de su valor (UNCTAD, 2018). En el siguiente gráfico se pueden apreciar las toneladas transportadas por buques contenedores entre los años 1980 y 2017.

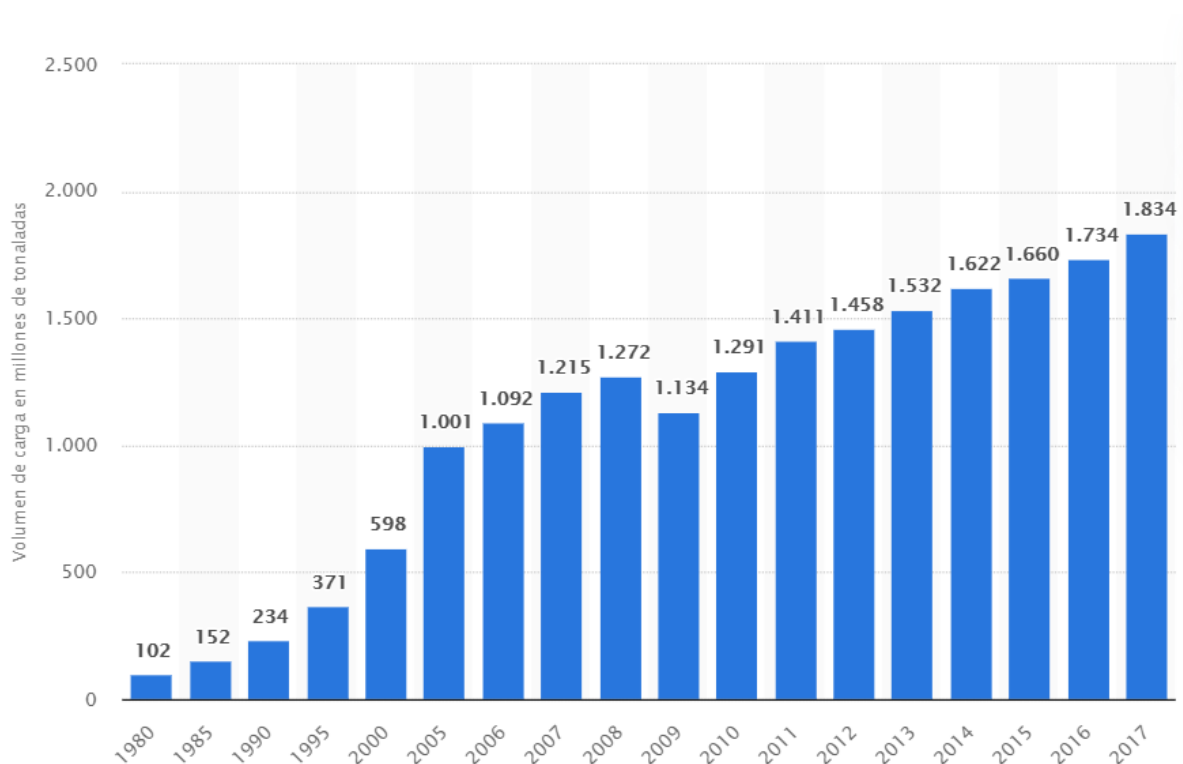


Figura 19: Volumen de carga vía marítima por buques portacontenedores en millones de toneladas entre los años 1980 y 2017. Fuente: Statista

Se puede apreciar en este una tendencia creciente al transporte comercial vía marítima, lo que conlleva en un aumento de emisiones. Entre las principales emisiones generadas por la quema de combustibles en esta área se encuentra el óxido de nitrógeno y el dióxido de azufre

Alrededor de un 80 % de los combustibles utilizados para la movilización comercial vía marítima es el petróleo pesado, el cual contiene una gran concentración de azufre. Cabe destacar que el consumo de combustible dependerá de diferentes condiciones asociadas al buque, como pueden ser el tamaño y la velocidad.

Se estima que el 13 % de las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial provienen del transporte, tanto comercial como de pasajeros, siendo el tercer sector más contaminante,

después del consumo energético y la generación de energía.

En el contexto latinoamericano (muestra), en la siguiente imagen se encuentran el total de exportaciones vía marítima de cada país en toneladas para el año 2017.

País	Exportaciones totales del país por el modo marítimo, en toneladas	Exportaciones seleccionadas para la muestra, en toneladas	Porcentaje de la muestra en el total de exportaciones
Argentina	97 208 423	58 771 248	60,5%
Brasil	666 662 063	425 839 950	63,9%
Chile	59 918 197	38 973 381	65,0%
Colombia	152 230 471	94 348 533	62,0%
Ecuador	30 800 031	24 299 556	78,9%
México	490 974 810	217 412 042	44,3%
Perú	44 312 947	32 312 263	72,9%
Uruguay	6 140 748	4 307 481	70,1%

Figura 20: Exportaciones realizadas mediante vía marítima para muestra en el año 2017. Fuente: Hacia la descontaminación del transporte marítimo del comercio internacional: metodología y estimación de las emisiones de dióxido de carbono, Cepal, Naciones Unidas

Lo que se traduce en lo expuesto en la siguiente tabla con respecto a las emisiones de dióxido de carbono para cada país de la muestra.

	Emisiones de CO2, kg equivalente
Argentina	1.032.023.218
Brasil	4.800.145.548
Chile	551.766.199
Colombia	612.711.088
Ecuador	136.416.416
México	3.710.432.407
Perú	368.969.653
Uruguay	74.159.653

Figura 21: Emisiones totales de dióxido de carbono para cada país de la muestra. Fuente: elaboración propia con información de Cepal, Naciones Unidas.

Lo que plasma la necesidad de encontrar una alternativa para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, planteando como opción la utilización de hidrógeno elaborado por fuentes renovables para sustituir a los convencionales y así reducir el impacto medioambiental que generan.

4.4. ¿Qué es el Hidrogeno?

4.4.1. Definición:

El Hidrógeno corresponde al primer elemento de la tabla periódica, formado exclusivamente por un protón y un electrón, siendo además el elemento más ligero del mundo, siendo este casi quince veces más ligero que el aire (Centro Nacional de Hidrógeno).

Cuenta con diferentes características, las cuales se encuentran a continuación:

Propiedades	Hidrógeno
Densidad (gas)	0,089 kg/m ³
Densidad (líquido)	70,79 kg/m ³
Punto de ebullición	-252,76 °C
Energía	120,1 MJ/kg
Densidad Energética	0,01 MJ/L
Velocidad de inflamación	346 cm/s
Energía de ignición	0,02 MJ

Figura 22: Propiedades del Hidrógeno. Fuente: Copa D., Economía del Hidrógeno hasta 2030. Universidad Politécnica de Madrid (2020)

4.4.2. De donde proviene:

El Hidrógeno es el elemento químico más abundante del mundo, siendo este equivalente al 75 % de los elementos en el mundo, aunque es extraño encontrarlo en estado puro, ya que generalmente se encuentra unido a otros elementos, como puede ser el oxígeno, formando moléculas de agua, entre otros elementos. Cabe destacar que también se puede encontrar este elemento químico en la materia orgánica, ya que una gran parte de esta corresponde a agua.

4.4.3. Tipos de Hidrógeno:

Existe una variedad importante de tipos de Hidrógeno, los cuales se diferencian principalmente en los métodos de producción de este y el tipo de combustible que se utiliza para su generación. Inicialmente, se encuentran el Hidrógeno gris, negro y marrón, los cuales provienen del carbón y el gas natural, seguidos por el hidrógeno azul, el cual proviene de combustibles fósiles, como por ejemplo el petróleo o sus derivados, y finalmente está el hidrógeno verde, el cual proviene a partir de energías renovables ("Economía del Hidrógeno hasta 2030", Copa D.).

Según la estrategia nacional de hidrógeno verde chilena, a lo largo del país se cuenta con un potencial productivo de 160 Mton de hidrógeno anuales. En la siguiente imagen se visualiza los costos de producción de hidrógeno para diferentes zonas alrededor del mundo, mostrando que Chile cuenta con un gran potencial productivo gracias a sus condiciones climáticas y ambientales en la zona norte y sur del país.

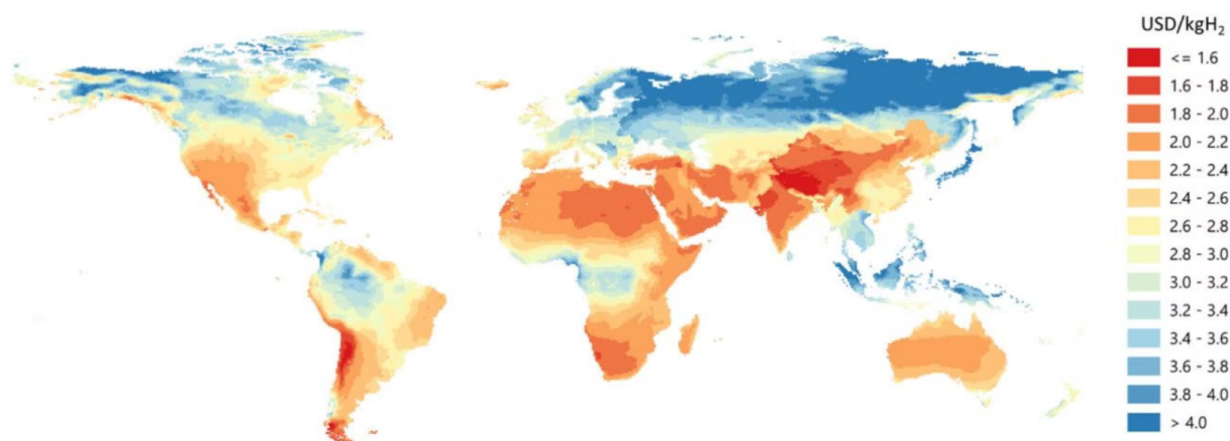


Figura 23: Costo del hidrógeno de los sistemas híbridos de energía fotovoltaica y eólica en el largo plazo. Fuente: International Energy Agency

4.4.4. Proyección de costos de producción y oferta de Hidrógeno verde en Chile:

En la estrategia nacional de hidrógeno verde chilena, se estiman los costos de producción de este entre los años 2025 y 2050, los cuales se presentan en la siguiente imagen:



Figura 24: Proyección de costos nivelados de producción de hidrógeno verde en Chile en USD por kg entre los años 2025 y 2050, separados por zona de producción. Fuente: Estrategia Nacional de Hidrógeno verde.

4.4.5. Contexto Mundial del Hidrógeno verde

La industria del hidrógeno verde nace gracias a la descarbonización planteada como solución a los problemas medioambientales, gracias a la sustitución de energías convencionales por renovables. A nivel mundial, la utilización del hidrógeno ha sido abundante, principalmente en lo que son los procesos de creación de amoníaco para la industria farmacéutica o en la refinación de combustibles fósiles (Jimenes, 2020), para posteriormente

utilizarse en diferentes industrias emergentes como pueden ser la electromovilidad o el almacenaje de energía.

Diferentes países han visto una oportunidad en esta nueva industria, como pueden ser Japón, Alemania o Estados Unidos, contando con diversas políticas asociadas a fomentar el auge de las industrias, como pueden ser centros de recarga de hidrógeno o diferentes planes asociados a la importación y exportación de hidrógeno (Mansilla, 2021).

4.4.6. Estrategia nacional de Hidrógeno verde:

Chile cuenta con una estrategia clara y precisa con respecto a la producción y a la utilización de hidrógeno, contando con un consejo asesor, realizando diferentes actividades con el fin de generar esta última. Mediante esta estrategia se busca fomentar el crecimiento de la industria y así fomentar la descarbonización, buscando darle diferentes usos presentados en la siguiente figura.

