

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

SANTIAGO-CHILE



**“FACTIBILIDAD DEL USO DE TECNOLOGÍAS
LIMPIAS QUE PERMITAN DISMINUIR LAS
EMISIONES DE CO₂ GENERADAS POR UNA
EMBARCACIÓN TURÍSTICA MEDIANA”**

Rafael Eduardo Mancilla Vargas

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL MECÁNICO**

Profesora guía: Dr. Ing. Miriam Roth

Profesor Co-referente: Ing. Mario Villa

Profesora Co-referente: MSc. Ing. Eugenia Torres

Enero 2024

Resumen

En el presente documento se expone el desarrollo de un estudio sobre la viabilidad de implementar tecnologías limpias como fuentes energéticas para impulsar una embarcación turística de tamaño mediano. El objetivo es reducir o eliminar las emisiones de CO₂ generadas por la combustión de sus motores diésel y para esto, se llevó a cabo un exhaustivo estudio bibliográfico con el fin de comprender el estado actual de las tecnologías empleadas en la descarbonización marina. Este análisis proporcionó una visión general de las alternativas disponibles y más prometedoras para su implementación en este proyecto, confirmando así la viabilidad de realizar una conversión de la embarcación.

En el caso de estudio, se seleccionó una embarcación tipo catamarán que opera en el Lago Todos los Santos en el Parque Nacional Vicente Pérez Rosales, ubicado en Puerto Varas, Región de Los Lagos. Esta embarcación emite, aproximadamente, un total de 430 toneladas de CO₂ durante un año de operación, generado por el funcionamiento de dos motores diésel con una potencia nominal de 298 kW (400 hp) cada uno y un generador diésel de 47 kVA para abastecer el sistema eléctrico. Basándose en los aspectos operacionales del catamarán, se identifican los requerimientos energéticos de los motores y el generador eléctrico, obteniendo así, la demanda energética total del sistema, que ascendió a 1800 kWh.

Con el conocimiento del requerimiento energético de la embarcación, se seleccionaron cinco alternativas para reemplazar la configuración actual: 100% baterías, celdas de combustible, e-combustibles, híbrido electro-diésel e híbrido diésel-hidrógeno. Cada alternativa fue sometida a un análisis detallado de sus componentes, configuración y beneficios medioambientales en la adaptación al catamarán. Después de analizar las variables operacionales, los componentes y las características técnicas de cada una de las alternativas, se elaboró un cuadro comparativo que, a través de criterios de evaluación basados en las ventajas y desventajas de cada alternativa, se obtuvo que la más apropiada, en el largo plazo, es la alternativa de celdas de combustible y baterías de litio.

Para llevar a cabo esta adaptación, se identificaron los principales componentes necesarios: dos celdas de combustible tipo PEM de 205 kW de potencia nominal cada una, un sistema de 16 baterías de litio que deben acumular 528 kWh, un sistema de almacenamiento de hidrógeno formado por 18 cilindros con capacidad para almacenar 250 kg de H₂, y dos motores eléctricos capaces de proporcionar 299 kW de potencia nominal. La implementación de este sistema supuso un aumento del 25% en el volumen y del 15% en el peso total de la embarcación. El incremento de peso debido a la incorporación de los nuevos equipos afecta la potencia y la velocidad de navegación del catamarán. De esta forma y mediante el uso del software MaxSurf se obtuvo una reducción del 4,2% en la velocidad cuando se suministra una potencia máxima de 530 kW al catamarán, lo que significa un aumento de 10,5% en la duración de la navegación.

Finalmente, se ilustra gráficamente la disposición de los componentes principales en los cascos del catamarán, asegurando que se conserve el centro de gravedad actual y evitando que se genere un asiento o encausamiento.

Abstract

The present document outlines the development of a study on the feasibility of implementing clean technologies as energy sources to power a medium-sized tourist vessel. The aim is to reduce or eliminate the CO₂ emissions generated by the combustion of its diesel engines, and for this purpose, a comprehensive literature review was conducted to understand the current state of the technologies used in marine decarbonization. This analysis provided an overview of the available and most promising alternatives for implementation in this project, thus confirming the feasibility of converting the vessel.