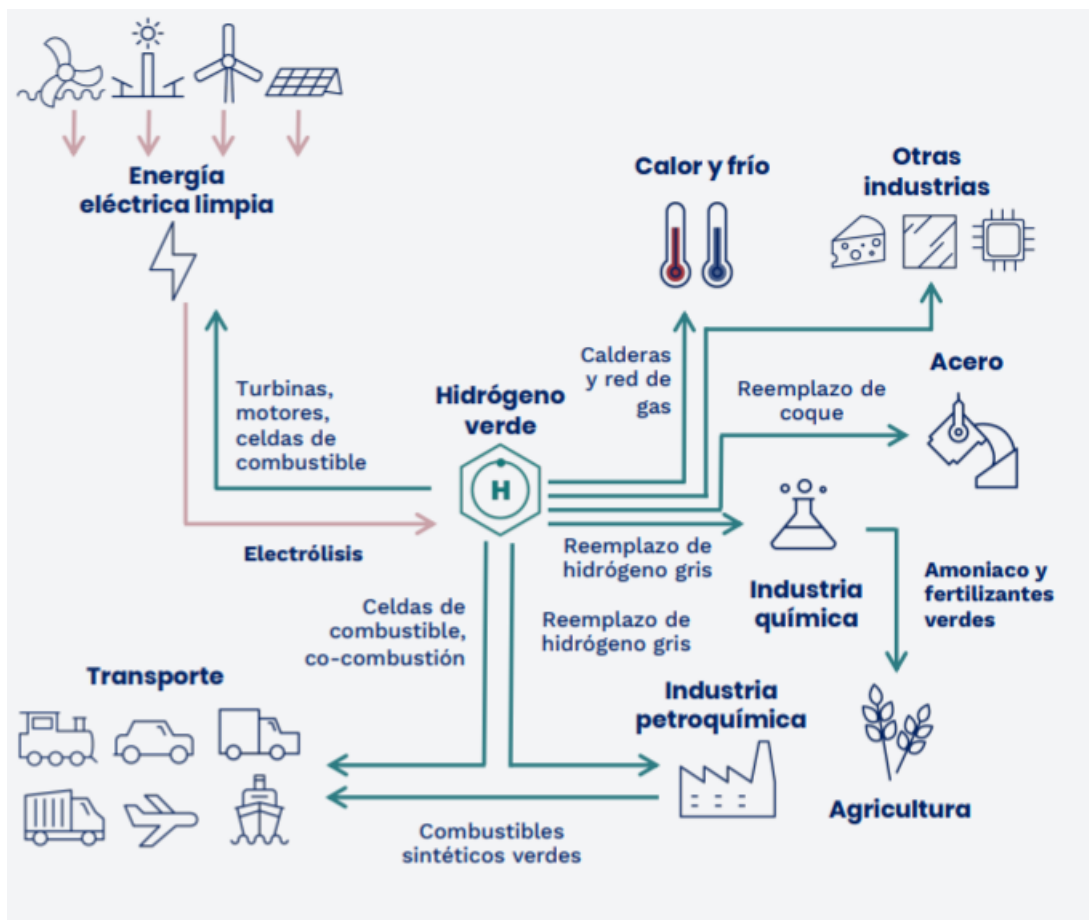


Figura 25: Potencial de descarbonización del hidrógeno verde. Fuente: Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde.

La estrategia Chilena cuenta con 3 etapas, la primera asociada a la activación de la industria a nivel nacional con el fin de crear un mercado local, para posteriormente entrar a los mercados nacionales y finalmente explotar las economías de escala y sinergias para afianzarse como un proveedor global ("Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde, Ministerio de Energía). Ligando el primer paso a un financiamiento de 50 millones de dólares para la adquisición de electrolizadores.

4.4.7. Características del Hidrógeno:

El hidrógeno es la sustancia más abundante del planeta, pero no se encuentra libremente en la naturaleza, sino a otras partículas como pueden ser el oxígeno, nitrógeno o a otra partícula de hidrógeno. Es el átomo más liviano al solo poseer un protón y un electrón, contando con un peso molecular cercano a 1 [g/mol].

En su forma compuesta por 2 átomos de hidrógeno, cuenta con un poder calorífico de 33,3 [kWh] la unidad, considerablemente mayor al diesel y gas natural con un 10,2 y 9,6 [kWh] la unidad (Jiménes, F., 2020).

4.4.8. Usos del Hidrógeno en la actualidad

- Uso como almacenamiento de energía proveniente de fuentes renovables:

Según Carlos Fúnes y Lorezo Reyes, miembros de la universidad autónoma de Chile, debido a la variabilidad de la producción de energía por parte de estas fuentes, no necesariamente esta coincide con la demanda requerida para ese momento, por lo la necesidad de almacenarla ha sido un foco importante de discusión.

Gracias a esto se comenzó a utilizar el hidrógeno como fuente de almacenamiento. Cuando existe una producción superior a la demanda de energía, está sobrante se transmite a un electrolizador, el cual, utilizando como materia prima agua, genera hidrógeno mediante un proceso de electrólisis, para posteriormente ser almacenado.

Cuando la demanda es superior a la producción, este hidrógeno almacenado pasa a una celda de combustible, tecnología que realiza un proceso inverso al electrolizador, uniendo partículas de oxígeno con hidrógeno, generando como residuo agua, calor y

energía. Esta última finalmente es inyectada al sistema para así complementar a la producción.

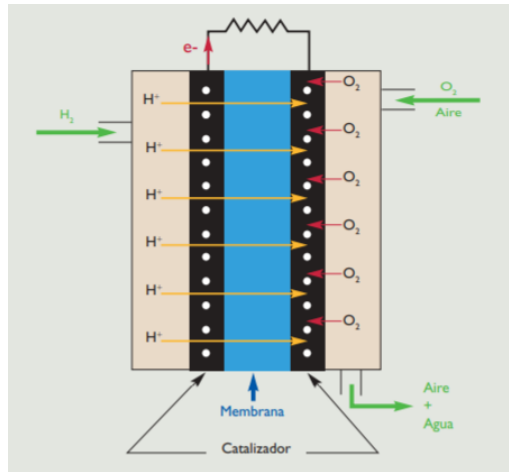


Figura 26: Celda de combustible genérica, Juan Jose Dominguez (2002)

Junto a este proceso, el hidrógeno también puede ser utilizado en plantas de ciclo simple o combinado, para así producir electricidad.

- Uso como combustible alternativo:

Al igual que en el punto anterior, los autores Carlos Fúnes y Lorenzo Reyes plasman el auge del hidrógeno verde en la industria del transporte, tanto de pasajeros como de carga, tanto público como privado. Se estima que para el año 2030 se estima una cuota aproximada de 12 % de vehículos movilizandos utilizando este vector energético.

Existen 3 formas de utilizar hidrógeno como fuente de energía para vehículos. El primero es mediante un motor de combustión interna que utiliza como combustible hidrógeno o una mezcla entre este con algún tipo de combustible fósil. Pero al ser motores de combustión, no son libres de emisiones. Otro tipo de motor utilizado es el que utiliza celdas de combustible para generar electricidad mediante hidrógeno, siendo

así un tipo de vehículo que no genera emisiones de GEI. Finalmente, el hidrógeno busca utilizarse también en vehículos eléctricos, funcionando como un complemento. A estos últimos se les instala un sistema de almacenamiento y una celda de combustible para así generar energía eléctrica mediante un proceso de electrólisis.

Cabe destacar además de la alta eficiencia del hidrógeno, en comparación con el diesel, ya que 1kg de hidrógeno es equivalente a 3,5 litros de diesel, además de que las celdas de combustible son el doble de eficientes que un motor de combustión interna (Fúnes y Reyes, 2002).

- Uso en la fabricación de explosivos:

En este ámbito, el hidrógeno se usa principalmente en la elaboración de nitrato de amonio, utilizado principalmente en Chile para la elaboración de explosivos del tipo ANFO, los cuales cuentan con componentes no explosivos en su fórmula. Este último es principalmente usado en la industria minera para abrirse paso en los yacimientos. El nitrato de amonio es utilizado en la elaboración de todos los explosivos utilizados en la actualidad, por lo que el hidrógeno es altamente demandado en esta industria (Fúnes y Reyes, 2002).

- Uso en las fundiciones de cobre:

En esta industria se utiliza principalmente en el proceso de refinación de cobre, donde entro a reemplazar al diesel, gas natural y vapor de agua, para así reducir el impacto en ámbito de emisiones de gases de efecto invernadero en el proceso de reducción del material (proceso que busca remover el exceso de oxígeno utilizado en la etapa de oxidación, en la cual se busca remover las impurezas encontradas en el mineral)

(Fúnes y Reyes, 2002).

4.4.9. Tecnologías existentes asociadas al uso de Hidrógeno

- Celdas de combustible:

Su funcionamiento se basa en la unión de átomos de hidrógeno con átomos de oxígeno, liberando como resultado agua, calor y energía, la cual es transformada en electricidad. Cuenta con dos electrodos, un cátodo y un ánodo, sumergidos en un baño electrolítico, los cuales se encuentran separados por una membrana.

Existen diferentes tipos de celdas, los cuales varían dependiendo del tipo de electrolito o el combustible utilizado. Las celdas más comunes son las del tipo alcalinas, las cuales utilizan como electrolito hidróxido de potasio, contando así con un 70 % de eficiencia (Dominguez J., 2002).

- Electrificadores:

Los electrificadores utilizados en la industria realizan un proceso contrario a las celdas de combustible, buscando separar los átomos de agua en hidrógeno, liberando oxígeno. Cuentan con cuatro componentes, siendo estos las celdas, electrodos, una diafragma y un baño electrolítico.

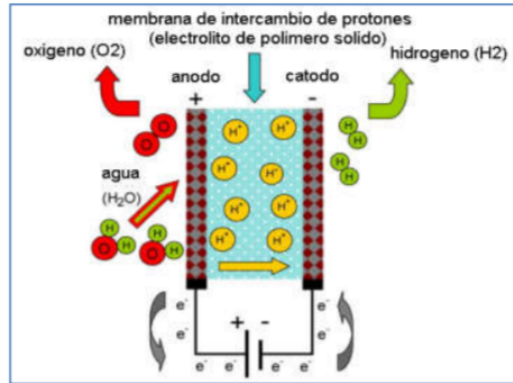


Figura 27: Funcionamiento electrificador alcalino. Fuente Soto O., Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrólizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada, Universidad de Chile

■ Motores de Combustión interna:

El hidrógeno cuenta con ciertas características que permiten que este sea utilizado para motores de combustión interna, los cuales se encuentran a continuación:

- Amplia gama de inflamabilidad.
- Baja energía de ignición.
- Pequeña distancia de apagado.
- Temperatura de autoignición elevada.
- Alta velocidad de llama en condiciones estequiométricas.
- Elevada difusividad.
- Muy baja densidad.

La idea de un motor de combustión interna que utiliza hidrógeno como combustible primario no es tan reciente, data de año 1820, donde W. Cecil presenta un trabajo de

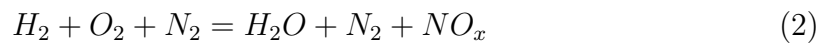
un motor que funcionaba basándonos en el principio del vacío, el cual era generado mediante la quema de una mezcla de hidrógeno y aire (Fabrega, M. 2009).

La combustión de hidrógeno contribuye a la reducción de las emisiones de CO, CO, HC Y NOx, ya que esto solo produce vapor de agua en presencia de oxígeno puro y también NOx cuando trabaja con aire y a temperatura de combustión adiabática alta (Alarcon, F., Riquelme, A., Peralta, J., Cruz, J., Vargas, A. y Valero, W.).

Con respecto a las emisiones generadas por la combustión de hidrógeno y oxígeno, esta solamente produce agua, lo cual se presenta en la siguiente relación estequiométrica:



Caso diferente ocurre cuando la mezcla que combustiona es entre hidrógeno y aire, la cual se rige bajo la siguiente relación estequiométrica:



Esta combustión libera óxido de nitrógeno, cuya cantidad liberada depende de los siguientes factores:

- La relación aire/combustible.
- La relación de compresión del motor.
- Velocidad del motor.
- Regulación del encendido.

- Disolución térmica utilizada.

Cabe destacar que a pesar de lo ya mencionado, existe la posibilidad de generar monóxido o dióxido de carbono, debido al filtrado de aceite dentro de la cámara de combustión.

En los siguientes gráficos, extraídos del documento "Hidrógeno, aplicaciones en motores de combustión interna", se pueden comparar las emisiones generadas por un motor de hidrógeno versus uno convencional, donde Phi corresponde a la relación aire/combustible estequiométrica dividida por la relación real.