In the case study, a catamaran operating on Lake Todos los Santos in the Vicente Pérez Rosales National Park, located in Puerto Varas, Los Lagos Region, was selected. This vessel emits approximately 430 tons of CO₂ during a year of operation, generated by the operation of two diesel engines with a nominal power of 298 kW (400 hp) each, and a diesel generator of 47 kVA to supply the electrical system. Based on the operational aspects of the catamaran, the energy requirements of the engines and the electric generator were identified, thus obtaining the total energy demand of the system, which amounted to 1800 kWh.

With knowledge of the energy requirement of the vessel, five alternatives were selected to replace the current configuration: 100% batteries, fuel cells, e-fuels, electro-diesel hybrid, and diesel-hydrogen hybrid. Each alternative underwent a detailed analysis of its components, configuration, and environmental benefits in adapting to the catamaran. After analyzing the operational variables, components, and technical characteristics of each alternative, a comparative table was drawn up which, through evaluation criteria based on the advantages and disadvantages of each alternative, concluded that the most suitable one in the long term is the fuel cells and lithium batteries alternative.

To carry out this adaptation, the main necessary components were identified: two PEM fuel cells with a nominal power of 205 kW each, a system of 16 lithium batteries capable of storing 528 kWh, a hydrogen storage system consisting of 18 cylinders capable of storing 250 kg of H₂, and two electric motors capable of providing 299 kW of nominal power.

The implementation of this system involved a 25% increase in the volume and a 15% increase in the total weight of the vessel. The weight increase due to the incorporation of the new equipment affects the power and speed of navigation of the catamaran. Thus, using MaxSurf software, a 4.2% reduction in speed was obtained when supplying a maximum power of 530 kW to the catamaran, resulting in a 10,5% increase of sailing duration.

Finally, the graphical layout of the main components in the catamaran hulls is illustrated, ensuring that the current center of gravity is maintained and preventing any seating or channeling.

Índice general

1. Introducción.....	1
2. Estado del Arte	4
2.1. Baterías y motores eléctricos como alternativa en el sector del transporte	4
2.1.1. Contexto internacional	5
2.1.2. Contexto nacional	8
2.2. Hidrógeno como alternativa en el sector del transporte	10
2.2.1. Contexto internacional	11
2.2.2. Contexto nacional	15
2.3. E-Combustible como alternativa en el sector del transporte.....	16
2.3.1. Contexto internacional	18
2.3.2. Contexto nacional	20
3. Metodología	21
3.1. Selección de la embarcación.....	22
3.2. Especificaciones técnicas del catamarán.....	22
3.2.1. Especificaciones técnicas de los componentes del catamarán	24
3.3. Demanda energética	26
3.3.1. Especificaciones operacionales en motores	26
3.3.2. Especificaciones operacionales en generador	27
3.4. Emisiones de CO₂ generadas.....	29
4. Evaluación técnica de las alternativas.....	31
4.1. Tecnología de baterías y motor eléctrico (B-ME)	31
4.1.1. Análisis de baterías	32
4.1.2. Análisis de motores eléctricos	35
4.1.3. Análisis de sistemas complementarios	37
4.2. Tecnología de celda combustible y motor eléctrico (FC-ME)	41
4.2.1. Análisis de las celdas combustible (FC)	42
4.2.2. Análisis del sistema de almacenamiento de hidrógeno.....	44
4.3. E-combustibles (E-fuels)	48
4.3.1. Captura del CO ₂	49
4.3.2. Producción de hidrógeno verde.....	50
4.3.3. Producción de los e-combustibles	53
4.3.4. Proceso adicional	53
4.4. Tecnología híbrida: Eléctrico-Diésel (EL-DI).....	53
4.4.1. Configuración en serie	54
4.4.2. Configuración en paralelo.....	55
4.4.3. Configuración serie-paralelo.....	56
4.5. Tecnología híbrida: Hidrógeno-Diésel (H₂-DI).....	57

5.	<i>Adaptación de alternativas</i>	59
5.1.	Adaptación de un catamarán eléctrico con baterías	59
5.1.1.	Dimensionamiento de baterías	59
5.1.2.	Dimensionamiento de motores eléctricos	60
5.1.3.	Configuración de la adaptación de baterías y motores eléctricos	61
5.2.	Adaptación de un catamarán con celda combustible	61
5.2.1.	Dimensionamiento de la celda combustible	61
5.2.2.	Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de hidrógeno	63
5.2.3.	Dimensionamiento de baterías	64
5.2.4.	Configuración de la adaptación de celda combustible	66
5.3.	Adaptación de un catamarán con e-combustibles	66
5.4.	Adaptación de un catamarán con sistema híbrido eléctrico-diésel	67
5.4.1.	Dimensionamiento del grupo electrógeno	67
5.4.2.	Dimensionamiento del pack de baterías	69
5.4.3.	Configuración de la adaptación de un sistema híbrido eléctrico-diésel	70
5.5.	Adaptación de un catamarán con sistema híbrido diésel-hidrógeno	71
5.5.1.	Configuración de la adaptación del Hydragen	71
6.	<i>Evaluación y selección de alternativa</i>	73
6.1.	Reducción de emisiones de CO₂	73
6.2.	Distribución y comparación de peso y volumen	76
6.3.	Ventajas y desventajas	77
6.3.1.	Estado de desarrollo tecnológico y estructural	77
6.3.2.	Eficiencia operativa, autonomía y mantenimiento	79
6.3.3.	CAPEX y OPEX	81
6.4.	Generación de conceptos y soluciones	83
7.	<i>Adaptación de la alternativa seleccionada</i>	86
7.1.	Análisis de adaptación	86
7.2.	Disposición de los componentes	88
7.3.	Aumento porcentual de peso y volumen	90
7.4.	Flujo energético de la adaptación	91
7.5.	Recomendaciones de disposición de los componentes	91
8.	<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	93
8.1.	Conclusiones generales	93
8.2.	Conclusiones específicas	94
8.3.	Recomendaciones	95
9.	<i>Referencias Bibliográficas</i>	97

10. Anexos	105
------------------	-----

Índice de figuras

<i>Figura 1: Distribución de emisiones de CO₂ para cada sector de transporte. Datos extraídos de [2].</i>	1
<i>Figura 2: Esquema de ambiciones y puntos de referencia indicativos mínimos en la estrategia revisada de GEI de la OMI. [68].</i>	2
<i>Figura 3: Volvo FH Electric tiene un peso bruto máximo de 44 toneladas, camión eléctrico de mayor potencia en Volvo [5]</i>	6
<i>Figura 4: Sunreef 80 ECO, el primer catamarán de lujo eléctrico con paneles solares comercializado.</i>	7
<i>Figura 5: MS Vision of the Fjords [9]</i>	8
<i>Figura 6: Ferris turísticos eléctricos en servicio en las Cataratas del Niagara [12].</i>	8
<i>Figura 7: Crecimiento en la adopción de vehículos eléctricos en Chile [14].</i>	9
<i>Figura 8: Distribución de puntos de carga según su acceso y ubicaciones [13].</i>	10
<i>Figura 9: Existencias de FCEV en el mundo [16].</i>	12
<i>Figura 10: Reducción potencial del costo de producción del hidrógeno verde [73].</i>	12
<i>Figura 11: Energy Observer [20].</i>	14
<i>Figura 12: All American Marine and SIWTCH Maritime ferry “Sea Change” [22].</i>	14
<i>Figura 13: Costo nivelado de producción de hidrógeno verde (USD/kgH₂) más bajo del mundo [23].</i>	15
<i>Figura 14: Costo de producción de e-combustibles por costo de energía en USD/ton.</i> 27.	17
<i>Figura 15: Producción global de hidrógeno por electrólisis que podría ser utilizada para producir e-combustibles por combustible y estado basado en proyectos anunciados para el año 2030 [70].</i>	18
<i>Figura 16: Catamarán Lagos Andinos.</i>	22
<i>Figura 17: Distribución de espacios en los cascos y dimensiones generales.</i>	23
<i>Figura 18: Perfil operacional temporada baja vs temporada alta.</i>	27
<i>Figura 19: Perfil operacional del generador temporada alta vs temporada baja.</i>	28
<i>Figura 20: Esquema eléctrico de un convertidor Buck [45].</i>	39
<i>Figura 21: Esquema eléctrico de un convertidor Boost [45]</i>	40