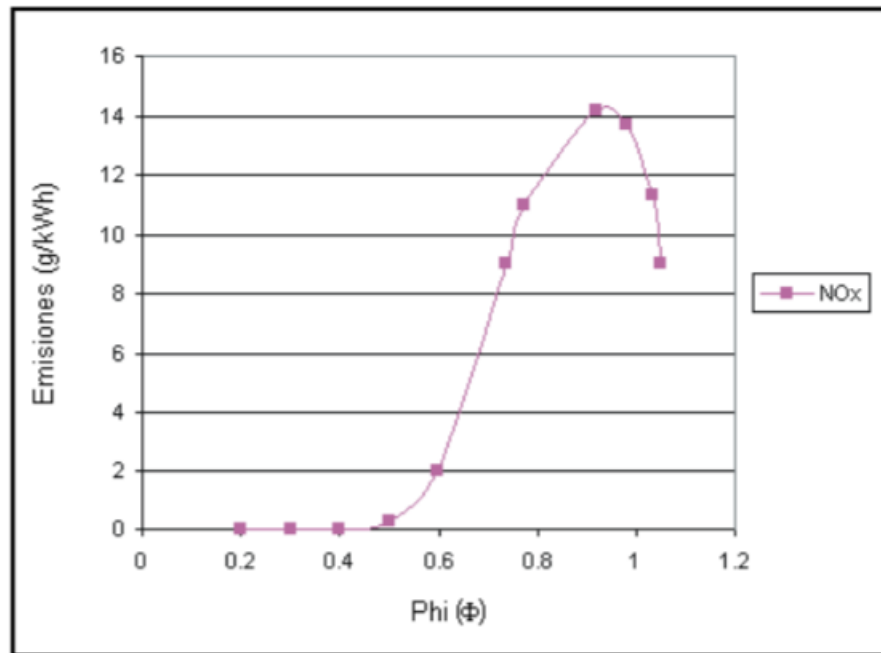


Figura 28: Emisiones generadas por un motor de combustión de hidrógeno y aire. Fuente: Hidrógeno, aplicaciones en motores de combustión interna.

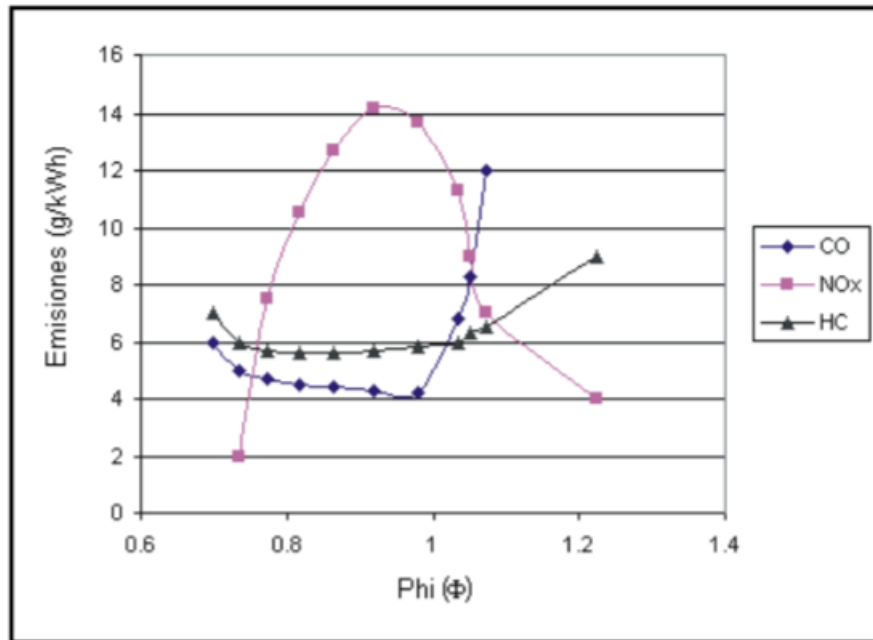


Figura 29: Emisiones generadas por un motor de combustión de gasolina. Fuente: Hidrógeno, aplicaciones en motores de combustión interna.

- Motor de combustión de hidrógeno y diesel:

"Los sistemas duales consisten en usar una cantidad relativamente pequeña de hidrógeno para modificar las características de la combustión y de las emisiones, o bien usar cantidades mayores de hidrógeno como fuente principal de energía y controlar el encendido mediante la inyección de otro combustible dentro de la cámara de combustión."(Xaudaró, C.)

El documento Inyección de Hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales- edactado por Crístian Familiar Xaudaró menciona el sistema para motores "Diesel-pilot ignited hydrogen combustión", en el cual la cantidad de hidrógeno oscila entre el 65 % y el 95 % de la energía. Este sistema incluye la utilización de diesel debido a que el hidrógeno cuenta con una temperatura de ignición de 585°C para encender en un

motor de compresión, y se utiliza este combustible fósil para encender el hidrógeno, ya que cuenta con una temperatura de autoencendido de 252°C.

Un experimento utilizando las proporciones mencionadas anteriormente, realizado por Lambe y Watson, plasmo una reducción en las emisiones de humo entre 20 % y 80 %, además de una reducción de más del 70 % de óxido de nitrógeno.

Según el documento "Inyección de Hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales", existen tres métodos de introducción del hidrógeno al motor, los cuales corresponden a los siguientes:

- Enriquecimiento con hidrógeno o carburación: consiste en el enriquecimiento del aire mediante un carburador de gas. Es el método más simple de inyección, además de que es el que mejor permite pasar de un motor de gasolina a uno de hidrógeno."
- Sistema de inyección por conducto o colector: el hidrógeno puede ser inyectado utilizando inyectores, operados tanto de manera mecánica como electrónica. Si estos funcionan de manera mecánica, el sistema es del tipo volumen constante. Por otra parte, si el inyector funciona de forma electrónica, el sistema es de inyección electrónica de combustible.
- Inyección directa: el hidrógeno se inyecta de forma directa a la cámara de combustión. Es el sistema de inyección más eficiente, además de que existen dos inyectores usados en este sistema, los del tipo LPDI y HPDI.

Con base en el mismo documento mencionado, las emisiones generadas por estos tipos

de motores corresponden principalmente a 3, las cuales se presentan a continuación:

- Humo e Hidrocarburos: "La composición de los humos depende del combustible que se usa y de las condiciones de combustión en que se quema este. Las partículas del humo se componen generalmente de cenizas o carbonilla, generada por el carbono que se encuentra en el carburante."
- Dióxido y Monóxido de Carbono: los siguientes gráficos muestran el nivel de emisiones de este tipo de gases en relación con la carga del motor y al tipo de combustible utilizado.

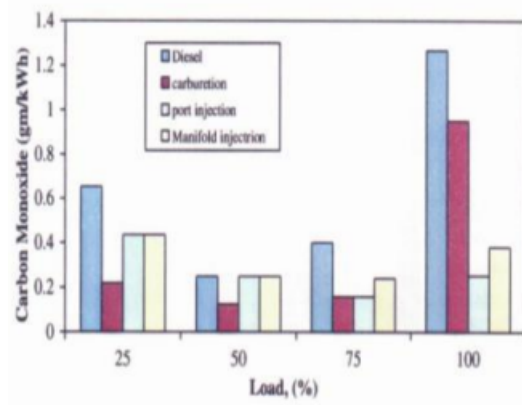


Figura 30: Emisiones de monóxido de carbono en gm/KWh, en relación con la carga del motor y al tipo de combustible. Fuente: "Inyección de Hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales"

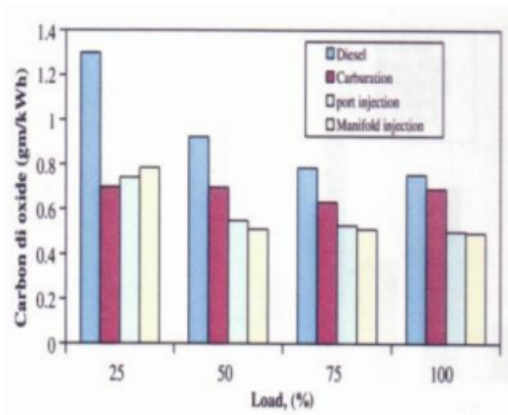


Figura 31: Emisiones de dióxido de carbono en gm/KWh, en relación con la carga del motor y al tipo de combustible. Fuente: "Inyección de Hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales"

- Óxidos de Nitrógeno.

El último gas generado por este tipo de motores fue explicado con anterioridad en el apartado de motores de combustión interna.

5. Metodología:

5.1. Levantamiento de Información:

La información necesaria para la presente memoria será extraída principalmente de fuentes del tipo web, principalmente correspondientes a memorias antiguas de diversas universidades y de papers, estudios y experimentos realizados con respecto al tema, extraídos principalmente de Google académico.

Dentro de la información necesaria se requieren dos experimentos con respecto a la modificación de los motores a evaluar, tanto el de combustión total de hidrógeno o para el motor de combustión de diesel e hidrógeno. Además de esto, para el análisis de factibilidad técnica, se requiere información con respecto a la cantidad de energía generada tanto por los motores evaluados como para la celda de combustible.

Con respecto a la elaboración del estudio de factibilidad económica, serán necesarias las proyecciones de los costos de los componentes necesarios para realizar las modificaciones de los motores evaluados, además de la proyección de los costos de una celda de combustible. Junto a esto, es importante considerar también la evolución de los costos de los combustibles involucrados.

Para el estudio de factibilidad ambiental, es necesaria información con respecto a las emisiones realizadas por cada uno de las opciones evaluadas, tanto de dióxido de carbono como de los diversos óxidos de nitrógeno. Finalmente, se requerirá de información con respecto al contexto actual de emisiones en el transporte marítimo.

5.2. Estudio de Factibilidad Técnica:

El estudio de factibilidad técnica propuesto corresponde principalmente a la evaluación de la viabilidad en la implementación de las diferentes opciones propuestas como alternativas para los motores convencionales.

Los factores a evaluar en el caso del motor de combustión interna de hidrógeno serán:

- Existencia de la tecnología necesaria para realizar una modificación a un motor de diesel convencional utilizado en el transporte de carga marítimo.
- Energía necesaria para movilizar el buque de carga tanto en un escenario pesimista (ruta más larga dentro de Chile) como en una distancia promedio dentro de Chile, con relación a la cantidad de combustible utilizado.
- Disminución de la capacidad de carga del buque debido a las modificaciones o a la cantidad de combustible necesario para movilizar este último.

Con respecto a los factores a evaluar para un motor de co-combustión de diesel e hidrogeno, estos son los siguientes:

- Existencia de la tecnología necesaria para realizar una modificación a un motor convencional de diesel para que funcione con una mezcla de combustible entre hidrógeno y diesel.
- Energía necesaria para movilizar un buque de carga tanto en un escenario pesimista como uno promedio en Chile, y determinar la cantidad de combustible necesario para esto. En este caso, es importante evaluar opciones con respecto a la proporción de hidrógeno y diesel.

-
- Estimar si existe una disminución de la capacidad de carga debido a la modificación del motor o al aumento del almacenaje de combustible.

Finalmente, para la celda de combustible, se evaluarán los siguientes factores:

- Energía requerida para movilizar un buque de carga con característica en el promedio para escenarios tanto pesimista como distancias promedio dentro de Chile.
- Estimación del número de celdas de combustibles y de baterías requeridas para suplir la demanda de energía necesaria para la movilización del buque.
- Evaluar la disponibilidad de la tecnología para la implementación de esta para un buque de carga estándar.
- Estimar la disminución de la capacidad de carga debido al almacenaje de combustible y por la instalación de las diversas celdas de combustible.

5.3. Estudio de Factibilidad Económica:

El estudio de factibilidad económica a realizar consistirá de una proyección de los costos versus los beneficios generados por cada una de las medidas a nivel monetario.

En el caso de ambos motores, se evaluarán los costos proyectados de los componentes necesarios para realizar una modificación de los motores actualmente utilizados, además de evaluar los beneficios o pérdidas generadas por el cambio total o parcial del combustible utilizado.

Para la celda de combustible, se evaluará la evolución de los costos de esta directamente, comparándose esta inversión con los beneficios o pérdidas generados por el cambio total de combustible al hidrógeno, utilizando los valores proyectados del costo de producción del hidrógeno verde en Chile estimados por el Ministerio de Energía en la estrategia nacional de hidrógeno verde.