Figura 22: Esquema electrico de un convertidor Buck-Boost [45].....	40
Figura 23: Esquema de principio de funcionamiento de un FCEV.	41
Figura 24: Principio de funcionamiento y componentes de una celda combustible de membrana PEM. [49].....	42
Figura 25: Comparación de la densidad gravimétrica y la densidad volumétrica para varios combustibles [50.].....	44
Figura 26: Principales formas de almacenamiento del hidrógeno [51].	45
Figura 27: Proceso de producción de los e-combustibles [56]	49
Figura 28: Esquema básico de un electrolizador [55].....	50
Figura 29: Sistema híbrido en serie [60].	54
Figura 30: Sistema híbrido en paralelo [60].....	55
Figura 31: Sistema híbrido serie-paralelo [60].....	56
Figura 32: Imagen referencial del equipo HydraGEN [61].....	57
Figura 33: Diagrama de flujo de configuración baterías y motores eléctricos.	61
Figura 34: Perfil operacional propuesto para de la celda combustible vs curva operacional del catamarán.....	62
Figura 35: Perfil operacional de baterías y celda combustible vs la curva operacional... 	65
Figura 36:Diagrama de flujo configuración híbrida celda combustible y baterías.	66
Figura 37: Perfil operacional del grupo electrógeno vs curva operacional del catamarán.	68
Figura 38: Perfil operacional del grupo electrógeno y baterías vs curva operacional del catamarán.....	70
Figura 39: Diagrama de flujo de la configuración híbrida eléctrico-diésel.....	70
Figura 40: Diagrama de flujo de la configuración híbrida diésel-hidrógeno.	72
Figura 41: Porcentaje de reducción de emisiones de CO₂ en cada alternativa.....	75
Figura 42: Distribución de pesos según los componentes de cada alternativa.	76
Figura 43: Distribución de volumen según los componentes de cada alternativa.	76
Figura 44: Curva de potencia vs velocidad del motor diésel actual vs la configuración de celdas de combustible y baterías.	88
Figura 46: Representación gráfica de la disposición de los componentes en los cascos de la embarcación.	90

Figura 47: Comparativa de peso y volumen entre la configuración diésel actúa vs la alternativa de celdas de combustible..... 90

Figura 48: Configuración de la adaptación..... 91

Índice Tablas

<i>Tabla 1: Características generales de la embarcación.</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2: Dimensiones generales y distribución de espacios del catamarán.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3: Especificaciones técnicas de los motores diésel NTA 855-M.[34].....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4: Especificaciones técnicas de la caja reductora de los motores [35].....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 5: Especificaciones técnicas de los grupos electrógenos. [36] [37].....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 6: Parámetros y valores de operación en motores del catamarán en temp. alta y temp. baja.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 7: Comparación entre los distintas tecnologías de baterías.</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 8: Comparación de características para distintas alternativas de motores eléctricos [42]</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 9: Tipos de celdas combustible según su electrolito [48].</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 10: Comparación de las características técnicas de las celdas combustible [48]..</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 11: Características de baterías seleccionadas 6364.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 12: Parámetros para el dimensionamiento de baterías.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 13:Características del motor eléctrico seleccionado.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 14: Parámetros para el dimensionamiento de los motores eléctricos.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 15: Características de celdas combustible seleccionadas [65] [66].</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 16: Parámetros para el dimensionamiento de las celdas combustible.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 17:Parámetros de dimensionamiento del sistema de almacenamiento.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 18: Parámetros para el dimensionamiento del pack de baterías en un sistema de celda combustible.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 19: Especificaciones técnicas del grupo electrógeno seleccionado [69].</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 20: Parámetros para el dimensionamiento del grupo electrógeno.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 21: Parámetros de dimensionamiento del pack de baterías en un sistema electro-diésel.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 22: Especificaciones técnicas del Hydragen.</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 23: Parametros de dimensionamiento del Hydragen.</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 24:Criterios de evaluación.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 25: Lista de comparación entre los criterios.....</i>	<i>83</i>

Tabla 26: Evaluación de las alternativas según el criterio establecido..... 84

Nomenclatura

CO ₂	Dióxido de Carbono
OMI	Organización Marítima Internacional
EIA	Agencia Internacional de Energía
GEI	Gases de Efecto Invernadero
FCEV	Vehículo Eléctrico con Celda de Combustible
FC	Celdas de Combustible (Fuel Cells)
ERNC	Energías Renovables No Convencionales
SO _x	Óxido de azufre
NO _x	Óxido de nitrógeno
CO	Monóxido de carbono
Gt	Giga toneladas
BEV	Vehículos Eléctricos a Baterías
HEV	Vehículos Híbridos Eléctricos
PHEV	Vehículos Híbridos Eléctricos Enchufables
Hp	Caballos de fuerza (Horse Power)
kW	Kilo Watts
kWh	Kilo Watts Horas
kWp	Kilo Watts Pico
MWh	Mega Watts Hora
MW	Mega Watts
MJ	Mega Julio
H ₂	Hidrógeno
FT	Fischer-Tropsch
TRG	Toneladas de Registro Grueso
BB	Babor
EB	Estribor
Rpm	Revoluciones por minuto
L	Litros
CONAF	Corporación Nacional Forestal
DC/AC	Corriente continua/Corriente alterna
K	Kelvin
Atm	Atmósfera
LH ₂	Hidrógeno Líquido
°C	Centígrados
RoW	Resto del mundo (Rest of the World)
S	Siemens
DICTUC	Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Capítulo 1

1. Introducción

En las últimas décadas, la conciencia y la acción en la lucha contra la contaminación ambiental y la reducción de gases tóxicos y/o de efecto invernadero han adquirido una relevancia cada vez mayor. Esto se ha reflejado en el constante avance de alternativas limpias y carbono neutrales que buscan reducir la huella de carbono global. Ejemplos de estas tecnologías incluyen la electromovilidad, la aplicación del hidrógeno verde en celdas de combustible y la utilización de energías renovables no convencionales (ERNC) para generar energía eléctrica.

En el caso de los vehículos marinos, los niveles de emisiones de contaminantes como el óxido de azufre (SOx), el óxido de nitrógeno (NOx) y el dióxido de carbono (CO₂) son significativos y hasta la fecha no se han implementado restricciones importantes que obliguen a reducir de manera sustancial estas emisiones. En 2020, la Organización Marítima Internacional (OMI) [1], introdujo el reglamento conocido como "OMI 2020", que redujo el límite mundial de contenido de azufre en el combustible de los buques al 0,50% (5000 ppm), en comparación con el 3,50% que había anteriormente. En contraste, el límite de emisiones de azufre en los automóviles es de solo 0,001% (10 ppm). Estas cifras revelan que, hasta la fecha, las restricciones en los vehículos marinos están considerablemente por debajo de las aplicadas a los vehículos terrestres.

Por otro lado, la Agencia Internacional de Energía (IEA) presentó en junio del 2023 la última actualización del reporte de emisiones totales de CO₂ en el sector del transporte [2]. Este informe destaca que el sector terrestre, en el 2022, contribuyó con un total de 5,87 Gt de CO₂, representando el 77% de las emisiones totales. En el caso del sector marino, el total de emisiones fue de 0,89 Gt de CO₂, convirtiéndose el segundo medio de transporte más contaminante en el 2022 con un 11% del total de las emisiones, puesto que ocupaba el sector aéreo antes de la pandemia.

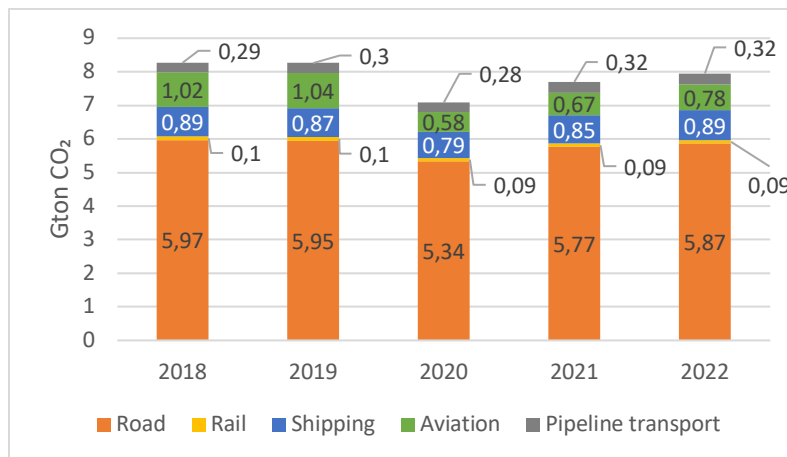


Figura 1: Distribución de emisiones de CO₂ para cada sector de transporte. Datos extraídos de [2].