5.4. Análisis de impactos ambientales:

Este análisis consistirá en la estimación de las emisiones generadas por cada una de las alternativas propuestas anteriormente. Esta se realizará para ciertos gases, los cuales corresponden a los emitidos en mayor cantidad por parte de motores de combustión de diesel e hidrógeno, los cuales corresponden a dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

Además de esto, el análisis cuenta de una comparación con las emisiones promedio generadas por un motor convencional utilizado en para movilizar buques de carga para un escenario pesimista. (ruta más larga posible dentro del territorio chileno).

5.5. Comparación entre lo propuesto y el contexto actual en relación con la factibilidad ambiental:

Debido al contexto mundial actual, evaluar las medidas realizadas para mitigar los gases de efecto invernadero es importante, por esta razón, los resultados obtenidos en el estudio de factibilidad ambiental se evaluarán a nivel macro para los buques que cuentan con las condiciones estándar evaluadas en este estudio.

Con esta información, se realizará una comparación con el escenario de emisiones actual en el transporte marítimo y así estimar la reducción o aumento de gases de efecto invernadero en este sector, con el objetivo de generar diversas propuestas que permitan descarbonizar costo-efectivamente al sector del transporte marítimo e impulsar la industria del hidrógeno verde.

6. Desarrollo

6.1. Levantamiento de información

6.1.1. Motor seleccionado para el estudio

Para el desarrollo de la memoria, debido a la gran cantidad de motores disponibles para la movilización de buques de carga, se decidió seleccionar uno en particular de cuatro tiempos promedio. Por esta razón se seleccionó la línea YC6T de motores Yuchai.

Se seleccionó como motor principal del estudio al que posee una menor potencia nominal, correspondiendo este al motor YC6T390C, cuyas especificaciones se encuentran en la siguiente tabla.

	YC6T390C (1800rpm)
Configuración	Vertical en línea, 6 cilindros, 4 tiempos, inyección directa, refrigerado por agua
Diámetro x carrera	145x165
Aspiración	Turbocargado e inter-enfriado
Desplazamiento (L)	16.35
Relación de compresión	15.5:1
Potencia Nominal/ Velocidad (kW(HP))/r/min)	287(390)/1800
Consumo de combustible	≤195
Consumo de aceite	≤1
Rotación	En sentido contrario a las agujas del reloj (frente al volante)
Método de inicio	Eléctrico (arranque neumático es opcional)
Peso en seco (kg)	1980
Dimensiones del motor (L×W×H) (mm)	2125 ×1105 ×1645
Certificado	ZC, ZY, CCS, IMO

Figura 32: Especificaciones del motor YC6T390C de 1800 rpm. Fuente: Sitio web oficial de Yuchai.

Es importante destacar que el consumo de combustible del motor seleccionado corresponde a 65,841 lt/h.

La selección del motor en cuestión se realizó debido a la importancia de la empresa Yuchai en la industria asociada a la elaboración de motores. Además, este criterio considero las características del motor y si es compatible con el estudio en cuestión.

6.1.2. Celda de combustible seleccionada para el estudio

Existen una alta variedad de celdas de combustibles que cuentan con una amplia gama de diferencias entre ellas. Para el presente estudio se seleccionó una del tipo PEMFC, la cual utiliza como electrolito una membrana de polímero sólido.

La potencia de este tipo de celda de combustible se encuentra entre los 5 y 250 kW, y sus usos se limitan principalmente a lo que es el transporte y al sector residencial.

La elección se realizó considerando las condiciones de operación de las diversas celdas de combustible y la capacidad para movilizarlas debido a su tamaño o peligrosidad.

Por esto mismo, se seleccionó la pila de combustible marítima "Ballard's 200 kW system" diseñada por la empresa Ballard Power System, la cual cuenta con 200 kW de potencia nominal. Esta fue seleccionada por la gran presencia de la empresa en la industria productora de pilas de combustible, además de contra con las condiciones óptimas para su operación a bordo de un buque.

6.1.3. Modificaciones a un motor diesel para que funcione como motor de co-combustión de hidrógeno y diesel

Basándose en el documento "Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales", redactado por Cristian Familiar Xaudaróde de la facultad náutica

de Barcelona, el año 2011 propone, sobre la base de la disponibilidad de hidrógeno en el mercado, que para motores de cuatro tiempos, los cuales reducen las problemáticas derivadas al uso del hidrógeno como combustible.

Las principales modificaciones asociadas a motores de este tipo corresponden al sistema de inyección de hidrógeno que es necesario agregar. Esto último se debe a las bajas proporciones de este que se utilizan en estos tipos de motores de combustión interna (entre 5 % y 15 % de la energía).

6.1.4. Modificaciones a un motor diesel para que funcione totalmente con hidrógeno

Según el documento, "Hidrógeno. Aplicación en motores de combustión interna", redactado por Mark Fàbrega Ramos, de la Facultat de Nàutica de Barcelona, se plantean las diferentes modificaciones que debe sufrir un motor marino de combustión interna para que pueda funcionar utilizando hidrógeno como combustible, las cuales se presentan a continuación:

- Control del aceite del motor: utilizar un aceite más adecuado, además de utilizar pistones diferentes para disminuir la expansión térmica.
- Culata y refrigeración: se debe incrementar el flujo de refrigerante en cercanía a las bujías y a las válvulas de escape, mecanizar la cámara de combustión, aumentar la relación de compresión y usar stellita en los asientos de las válvulas.
- Sistemas de Ignición: .^{En} las más pobres relaciones aire/combustible (entre 130:1 y 180:1) la velocidad de la llama se reduce considerablemente, y es preferible

utilizar un sistema de doble bujía".

- Cambios estructurales: Reforzar aquellos elementos que transmitan fuerza, como bulones de los pistones, cigüeñal y bielas".
- Sistema de suministro de combustible: existen tres métodos de inyección de hidrógeno al motor, los cuales son descritos en el punto 3.4.8 del marco teórico.
- Ventilación del cárter del motor: Debe instalarse una válvula de descarga de presión y un sistema de ventilación en el cárter del motor para prevenir posibles incendios causados por el bajo límite de energía de ignición que posee el hidrógeno.
- Sistema de escape: Es importante diseñar un sistema de escape de agua que sea capaz de aguantar la corrosión, ya que la combustión de hidrógeno genera altas cantidades de esta que debe ser expulsada del sistema.
- Aceite lubricante: utilizar lubricantes sintéticos de baja volatilidad a elevadas temperaturas, para evitar que este se adiera a las paredes de los cilindros.

6.1.5. Proyecciones del precio de los combustibles asociados al estudio:

En el presente apartado se encuentran las diferentes proyecciones de precios requeridas para el estudio de factibilidad económica, siendo estas las correspondientes al petróleo diesel y al hidrógeno

- Diesel: para el presente estudio, se requiere conocer el comportamiento del precio del petróleo diesel para estimar la rentabilidad de las diferentes propuestas que

se trabajaran en la presente memoria. Para esto, se utilizará el siguiente gráfico, el cual fue presentado en la página 59 del informe preliminar presentado por el ministerio de energía.

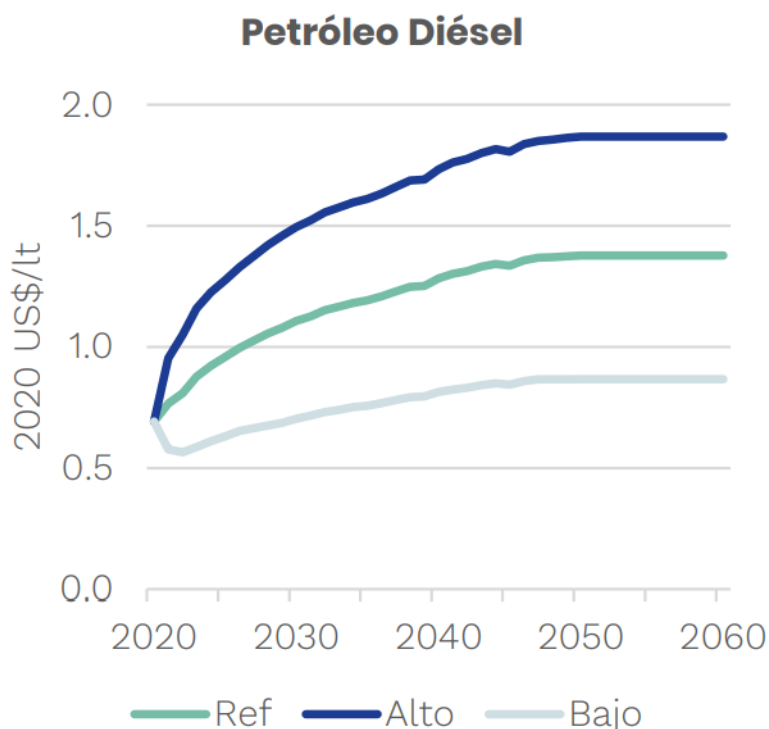


Figura 33: Proyección del precio del petróleo diesel desde el año 2020 hasta el 2060. Fuente: Ministerio de Energía.

- Hidrógeno: Como proyección del precio del hidrógeno se utilizara la figura 24 en el marco teórico, los cuales corresponden a costos de producción, lo que provoca la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad.

6.1.6. Emisiones de un motor de combustión enriquecido con hidrógeno

En el documento "Hydrogen assisted diesel combustion", se estima las emisiones de NOx generadas por dos motores, uno que funciona a 1800 rpm y otro a 3600 rpm,

separándolas en emisiones de NO y NO₂.

El documento determina que es importante para determinar las emisiones, el tiempo de inyección y la salida máxima de combustible, por lo que realiza diferentes experimentos realizando cambios en estas variables para determinar el comportamiento de las emisiones.

En este estudio, se utilizarán los casos asociados al motor de 1800 rpm, los cuales se presentan a continuación.

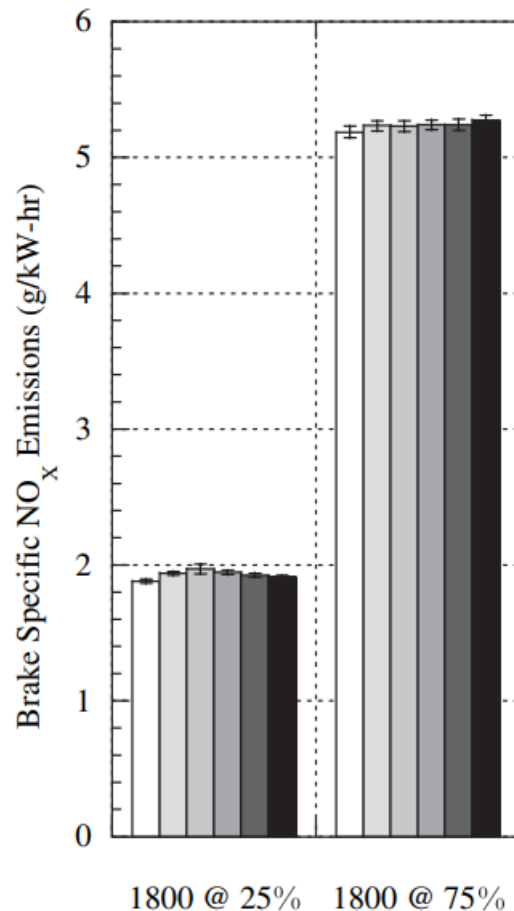


Figura 34: Emisiones de NO_x de un motor de 1800 rpm con un 25 % y 75 % de salida respectivamente, para porcentajes de sustitución de hidrógeno de 0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % y 15 %. Fuente: Hydrogen assisted diesel combustion.

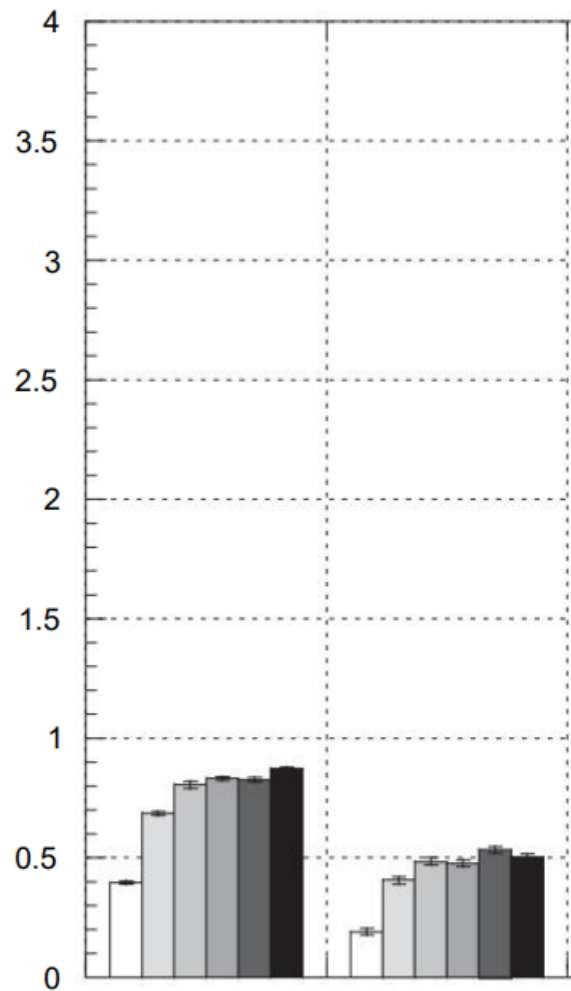


Figura 35: Emisiones de NO₂ en [g/kW-h] para un motor de 1800 rpm con un 25 % y 75 % de salida respectivamente, para porcentajes de sustitución de hidrógeno de 0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % y 15 %. Fuente: Hydrogen assisted diesel combustion.

6.2. Estudio de factibilidad técnica

6.2.1. Existencia de tecnologías

En este apartado se analizará la viabilidad técnica de cada una de las opciones planteadas para desplazar al diesel como el principal combustible del transporte marítimo.

Inicialmente, es necesario considerar la existencia de las tecnologías necesarias para realizar las diversas modificaciones a los motores de combustión, tanto del que funciona de manera mixta con diesel e hidrógeno, como el que funciona totalmente con hidrógeno.

El documento "Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales" corresponde a un experimento realizado a un motor de combustión para que funcione de manera dual mediante el diseño de un sistema de inyección de hidrógeno, demostrando así la existencia de la tecnología necesaria para realizar esta modificación.

Al igual que en el motor anteriormente mencionado, el documento "Hidrógeno. Aplicación en motores de combustión interna" plantea un modelo teórico para la modificación de un motor de combustión para que funcione totalmente con hidrógeno. Además de esto, el documento "Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance comparison using hydrogen and gasoline" corresponde a un experimento que logra adaptar un motor de combustión interna para que utilice hidrógeno como fuente principal de energía.

Con respecto a las celdas de combustibles, estas son tecnologías existentes, existiendo una alta variedad de estas. En el apartado 3.4.9 de la presente memoria contiene más información con respecto a estas.

6.2.2. Análisis energético

Para el presente apartado, es necesario conocer ciertas propiedades de los diferentes combustibles utilizados en el presente estudio, las cuales se encuentran en la siguiente tabla.

Poder calorifico inferior diesel	42700	kJ/kg
densidad diesel	840	g/lt
Poder Calorifico hidrogeno	120011	kJ/kg

Figura 36: Propiedades de los combustibles utilizados. Fuente:

Se calculó la energía generada por hora asociada al motor evaluado en el estudio, utilizando además el consumo de combustible del motor plasmado en el apartado 5.1.1.1, realizando la multiplicación de este con el poder calorífico inferior del diesel en kJ/kg y la densidad de este en kg/lt. Gracias a este cálculo se obtuvo que la energía generada por el motor seleccionado cada hora corresponde a 2.361.585 [kJ/h].

- Motor de combustión 100 % hidrógeno:

Utilizando la energía generada por el motor escogido para el estudio y dividiéndola por el poder calorífico del hidrógeno, se calculó la cantidad de hidrógeno necesario para generar la misma cantidad de energía por, considerando que el 100 % de la energía es generado por este, el cual corresponde a 19,68 [kg/h].

- Motor de combustión dual diesel-hidrógeno:

Al igual que en el punto anterior, se procedió a realizar el mismo cálculo, pero ahora considerando que cierto porcentaje de la energía es generada por hidrógeno, obteniendo así los siguientes resultados.

Porcentaje	Energía a suplir con hidrogeno [kJ/h]	Cantidad de hidrogeno necesario [kg/h]
1%	23615,85	0,197
2%	47231,70	0,394
3%	70847,55	0,590
4%	94463,40	0,787
5%	118079,25	0,984
6%	141695,10	1,181
7%	165310,95	1,377
8%	188926,80	1,574
9%	212542,65	1,771
10%	236158,50	1,968
11%	259774,35	2,165
12%	283390,20	2,361
13%	307006,05	2,558
14%	330621,90	2,755
15%	354237,75	2,952

Figura 37: Hidrógeno necesario para generar la misma cantidad de energía que el motor base, considerando un rango de porcentajes de energía cubiertos por este combustible. Fuente: elaboración propia.

Los cálculos fueron realizados considerando porcentajes entre el 1 % y el 15 %, considerando que el hidrógeno en el corto plazo es escaso, por lo que es necesario utilizarlo en pequeñas proporciones.

Así también, se realizó el siguiente gráfico, el cual contiene la evolución del hidrógeno por hora requerido para el motor evaluado.

- Pila de combustible:

Se realizó el cálculo de la cantidad de celdas de combustibles necesarias para igualar la potencia del motor seleccionado. Para esto se utilizó la energía generada por el motor, correspondiente a 2.361.585 [kJ/h] y, con base en la potencia de la pila de combustible seleccionada, se realizó la conversión de esta a [kJ/h] y mediante una división obteniendo los siguientes resultados.

Potencia de la pila de combustible [kW]	5	250
Cantidad de pilas requeridas	57	2

Figura 38: Potencia de la celda de combustible utilizada y la cantidad de estas para igualar la energía generada por el motor base. Fuente: elaboración propia.

Para la pila de combustible seleccionada, se requieren un total de 2 de estas para la movilización de un buque que utilice el motor previamente seleccionado e igualar la cantidad de energía generada.

Esta pila de combustible utiliza hidrógeno gaseoso como generador de energía, por lo que opera con presiones entre los 3,5 y 6,5 [barg].

6.2.3. Reducción de capacidad de carga

Dependiendo de la opción que se está evaluando, existe la posibilidad que debido a las modificaciones al motor o al cambio de este a celdas de combustible afecte a la capacidad de carga de los buques, por esta razón se procede a analizar con base en las consideraciones anteriores que ocurre para cada uno de los casos. Es importante destacar que un stack de celdas de combustibles corresponde a un conjunto de estas conjugadas en serie o en paralelo.

- Motor 100 % hidrógeno:

Los cambios estructurales del motor en este caso en particular son en mayor cantidad, de las cuales no requieren de una aplicación de la sala del motor.

El mayor cambio asociado a esta medida es el paso del uso total de diesel a hidrógeno, lo que se implica reinventar el sistema de almacenaje.

El hidrógeno cuentan con un poder calorífico mayor al diesel, generando una mayor cantidad de energía al combustionar. Por esta misma razón, en el análisis se aprecia una reducción en la cantidad de combustible necesario para generar la misma cantidad de energía.

Esto último implica que al eliminar el diesel como combustible, la zona de almacenamiento de este queda libre para ser utilizada para otras razones. En este caso en particular es recomendable reutilizarlo para el almacenaje de hidrógeno.

- Motor dual diesel-hidrógeno:

Un motor dual diesel- hidrógeno requiere como añadido un sistema de inyección de este último al motor, lo que no conlleva un gran espacio para implementarse. Por esta misma razón, la sala asociada al motor no se ve afectada en gran medida con respecto a espacio.

El principal factor que puede afectar a la capacidad de carga es el sistema de almacenaje de hidrógeno, debido a que el sistema es dual y requiere también de un sistema de almacenamiento de este.

Como supuesto, para el estudio se utiliza una bombona con presión de 200[bar], con una capacidad de 8,8 m³ de hidrógeno y con un volumen de 50 litros.

Basándose en esta información se calcula la cantidad de bombonas necesarias para cada uno de los porcentajes de mezcla de diesel-hidrógeno, utilizando la densidad de este último a 200[bar], equivalente a 0,07[kg/m³], obteniendo así los siguientes resultados.

Cantidad de hidrógeno por hora [m3/h]	Cantidad de bombonas por hora
2,81	1
5,62	1
8,43	1
11,24	2
14,06	2
16,87	2
19,68	3
22,49	3
25,30	3
28,11	4
30,92	4
33,73	4
36,54	5
39,36	5
42,17	5

Figura 39: Cantidad de hidrógeno por hora y cantidad de bombonas requeridas para generar la misma cantidad de energía que el motor seleccionado. Fuente: elaboración propia.

- Pila de combustible:

Finalmente, en el caso de las pilas de combustible, el factor asociado a la reducción de la capacidad de carga es variable dependiendo de la cantidad de celdas y el tamaño de estas, además de la cantidad de baterías requeridas para que estas puedan comenzar a funcionar.

Es importante considerar que al utilizar pilas de combustibles, las salas asociadas al motor y al almacenaje de diesel pueden adaptarse para instalar en estas las celdas de combustibles, las baterías y el almacenaje de hidrógeno.

Gracias a la gran capacidad que posee el hidrógeno para generar energía, en donde 1kg de hidrógeno es equivalente a 2,8kg de gasóleo, se estima que la capacidad de almacenaje de hidrógeno debe ser menor en volumen al estanque de diesel. Además, que este vector energético es almacenado en tanque capaz de

aguantar grandes presiones para mantenerlo en un estado en particular, lo que apoya también a la idea propuesta en este párrafo.

Para el presente cálculo, se consideró que la pila de combustible seleccionada tiene unas dimensiones de 1209 x 741 x 2195 [mm], información que fue extraída del manual oficial de la pila de combustible, calculando así que cada una de ellas ocupa un espacio equivalente a 1966 [cm³]

Junto a que son necesarias un total de 2 de estas pilas de combustibles para igualar la energía generada por el motor seleccionado, se requiere un total de 3933 [cm³] para la instalación de estas últimas.

Es importante considerar que este espacio a utilizar no incluye las separaciones entre las pilas de combustibles, las baterías necesarias para su funcionamiento y los diferentes sistemas asociados.

Cabe considerar que la pila en cuestión requiere de baterías con una gran capacidad de almacenamiento de energía, o una gran cantidad de estas para abastecer al sistema movilizador del buque. Para este caso en particular, existe un exceso de 406.800[kJ/h] (equivalente a 113 [kW]) generados por las 2 pilas de combustible, comparándola con la energía generada por el motor seleccionado, la cual puede ser aprovechada por otros sistemas.

Finalmente, en relación con el espacio destinado al almacenaje de hidrógeno, al tener que mantenerse a altas presiones para encontrarse en las condiciones óptimas de la pila de combustible, requiere de grandes tanque para su almacenamiento, en relación con los tanques convencionales de diesel.

Lo planteado por la presente memoria propone la utilización de 2 pilas de combustibles de 200 kW, lo que corresponde a un módulo de 400 kW.

Las pilas de combustibles actuales son capaces de generar la energía necesaria para la movilización de un buque de carga, pero el espacio que requieren sus tanques de almacenamiento desincentivan a la hora de instalarlas para esta función y dependiendo de donde se instalen los tanques de hidrógeno, afectan de forma importante a la capacidad de carga del buque.

6.2.4. Peso:

Para los casos asociados a la modificación del motor de combustión base, principalmente para su funcionamiento como motor dual, estas no influyen de forma importante en el peso del motor, manteniéndose en valores similares a los que tenía en el caso base.

Las modificaciones estructurales para que el motor funcione en su 100 % con hidrógeno pueden generar un cambio considerable en el peso del motor. El reforzamiento de ciertas piezas del motor para que puedan soportar el proceso de combustión de hidrógeno son importantes a considerar.

Finalmente, para el caso de la pila de combustible seleccionado, las cuales cuentan con un peso de 1000 kg cada una, provocan un aumento en 20 kg el peso que debe soportar el buque en relación con el caso base.

El último factor importante a considerar es la disponibilidad de tecnología para realizar las modificaciones requeridas y la cantidad de celdas de combustibles y

baterías necesaria para la movilización de los buques.