Si bien, el porcentaje de emisiones de CO₂ del sector marítimo es mucho menor comparado con el sector terrestre, sigue siendo un área de alto interés para la implementación de un plan de descarbonización, ya que al observar la **figura 1**, se puede notar que en el 2022 los niveles de CO₂ en el sector marino alcanzaron su punto más alto, mientras que el sector terrestre experimentó una ligera disminución de 0,1 Gt CO₂.

En un estudio realizado por DVN [68], se comenta que, en julio de 2023, la OMI completó la primera revisión de su estrategia de reducción de gases de efecto invernadero (GEI). La revisión reforzó significativamente las ambiciones para la navegación internacional en comparación con la ambición inicial de la estrategia de reducir en un 50% las emisiones de GEI para 2050. La estrategia revisada, mostrada en la figura 2 y que toma como año base el 2008, ahora tiene como objetivo reducir las emisiones de GEI desde la extracción hasta la llegada ("well-to-wake") en un 20%, con el esfuerzo de alcanzar un 30% para el 2030; luego un 70%, con el esfuerzo de alcanzar un 80% para el año 2040; y llegar al cero neto para el año 2050".

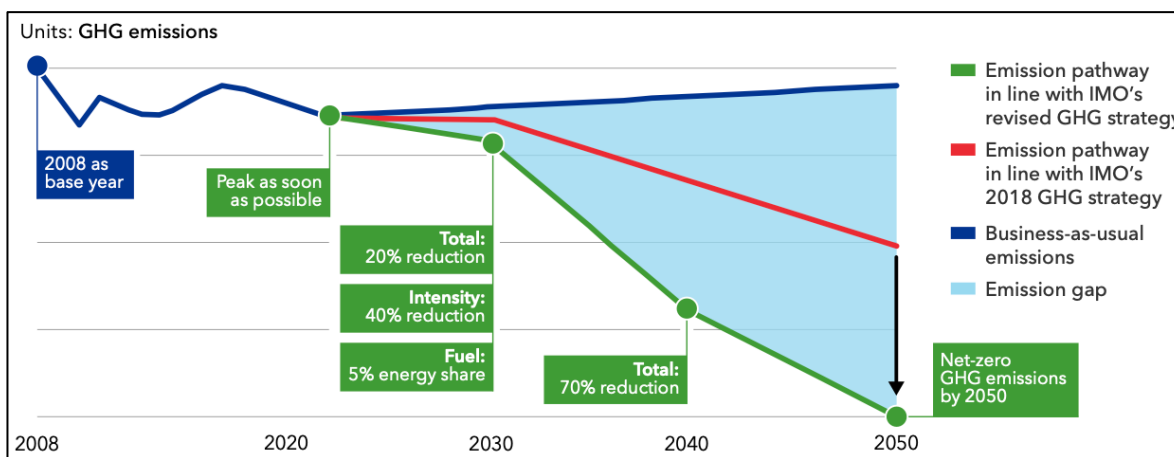


Figura 2: Esquema de ambiciones y puntos de referencia indicativos mínimos en la estrategia revisada de GEI de la OMI. [68]

En la actualidad, Chile es considerado como uno de los países más idóneos para lograr la carbono neutralidad, debido a sus abundantes recursos naturales. En este contexto, el gobierno chileno, a partir de sus “Programas Tecnológicos Estratégicos”, pretende aumentar y fomentar la innovación en los diversos sectores con el objetivo de alcanzar la carbono neutralidad propuesta para el año 2050. Sin embargo, la mayoría de los programas desarrollados en el sector de transporte abarcan, en gran parte, a los vehículos terrestres, por lo que no existe un proyecto de gran envergadura dirigido netamente al sector marino. Por lo tanto, este trabajo investigativo, donde se quiere realizar el estudio de la factibilidad en el uso de tecnologías limpias que permitan disminuir las emisiones de CO₂ de una embarcación turística mediana, busca impulsar el desarrollo de nuevos proyectos capaces de contribuir con la reducción de emisiones en el sector marino.

En este contexto, tecnologías recientes como las celdas de combustible de hidrógeno verde y los e-combustibles, junto con tecnologías más desarrolladas y ampliamente aplicadas

en el mercado nacional e internacional, como las baterías y las aplicaciones híbridas, se presentan como alternativas atractivas para lograr la carbono neutralidad en el sector transporte. Si bien son tecnologías en desarrollo y su costo es alto aún, siempre es bueno tener claridad sobre lo que significa cada una de ellas para el caso que se requiera una conversión en embarcaciones medianas. Con ello se abre una puerta para este proyecto de título que abarca un pre-estudio de la implementación de cada una de estas alternativas, más que nada desde el punto de vista técnico con un breve análisis económico.

En resumen, este proyecto aspira a contribuir al desafío de descarbonización del sector marítimo en Chile. El uso de alguna de estas alternativas como fuente de energía puede reducir significativamente (alternativas híbridas) o incluso eliminar por completo las emisiones de CO₂, considerando que la obtención de combustibles como el hidrógeno verde se realiza a través de hidrólisis, que los e-combustibles se generan mediante la síntesis entre hidrógeno verde y CO₂ capturado del ambiente, y que ambos procesos se llevan a cabo utilizando fuentes de energía renovable no convencionales (ERNC)

Objetivo principal

Evaluar la factibilidad en la implementación de nuevas tecnologías limpias que permitan disminuir o eliminar las emisiones de dióxido de carbono generadas por una embarcación turística mediana.

Objetivos específicos

1. Realizar un estudio de las alternativas limpias disponibles para el impulso de la embarcación.
2. Identificar las características técnicas y de operación de la embarcación.
3. Evaluar los escenarios de las alternativas aplicadas a la embarcación.
4. Estudiar la factibilidad en la implementación de la alternativa seleccionada.

Capítulo 2

2. Estado del Arte

En este capítulo, se presenta una síntesis de la información bibliográfica recopilada sobre las alternativas propuestas para impulsar el funcionamiento de vehículos marinos mediante tecnologías limpias, con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂. También, se analiza el principio de funcionamiento de estas tecnologías, cómo se obtienen y cuál es su impacto en el desempeño de los vehículos marinos.

Se examina el estado actual de Chile en relación con las tecnologías limpias y se evalúa la disponibilidad de recursos y facilidades para llevar a cabo un estudio de factibilidad de un proyecto en esta área. Además, se revisa la experiencia internacional para comprender el potencial que cada una de estas alternativas tiene para contribuir en la reducción de emisiones de CO₂ en el sector marítimo.

En resumen, este capítulo proporciona una visión general de las tecnologías limpias aplicables a vehículos marinos al considerar su viabilidad en el contexto chileno y su relevancia a nivel internacional en la búsqueda de soluciones para reducir las emisiones de CO₂ en el transporte marítimo.

2.1. Baterías y motores eléctricos como alternativa en el sector del transporte

Los vehículos que utilizan baterías y motores eléctricos se pueden clasificar en 3 tipos: los que funcionan solo con baterías y motores eléctricos se les conoce como vehículo eléctrico a batería (BEV) el cual sustituye por completo el combustible fósil y motores de combustión por un pack de baterías y motor eléctrico para impulsar el vehículo. Por otro lado, se tienen los vehículos híbridos (HEV) o híbridos enchufables (PHEV), los cuales mantienen el combustible fósil, pero cuenta con un sistema de baterías y motores eléctricos que permiten disminuir de manera significativa las emisiones de CO₂.

A medida que pasan los años, se ha observado que las baterías y motores eléctricos toman cada vez más relevancia en el transporte, desplazando poco a poco a los vehículos de combustión interna, debido a los beneficios medioambientales que conlleva este cambio, ya que se trata de una tecnología que disminuye (HEV, PHEV) o elimina por completo (BEV) las emisiones de CO₂ durante su funcionamiento. Por otro lado, la eficiencia de esta tecnología ha ido en aumento, por lo que la autonomía que entregan es cada vez más comparable que con la tecnología actual.

2.1.1. Contexto internacional

Como se ha mencionado antes, actualmente la descarbonización del sector del transporte es un tema de gran relevancia a nivel global. La implementación de tecnologías de baterías y motores eléctricos ha representado un avance significativo en este campo. Sin embargo, es importante señalar que este avance ha sido más evidente en el caso de los vehículos livianos que en el de los vehículos de carga pesada. La razón principal radica en que los vehículos de carga pesada demandan baterías más grandes y potentes, lo que implica una ingeniería más compleja y costos asociados más elevados. Además, la infraestructura de carga también constituye un obstáculo considerable, dado que se requieren sistemas de carga robustos capaces de proporcionar la autonomía necesaria a las baterías para su operación eficiente.