En el caso de los motores modificados, tanto el que funciona con 100 % hidrógeno, como el que utiliza una mezcla diesel-hidrógeno, al realizarse principalmente cambios estructurales sencillos o agregando componentes simples, las opciones de una implementación en el corto plazo son viables, gracias a la disponibilidad de mano de obra capacitada para realizar estas modificaciones y a la disponibilidad de materiales para realizarlas.

Las celdas de combustible en la actualidad son tecnologías que recientemente están comenzando a implementarse en sistemas asociados al transporte. La posibilidad de conseguir estas no es descabellada, fomentado por la necesidad de realizar medidas para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, por ende, es posible la adquisición de celdas de combustible necesarias para la movilización de un buque de carga.

6.2.5. Sutilezas técnicas

Existe una sutileza técnica importante a destacar en el estudio de factibilidad técnica, el cual corresponde a la estimación del consumo de hidrógeno para la pila de combustible.

El consumo de hidrógeno de una pila de combustible no es sencillo de estimar, ya que depende de una gran cantidad de variables, como son el caudal de oxígeno o la densidad de corriente, por ende se requiere de un laboratorio para realizar diversas pruebas y así estimar el consumo de esta.

6.3. Estudio de factibilidad económica

Para el presente estudio, se consideró principalmente los que es el costo de combustible, en la siguiente tabla se presentan los diferentes consumos de combustible para las diferentes opciones propuestas, asociadas a la combustión de este.

Opción propuesta	Cantidad de hidrógeno [kg/h]
5% de hidrógeno	0,98
10% de hidrógeno	1,97
15% de hidrógeno	2,95
100% de hidrógeno	19,68

Figura 40: Consumo de hidrógeno en [kg/h] para cada una de las opciones propuestas planteadas para un motor de combustión. Fuente: elaboración propia.

Junto a esto, se procedió a calcular la cantidad de petróleo diesel utilizado por la opción que consideran un motor dual, la cual se encuentra en la siguiente tabla.

Opción propuesta	Cantidad de petroleo diesel [lt/h]
5% de hidrógeno	62,55
10% de hidrógeno	1,97
15% de hidrógeno	2,95

Figura 41: Consumo de petróleo diesel en [lt/h] para cada una de las opciones planteadas para el motor dual. Fuente: elaboración propia.

Para conocer el ahorro generado por el cambio del petróleo diesel al hidrógeno se utilizó el consumo base de combustible del motor elegido, correspondiente a 65,841 [lt/h] y se utilizó como caso de evaluación el viaje realizado desde el Terminal Otway, el cual se encuentra en la región de Magallanes, hasta el puerto de Tocopilla, el cual corresponde al más largo posible dentro del territorio chileno, con una distancia en línea recta de unos 3454 [km]. Para el cálculo de las horas de viaje se utilizó la distancia

mencionada anteriormente y la velocidad promedio de un buque, correspondiente a 20 nudos (37.04 [km/h]), obteniendo como resultado un tiempo de viaje equivalente a 93.25 horas.

El último dato a considerar es la cantidad de viajes realizados por el buque por año, utilizando un total de 12, considerando que es necesario preparar el buque de carga y que el viaje es considerablemente largo en términos de tiempo.

El precio de los combustibles utilizado para el presente análisis corresponde a valores estimados extraídos de la figura 24 y la figura 33, correspondiente a la proyección de los costos de producción de hidrógeno a lo largo del territorio chileno y a las proyecciones del precio del petróleo diesel. En el primer caso, fue utilizado un valor promedio considerando las 3 zonas presentes en la figura, en cambio, en el segundo fue utilizado para el cálculo el valor de referencia. Todos los valores utilizados como precios son a partir del año 2025, debido a que no hay registros anteriores con respecto al hidrógeno en Chile.

Debido a que los datos asociados al hidrógeno corresponden a costos de producción, se debe realizar un análisis de sensibilidad, donde la situación considere un incremento de este, buscando simular como se comportara la rentabilidad en una situación en la que el valor de este sea mayor. En este caso, en particular, se realizó este análisis considerando un incremento en un 20 % y 50 %.

A continuación, se encuentran los valores utilizados para el valor del petróleo diesel y el hidrógeno, considerando también el aumento de este en los porcentajes previamente mencionado.

Año	Precio Promedio Anual Hidrógeno [USD/kg]	Precio Promedio Anual Hidrógeno +20% [USD/kg]	Precio Promedio Anual Hidrógeno +50% [USD/kg]	Precio referencia diesel [USD/lit]
2025	2,10	2,52	3,15	0,95
2026	1,98	2,38	2,97	0,98
2027	1,86	2,23	2,79	1,02
2028	1,74	2,09	2,61	1,05
2029	1,62	1,94	2,43	1,09
2030	1,50	1,80	2,25	1,1
2031	1,45	1,74	2,18	1,12
2032	1,41	1,69	2,11	1,15
2033	1,36	1,63	2,04	1,17
2034	1,31	1,58	1,97	1,18
2035	1,27	1,52	1,90	1,19
2036	1,24	1,49	1,86	1,2
2037	1,21	1,46	1,82	1,21
2038	1,19	1,42	1,78	1,22
2039	1,16	1,39	1,74	1,25
2040	1,17	1,40	1,75	1,27
2041	1,12	1,34	1,68	1,29
2042	1,11	1,33	1,66	1,3
2043	1,09	1,31	1,64	1,31
2044	1,08	1,30	1,62	1,35
2045	1,07	1,28	1,60	1,35
2046	1,05	1,26	1,57	1,38
2047	1,03	1,23	1,54	1,39
2048	1,01	1,21	1,51	1,39
2049	0,99	1,18	1,48	1,39
2050	0,97	1,16	1,45	1,4

Figura 42: Proyección del precio del hidrógeno y petróleo diesel utilizados para el análisis.
Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla, se encuentran las cantidades de petróleo e hidrógeno necesario por hora, considerando el porcentaje energético de hidrógeno para el motor dual.

Porcentaje	Cantidad de hidrógeno necesario [kg/h]	Cantidad de diesel necesario [lt/h]
1%	0,20	65,18
2%	0,39	64,52
3%	0,59	63,87
4%	0,79	63,21
5%	0,98	62,55
6%	1,18	61,89
7%	1,38	61,23
8%	1,57	60,57
9%	1,77	59,92
10%	1,97	59,26
11%	2,16	58,60
12%	2,36	57,94
13%	2,56	57,28
14%	2,75	56,62
15%	2,95	55,96

Figura 43: Cantidad de hidrógeno y diesel requerido para generar la misma energía que el motor seleccionado en el caso inicial, considerando el porcentaje energético a sustituir con hidrógeno. Fuente: elaboración propia.

Para el presente caso, se utilizarán los valores para el 5 %, 10 % y 15 % de sustitución.

Importante considerar que para el análisis se considera un horizonte de tiempo de 20 años, lo cual corresponde a la duración promedio de un motor diesel marino, además de la utilización de una tasa de descuento del 8 %, extraída del .^{Estudio} Tasas de Descuento Real Estaterealizado por la empresa BDO.

Se procedió a calcular la diferencia entre el caso base, correspondiente al motor de combustión de diesel en su 100 %, y los diferentes casos propuestos para el motor de combustión.

A continuación, se presentan los resultados asociados al cálculo del valor anual neto (VAN) para los diferentes casos propuestos, considerando un tiempo de vida de 20 años. Cabe destacar que los valores obtenidos no tienen en consideración la inversión inicial realizada, correspondiente a la modificación del motor.

	VAN		
	Valor Original	Aumento 20% precio del hidrógeno	Aumento 50% precio del hidrógeno
5% de Hidrógeno	\$24.844,72	\$21.495,38	\$19.208,36
10% de Hidrógeno	\$49.689,45	\$42.990,76	\$38.416,71
15% de Hidrógeno	\$74.534,17	\$64.486,14	\$57.625,07
100% de Hidrógeno	\$496.894,49	\$429.907,59	\$384.167,10

Figura 44: Valor anual neto (VAN) en USD para cada uno de los casos propuestos, considerando los el precio del hidrógeno base y el incremento de este en un 20 % y 50 % considerando solamente los flujos netos en un periodo de 20 años. Fuente: elaboración propia

El nivel de inversión máximo se determinó utilizando los valores obtenidos para el VAN presentando en la figura anterior, los cuales solo consideran en su cálculo los flujos anuales, correspondientes al ahorro generado por la sustitución parcial o total del petróleo diesel por hidrógeno. Un proyecto puede considerarse rentable

cuando su valor anual neto es mayor que cero. En este caso en cuestión, los valores presentados en la figura 44 corresponden también a los niveles de inversión donde ocurre lo anteriormente descrito.

A niveles de inversión inicial mayores a los propuestos anteriormente, el proyecto de modificación deja de ser rentable en el periodo evaluado, correspondiente a 20 años, dado que el valor anual neto pasa a ser menor a cero.

En el caso del motor que funciona con un 100 % de hidrógeno, la inversión es considerablemente mayor, ya que requiere una gran cantidad de modificaciones estructurales para que este sea capaz de soportar la combustión de este combustible.

Por otra parte, en el caso de la pila de combustible, debido a la importante cantidad de variables necesarias para determinar el consumo de combustible, no se puede determinar de manera precisa la rentabilidad de la sustitución de un motor de combustión por estas.

Por esta misma razón, mediante la herramienta solver, perteneciente al software Microsoft Excel, sobre la base de ciertos niveles de inversión, se calculó la cantidad máxima de hidrógeno que deben consumir entre las 2 pilas de combustibles necesarias para que deje de ser rentable la sustitución.

La empresa Ballard, la cual es la productora de la pila de combustible utilizada en este estudio, junto a la empresa Deloitte, mediante un estudio estiman que son capaces de reducir el precio de las pilas de combustible a valores cercanos a 100 [USD/kW]. Se utilizó este valor en específico como caso base, y se incrementó en un 50 % y en un 100 % para estimar el comportamiento de este en el caso de que los niveles de

inversión incrementen.

En la siguiente tabla se encuentran los valores obtenidos con respecto al consumo de hidrógeno en [kg/h] para cada uno de los casos propuestos.

	Nivel de inversión		
	100 [USD/kW]	150 [USD/kW]	200 [USD/kW]
Caso precio igual costo de producción [kg/h]	46,52	45,35	44,17
Caso precio igual costo de producción +20% [kg/h]	38,77	37,79	36,81
Caso precio igual costo de producción +50% [kg/h]	31,01	30,23	29,45

Figura 45: Consumo de hidrógeno máximo en [kg/h] entre ambas pilas de combustible para diferentes niveles de inversión. Fuente: elaboración propia.

Estos valores dictaminan el mayor consumo de hidrógeno para cada caso propuesto que permita que la sustitución sea rentable, por lo que cualquier valor menor a estos es un incentivo para la inversión.

- Sutilezas:

Para el estudio de factibilidad económico, se utilizó fundamentalmente los diferentes costos asociados a consumo de combustible. La inversión para las diferentes opciones asociadas al motor de combustión es estimada mediante el ahorro generado por la sustitución de diesel por hidrógeno, la cual corresponde a la máxima posible para que sea rentable el cambio. Esta inversión no solo considera las modificaciones estructurales del motor, sino que también otros costos asociados, como pueden ser las modificaciones o integración de un tanque de hidrógeno.

Cabe destacar que los análisis de sensibilidad realizados se proponen como una opción posible a ocurrir y evaluar que ocurre con la inversión cuando el costo

asociado al consumo de hidrógeno aumenta, pero no en cantidad de este, sino en su precio de compra. Esto se debe a que los valores encontrados en el ministerio de energía asociados al hidrógeno corresponden al costo de producción de este, lo que implica que no será vendido a los consumidores por este valor, provocando evaluar opciones donde el precio de compra de este combustible sea mayor para todas las opciones.

En el caso de la pila de combustible, se cuenta solamente con la inversión asociada a la adquisición de la pila de combustible, evaluando la rentabilidad de este, calculando el consumo máximo de hidrógeno por hora. Además del análisis de sensibilidad anterior, se agrega otro análisis, considerando un aumento en la inversión inicial, ya que existen otros factores a considerar, como la mano de obra o la implementación de un tanque de almacenamiento de hidrógeno.

Otra de las limitaciones del estudio corresponde a la estimación de los costos asociados a mantenimiento de las diferentes opciones en las cuales se realiza una modificación del motor de combustión. Al ser nuevas tecnologías, cabe la posibilidad de que las mantenciones al motor cambien en frecuencia y costo, por lo que realizar una estimación puede afectar de forma importante al estudio en ámbitos de precisión de los cálculos. A pesar de esto, la existencia de un costo asociado a mantención provoca que la inversión inicial en los diferentes casos propuestos deba ser menor para rentabilizar el cambio.

La situación planteada anteriormente no ocurre en el caso de la sustitución por pilas de combustible, ya que en este se realizó una estimación de los flujos

futuros con base en la inversión, lo cual considera también la existencia de un costo asociado a mantención

6.4. Análisis de impactos ambientales

Para el presente estudio, se realiza una estimación de las diferentes emisiones de gases de efecto invernadero por parte de las tres opciones seleccionadas, siendo estas las emisiones de CO y NO₂

- Motor 100 % Hidrógeno:

Con base en la figura 28, presente en el marco teórico y extraída del documento "Hidrógeno, aplicaciones en motores de combustión interna", se puede realizar una aproximación de las emisiones generadas por un motor de combustión que utilice solo hidrógeno como combustible.

Para que esto suceda, es necesaria la presencia de oxígeno para el proceso de combustión y generación de energía, por lo que es necesario la inyección de aire al motor para contar con este elemento químico. Por esta misma razón se aprecia un aumento en las emisiones de NO_x, conformado por diferentes compuestos químicos, como NO y NO₂, ya que el aire cuenta con una alta presencia de nitrógeno en su composición, el cual al pasar por un proceso de combustión se une a hidrógeno, generando estas emisiones.

Las emisiones de CO y CO se mantienen en valores nulos, debido a la ausencia de carbono en estado puro en el proceso de combustión dentro del motor.

En este estudio, en particular, se realizarán estimaciones para los diferentes

valores de ϕ presentes en el gráfico, ya que las diferentes situaciones son importantes de evaluar.

Para valores de ϕ cercanos menores a 0,4, los valores de emisiones son considerablemente bajas, prácticamente despreciables. La situación cambia para un valor cercano a 0,5 y mayores, aumentando considerablemente las emisiones de NOx, alcanzando un valor cercano a los 9.184 [g/hr] en el peor de los casos.

Las emisiones de NOx para el motor que utiliza en su totalidad hidrógeno como combustible se mantienen en valores similares a los originales plantados para el motor diesel convencional, por otra parte, las emisiones de del resto de gases involucrados en la combustión caen a valores cercanos a 0, por lo que se puede atribuir a una disminución en un 100 % de estas emisiones, también es importante destacar que las emisiones de NOx se mantienen constantes para valores de ϕ similares.

- Motor dual diesel Hidrógeno:

En la figura 33 del apartado "Levantamiento de información" se aprecian las emisiones de NOx para un motor de 1800 rpm para dos configuraciones, variando estas en el porcentaje de salida, siendo respectivamente 25 % y 75 %. Se procede a estimar las emisiones aproximadas para estos 2 casos, obteniendo así un total de, 1246,4 [g/hr] en el primer caso y 3476,8 [g/hr] en el segundo.

La figura 34 busca estimar las emisiones de NO₂ para este mismo motor mantenido fijo el sistema de inyección dependiendo del porcentaje de hidrógeno que busca sustituir al diesel. Las emisiones de NO₂ tienden a aumentar con

la presencia del hidrógeno debido a la reacción de combustión de este con la presencia de aire, el cual trae a su vez oxígeno y nitrógeno.

En el caso en particular, las emisiones de NO₂ estimadas por hora corresponden a los valores presentes en la siguiente tabla, considerando que los valores fueron calculados con base en el consumo de combustible original del motor y no a la potencia nominal, ya que parte de la energía se pierde en el proceso.

Porcentaje de hidrógeno	Emisiones estimadas de NO ₂
0%	262,4
2,5%	459,2
5%	524,8
7,5%	557,6
10%	551,04
15%	590,4

Figura 46: Emisiones estimadas de NO₂ en [g/h] con base en el porcentaje de hidrógeno para el caso de un 25 % de salida.

Porcentaje de hidrógeno	Emisiones estimadas de NO ₂
0%	131,2
2,5%	262,4
5%	314,88
7,5%	314,88
10%	360,8
15%	328

Figura 47: Emisiones estimadas de NO₂ en [g/h] con base en el porcentaje de hidrógeno para el caso de un 75 % de salida.

Se puede apreciar un incremento importante en las emisiones de NO₂ por parte del motor de combustión en relación con el motor original. Además de esto, el nivel de emisiones de NO₂ en el caso del 75 % de salida decrecen, a pesar de los valores obtenidos para NO_x para el mismo caso. Esto último se debe a un

incremento considerable en NO para este caso.

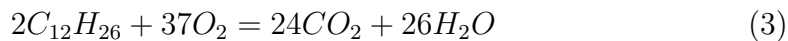
Para realizar una estimación de las emisiones de CO₂, generadas por el motor seleccionado, se consideró como supuesto la combustión completa de hidrógeno, es decir, que todo el carbono proveniente del combustible diesel forma parte de una molécula de dióxido de carbono. Este supuesto permite estimar la cantidad máxima de este gas para el motor en cuestión.

El petróleo diesel más común es el del tipo C₁₂H₂₆, con un peso molecular de 170,3338 [g/mol], se procede a calcular la relación [mol/h] para la situación en las cuales es sustituido parte del diesel con un porcentaje energético de hidrógeno, siendo estos un 5 %, 10 % y 15 %, obteniendo los siguientes resultados.

Porcentaje de Hidrógeno	Diesel por hora utilizado [mol/h]
0%	324,69
5%	308,46
10%	292,23
15%	275,99

Figura 48: Moles de diesel utilizados por hora de operación del motor para cada porcentaje seleccionado. Fuente: elaboración propia.

Posterior a esto, se realizó un balance de materia utilizando la siguiente reacción química, la cual representa la combustión de diesel.



Obteniendo los valores de emisiones en [g/h] de CO₂ para cada uno de los casos evaluados, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Porcentaje de hidrógeno	Emisiones de CO ₂ [g/h]
0%	171475,69
5%	162901,90
10%	154328,12
15%	145754,33

Figura 49: Emisiones de dióxido de carbono estimadas mediante el método de balance de materia para cada una de las situaciones planteadas. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se procedió a calcular la cantidad de CO₂ emitido por el motor para el viaje anteriormente propuesto en el estudio de factibilidad económico, en el cual el trayecto realizado por el buque es el más largo posible, utilizado anteriormente en el análisis de factibilidad económica, el cual requiere del funcionamiento del motor un total de 93,25 horas, obteniendo las siguientes emisiones.

Porcentaje de hidrógeno	Emisiones de CO ₂ [kg]
0%	15990,20
5%	15190,69
10%	14391,18
15%	13591,67

Figura 50: Emisiones de CO₂ en kg estimadas para cada una de las sustituciones de hidrógeno propuestas, considerando el viaje más largo posible dentro del territorio nacional. Fuente: elaboración propia.

Con base en la ley de conservación de la materia, el proceso de combustión genera una proporción de dióxido de carbono en relación con el porcentaje de diesel utilizado, por lo que se procedió a calcular el porcentaje de reducción de emisiones en los diferentes escenarios propuestos, los cuales se encuentran en la siguiente tabla.

Porcentaje de Hidrógeno	Porcentaje de reducción de emisiones
5%	5%
10%	10%
15%	15%

Figura 51: Porcentaje de reducción de emisiones de dióxido de carbono en relación con el porcentaje de hidrógeno utilizado. Fuente: elaboración propia.

- Pila de combustible:

Las pilas de combustible funcionan de una manera particular. Lo mencionado por Antonio Mayandía Aguirre en el documento "Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico", deja claro que el funcionamiento de estas permite convertir la energía química directamente en energía eléctrica, aprovechando que los electrones no son capaces de traspasar la capa electrolítica para desviarlos por un sistema externo.

Por esta misma razón, ya que no existe un proceso de combustión dentro de la pila de combustible, las emisiones de gases de efecto invernadero son prácticamente nulas, haciendo esta opción la más viable a nivel ambiental.

- Sutileza:

El cálculo asociado a las emisiones de óxidos de nitrógeno corresponde a una estimación utilizando los valores asociados a estas para un motor con condiciones relativamente similares al motor utilizado, pero esto no significa que sean éstas exactamente. Esto se debe a que las emisiones de estos compuestos químicos no ocurren debido al proceso de combustión en sí, sino que ocurren debido a la presencia de aire, el cual es portador de nitrógeno, provocando que se quieren conocer las emisiones exactas de las opciones asociadas al motor de combustión

se requiera hacer un experimento en un laboratorio.

Lo mismo sucede con las emisiones de dióxido de carbono. La diferencia en este caso es que la generación de este si se encuentra relacionada con la combustión de petróleo diesel, apareciendo solamente en las opciones asociadas al motor dual. Las emisiones de este se calculan con el supuesto de que la combustión es completa, es decir, no existe generación de monóxido de carbono en el proceso de combustión, esto se debe a que la combustión incompleta ocurre solamente cuando las cantidades de comburente son menores a las requeridas en la relación estequiométrica, lo cual no es determinable sin la presencia de un dispositivo capaz de medir las emisiones de dióxido y monóxido de carbono.

6.5. Comparación entre lo propuesto y el contexto actual en relación con el análisis de impactos ambientales

Las emisiones a nivel mundial, debido al contexto actual relacionado con la crisis climática, ha incentivado a reducir las emisiones en los diferentes sectores industriales, transporte, entre otros.

En el presente estudio, es importante comparar las emisiones de dióxido de carbono con respecto al contexto actual del transporte marítimo. Solo se consideran las emisiones de óxidos de nitrógeno para la opción relacionada con la sustitución del motor diesel propuesto por pilas de combustible, debido a que en los otros casos, el determinar de forma exacta estas emisiones requiere de un experimento realizado en un laboratorio, además de que la generación de estos se relaciona con el nitrógeno

presente en el aire en la combustión. Como se aprecia en el estudio de impactos ambientales, las variaciones de estas emisiones no varían de forma importante.

La aplicación de las medidas propuestas en la presente memoria en el territorio nacional no generará un gran impacto en las emisiones mundiales de dióxido de carbono, dado que Chile no se encuentra dentro de los países con mayor cantidad de emisiones, un porcentaje menor a 1,6 % de las emisiones mundiales. Los países más contaminantes corresponden a China, con un total de 9.899 millones de toneladas de CO₂, seguido por Estados Unidos, con 4.457 millones de toneladas (Statista, 2021).

El motor seleccionado cuenta con las condiciones necesarias para operar en buques del tipo carga general, los cuales cuentan con la mayor cantidad de buques registrados, con un total de 140, seguido por los transbordadores con 44 buques.

Si todos los buques de este tipo implementaran las diferentes medidas propuestas correspondientes a la combustión de hidrógeno, se reducirán las emisiones de CO₂ en un porcentaje equivalente a la sustitución energética de diesel por hidrógeno, es decir, si se sustituye un 5 % de la energía por hidrógeno, las emisiones de dióxido de carbono deberán reducirse en valores cercanos al 5 %.

Caso distinto ocurre con los diferentes óxidos de nitrógeno, ya que su formación se debe a la presencia de aire en el proceso de combustión, y como se mencionó con anterioridad, independiente del factor de carga, las emisiones de estos tienden a mantenerse constantes cuando existe una reacción de combustión.

En el caso de la sustitución del motor de combustión por pilas de combustibles, las emisiones tanto de CO₂ como de óxidos de nitrógeno se reducen a cero, debido a la

inexistencia de combustión y de carbono, liberando exclusivamente agua del proceso.

Cabe destacar que el análisis anterior corresponde únicamente a las emisiones dentro de los buques de carga general. En el contexto del transporte marítimo de carga, la situación es diferente, debido a la cantidad considerable de buques petroleros, los cuales cuentan con un consumo de combustible mayor que el resto de buques, lo que desencadena en una mayor cantidad de emisiones de dióxido de carbono.

Las proporciones con respecto a las emisiones de dióxido de carbono es variable, ya que no todos los buques cuentan con la misma proporción de emisiones de este gas contaminante, este dado diversos factores, los cuales corresponden a distancia recorrida, consumo de combustible de los motores utilizados, potencia del motor utilizado, entre otros.

A nivel transporte general, en la figura 6 presentes en el marco teórico, se aprecia que el año 2018, el nivel de emisiones generado por la movilización marítima en general corresponde a un 2,7 % de las emisiones, con un valor aproximado de 756 kt de CO₂ equivalente. Para el caso asociado a la utilización de la pila de combustible como fuente de energía, la reducción de las emisiones es importante; en el caso de que el transporte de carga general corresponda al 50 % de las emisiones del transporte marítimo, esta medida implicaría en una reducción de las emisiones nacionales en un 1,35 %. Para las otras situaciones, dado que no se conoce el valor exacto de las emisiones de NO_x, no se puede determinar de forma precisa la reducción de las emisiones para el supuesto anterior.

7. Conclusiones

A manera de conclusión, el hidrógeno verde cuenta con ciertas propiedades llamativas para una posterior inversión en su aplicación como combustible dentro del transporte marítimo, dado su alto poder calorífico, lo que permite que se reduzca la cantidad de combustible utilizado para generar la misma cantidad de energía.

La existencia de tecnologías permite la viabilidad técnica de implementar las diferentes medidas propuestas, el peso de los componentes tiende a mantenerse dentro de un rango aceptable y el cambio implica una reducción en el consumo de combustible. El mayor punto en contra de la inversión se relaciona con el impacto generado a la capacidad de carga de los buques, debido a que el almacenaje de hidrógeno debe realizarse a altas presiones, lo que deriva en tanques complejos y de gran tamaño.

En ámbitos económicos, el alza del petróleo diesel y las proyecciones estimadas para el costo del hidrógeno permiten mitigar la inversión realizada para ciertos niveles de esta, además de la disminución en la cantidad de combustible requerido. Los niveles de inversión máximos a realizar escalan en relación con la cantidad de hidrógeno utilizado, ya que se requieren una mayor cantidad de modificaciones estructurales de los motores, además de otros costos asociados.

El impacto ambiental es el punto más llamativo a considerar dentro del presente estudio, gracias a la disminución de las emisiones de dióxido de carbono. El presente estudio muestra una disminución de las emisiones de este gas equivalente a la proporción de sustitución de petróleo diesel por hidrógeno, ya que este último no cuenta con carbono en su fórmula. La opción asociada a la sustitución del motor en

cuestión por pilas de combustible no solamente mitigan en un 100 % las emisiones de CO₂, sino que también las de NO_x, el cual aparece debido a la presencia de aire en un proceso de combustión. Por esta misma razón, la opción previamente mencionada es la más llamativa en este tópico, pero requiere de niveles de inversión elevados en el corto plazo.

En el corto plazo, la modificación de los motores actuales para su funcionamiento con hidrógeno resulta más llamativo, dado los niveles de inversión a realizar para reducir el impacto ambiental generado por estos, además de los niveles de rentabilidad asociados para ciertos valores de inversión. Por otra parte, una reducción en el costo de producción de pilas de combustibles permitirá que la opción asociada a ellas sea no solo factible en relación con el concepto ambiental, sino que también en el ámbito económico.

En las siguientes tablas se encuentran los diversos resultados numéricos realizados en el presente estudio.

		Motor dual			
		5% de hidrógeno	10% de hidrógeno	15% de hidrógeno	100% hidrógeno
Nivel de inversión [USD]	Caso Base	\$24.844,72	\$49.689,45	\$74.534,17	\$496.894,49
	Aumento en 20% el precio del hidrógeno	\$21.495,38	\$42.990,76	\$64.486,14	\$429.907,59
	Aumento en 50% el precio del hidrógeno	\$19.208,36	\$38.416,71	\$57.625,07	\$384.167,10
	Consumo de hidrógeno [kg/h]	0,98	1,97	2,95	19,68
	Emisiones de dióxido de carbono [kg/h]	162,90	154,33	145,75	0

Figura 52: Tabla resumen de los resultados técnicos, económicos y de emisiones de dióxido de carbono para las diversas opciones de motor dual y el motor 100 % hidrógeno. Fuente: elaboración propia.

		Pila de combustible		
Nivel de Inversión [USD/kW]		100	150	200
Consumo de hidrógeno	Caso Base	46,52	45,35	44,17
	Aumento del precio de hidrógeno en un 20%	38,77	37,79	36,81
	Aumento del precio de hidrógeno en un 50%	31,01	30,23	29,45
	Emisiones de dióxido de carbono	0	0	0

Figura 53: Tabla resumen de los resultados técnicos, económicos y de emisiones de dióxido de carbono para la opción que plantea la utilización de pilas de combustible. Fuente: elaboración propia.

En el caso de los motores, tanto el del tipo dual como el que funciona en su totalidad con hidrógeno, cuentan con un nivel de inversión máximo para rentabilizar la modificación del motor original. Este nivel incrementa en relación con el aumento de la cantidad de hidrógeno utilizado, dadas las condiciones futuras del precio de este último y del petróleo diesel, además de que, las condiciones requeridas por parte del motor incrementan mientras mayor es el porcentaje de hidrógeno, provocando que se deba invertir más dinero para el funcionamiento de este.

Con base en todo lo ya mencionado, la rentabilidad de modificar un motor diesel o sustituirlo por pilas de combustible en términos económicos dependerá de diversos factores los cuales deben encontrarse dentro de ciertos rangos. En terminos tecnicos, la utilización de hidrógeno puede ser compleja, dada la necesidad de tanques presurizados de un tamaño considerable, lo que puede reducir la capacidad de carga del buque.

Bibliografía

- [1] Armada de Chile (2021). *Boletín Estadístico Marítimo*.
Sitio Web: https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20180626/20180626141553/alta_boletin_estadistico_2021.pdf
- [2] Bolívar, R., Mostany, J. y García, M (2006). *Petróleo versus energías alternas, dilema futuro..*
Sitio Web: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006001000004
- [3] CEPAL (2019). *Hacia la descontaminación del transporte marítimo del comercio internacional: metodología y estimación de las emisiones de CO₂*. Naciones Unidas.
Sitio Web: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45075/S1901142_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [4] CEPAL (2019). *Recursos naturales e infraestructura: Transporte marítimo y puertos*. Naciones Unidas.
Sitio Web: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45075/S1901142_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [5] Comisión Nacional de Energía. *Anuario Estadístico de Energía*.
Sitio Web: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2021/12/AnuarioCNE2020.pdf>

-
- [6] Copa, D. (2020). *Economía del hidrógeno hasta 2030*.
Sitio Web: https://oa.upm.es/62906/1/TFG_DANIEL_JOSE_COPA_ORTEGA.pdf
- [7] Dominguez, J. (2002). *Celda de Combustible*.
Sitio Web: [https://www.icaei.es/contenidos/publicaciones/anales/pag_14-18_\(II-2002\)-619.pdf](https://www.icaei.es/contenidos/publicaciones/anales/pag_14-18_(II-2002)-619.pdf)
- [8] FÀBREGA, M. *Hidrógeno. Aplicación en motores de combustión interna*.
Sitio Web: <http://hdl.handle.net/2099.1/6533>
- [9] Familiar, C. *Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales*.
Sitio Web: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13713/2%20-%20PROYECTO%20FINA%20DE%20CARRERA%20%20INYECCI%20N%20DE%20HIDR%20GENO%20COMO%20P?sequence=1>
- [10] Fuñes, C. y Reyes, L. (2019). *El Hidrógeno como Vector Energetico*. Universidad Autonoma de Chile
Sitio Web: <https://repositorio.ua autonom a.cl/bitstream/handle/20.500.12728/3191/Hidrogeno.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [11] Garcia, N. *Matriz energética y eléctrica en Chile*.
Sitio Web: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32492/1/BCN_Matriz_energetica_electrica_en_Chile.pdf
- [12] Generadoras de Chile. *Histórica interconexión eléctrica SIC – SING*.
-

[13] Giménez, I. (julio 2021). *Retos del hidrógeno verde.*

Sitio Web: https://www.academia.edu/49936158/ECONOMA_ARAGONESA_revista_73_Hidrogeno_Verde_2?auto=citations&from=cover_page

[14] Gonzales,N., Soler,F., Orive, A. y Camarero, A. (2013). *Transporte marítimo y medio ambiente: Las implicaciones de las secas y las ecas.* Universidad de Buenos Aires.

Sitio Web: <http://revistascientificas.filo.uba.ar/index.php/rtt/article/view/297/275>

[15] International Energy Agency. *The future of Hydrogen.*

Sitio Web: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

[16] International Energy Agency. *World Energy Balances: Overview. World.*

Sitio Web: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world>

[17] International Energy Agency. *World Energy Balances: Overview. OECD.*

Sitio Web: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/oecd#abstract>

[18] Jiménez, F. (2020). *Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil.* Universidad de Chile.

Sitio Web: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175586>

[19] Kelkar, N. (2015). *The energy story: Fossil fuels to nuclear power. .*

Sitio Web: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/view/54442>

- [20] Lilik, G., Zhang, H., Herreros, J., Haworth, D. y Boheman, A. *Hydrogen assisted diesel combustion*.

Sitio Web: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.105>

- [21] Linares, J. y Moratilla, B. *El hidrógeno y la energía*. .

Sitio Web: https://www.academia.edu/37006730/Autores_El_hidrógeno_y_la_energía_El_hidrógeno_y_la_energía

- [22] Mayandia, A. *Descripción y modelado de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico*.

Sitio Web: <http://hdl.handle.net/10016/6055>

- [23] Ministerio de Energía (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. Ministerio de Energía.

Sitio Web: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf

- [24] Ministerio de Energía. *Emisiones al aire*.

Sitio Web: <https://retc.mma.gob.cl/indicadores/emisiones-al-aire/>

- [25] Ministerio de Energía (2021). *Informe Preliminar: Planificación energética de largo plazo*. .

Sitio Web: <https://energia.gob.cl/pelp/repositorio>

[26] Naciones Unidas. *El acuerdo de París*.

Sitio Web: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

[27] OCDE *The Annual Climate Action Monitor*.

Sitio Web: <https://www.oecd.org/climate-action/ipac/the-annual-climate-action-monitor-5bcb405c/>

[28] Pino, A. (2017). *Estimación de emisiones contaminantes atmosféricas producidas por embarcaciones marítimas en Chile*.

Sitio Web: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/24392/3560902038541UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[29] Soto, O. (2020). *Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada*.

Sitio Web: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/176192/Análisis-conceptual-constructivo-y-experimental-de-un-electrolizador-con-diferentes-electrodos.pdf?sequence=1>

[30] Statista (Acceso 2021). *Volumen de carga del comercio marítimo internacional transportado por buques portacontenedores entre 1980 y 2017*.

Sitio Web: <https://es.statista.com/estadisticas/598872/trafico-maritimo-mundial-con-contenedores/>

[31] Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., Biggs, R., Carpenter, S., de Vries, W., de Wit, C., Folke, C., Gerten, D., Heinke,

H., Mace, G., Persson, L., Ramanathan, V., Reyers, B. y Sörlin, S. *Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet.*

Sitio Web: 10.1126/science.1259855

- [32] Subsecretaría de Transporte. *Departamento de Transporte Marítimo, Fluvial y Lacustre.*

Sitio Web: <http://www.logistica.mtt.cl/areas/2/departamento-de-transporte-maritimo-fluvial-y-lacustre>

- [33] UNCTAD (2018). *Informe sobre el comercio y el desarrollo 2018*. Naciones Unidas.

Sitio Web: https://unctad.org/es/system/files/official-document/tdr2018_es.pdf

- [34] United Nations Climate Change. *¿Qué es el acuerdo de París?*

Sitio Web: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>

- [35] García, N. *Matriz energética y eléctrica en Chile.*

Sitio Web: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32492/1/BCN_Matriz_energetica_electrica_en_Chile.pdf

- [36] Sopena, C., Diéguez, P., Sáinz, D., Urros, J., Guelbenzu, E. y Gandía, L. *Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance*

comparison using hydrogen and gasoline.

Sitio Web: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.090>