Según el último informe de la Agencia Internacional de Energía (IEA) [4] sobre la cantidad de vehículos eléctricos a batería (BEV) en todo el mundo, se constata que para el 2022, había un total de 18,93 millones de vehículos livianos, que incluyen automóviles y vanes. En contraste, el número de vehículos de carga pesada, como autobuses y camiones eléctricos, ascendía a 1 millón de unidades. Esto representa solamente el 5,3% del total de vehículos eléctricos a batería, lo que subraya la disparidad en la adopción de estas tecnologías entre los dos segmentos de vehículos.

Lo mismo ocurre con la tecnología híbrida, donde la cantidad de vehículos livianos, al 2022, ascendió a 7,9 millones, mientras que el número de vehículos de carga pesada ascendió a 121 mil. Esto significa que solo el 1,5% de los vehículos híbridos son de carga pesada.

Esta disparidad refleja un desafío importante en la transición hacia un transporte más sostenible, ya que los vehículos de carga pesada, a menudo utilizados en el transporte de mercancías a larga distancia, tienen un impacto significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero. Para lograr una descarbonización efectiva en el sector del transporte, es esencial promover y acelerar la adopción de tecnologías limpias en los vehículos de carga pesada, lo que requerirá inversiones, desarrollo tecnológico y políticas adecuadas que fomenten su uso y difusión.

En el ámbito internacional, en lo que respecta a camiones de carga pesada, vehículos que requieren altos niveles de potencia, se han desarrollado varios modelos listos para su comercialización. Un ejemplo destacado es la línea de camiones de la empresa Sueca Volvo, que ha logrado vender más de 2600 vehículos en toda Europa. Estos camiones cuentan con una autonomía de 300 kilómetros. Lo que los hace adecuados para tareas de transporte de mediana distancia.

Un aspecto notable de estos camiones Volvo es su potencia, ya que la variante de mayor rendimiento está equipada con tres motores eléctricos capaces de proporcionar una potencia máxima de 600 kW, equivalente a 816 hp. Además, estos vehículos están

equipados con entre 4 y 5 paquetes de baterías, con una capacidad total que oscila entre 450 y 540 kWh [5]. Esto asegura que los camiones puedan cumplir con los requisitos de potencia y autonomía necesarios para satisfacer las demandas del sector de transporte pesado y contribuir a la reducción de emisiones de un sector del transporte de carga.



Figura 3: Volvo FH Electric tiene un peso bruto máximo de 44 toneladas, camión eléctrico de mayor potencia en Volvo [5]

La tecnología de baterías y motores eléctricos ha experimentado un rápido desarrollo en el sector de vehículos terrestres, lo que ha llevado a la proliferación de vehículos eléctricos e híbridos y a una transición hacia un transporte más limpio y sostenible. Sin embargo, este avance no se ha reflejado de la misma manera en la industria del transporte marítimo. Esto se debe a desafíos particulares asociados con el peso y el volumen requerido para los sistemas de baterías y motores eléctricos cuando se busca mantener el mismo rendimiento y autonomía que ofrecen los motores diésel. Además, la necesidad de contar con infraestructura de carga de baterías en los puertos agrega una complejidad adicional a la adopción de esta tecnología en embarcaciones marítimas [6]

A pesar de estos desafíos, a nivel internacional, se han implementado algunas aplicaciones en las que la tecnología eléctrica y las energías renovables están siendo utilizadas de manera innovadora. Un ejemplo destacado es el caso de Sunreef Yachts en Polonia, que en 2022 comenzó a comercializar el primer catamarán de lujo totalmente eléctrico con paneles solares, conocido como Sunreef 80 ECO. Este catamarán está equipado con dos motores eléctricos de 360 kW de potencia nominal cada uno y un banco de baterías que tiene una capacidad que oscila entre 360 y 640 kWh. Cada una de estas baterías presenta una densidad energética de menos de 5,2 kg/kWh. Además, la embarcación tiene capacidad para alojar hasta 10 pasajeros y cuenta con un área de 164 m² cubierta por paneles solares que generan hasta 40 kWp de energía [7]



Figura 4: Sunreef 80 ECO, el primer catamarán de lujo eléctrico con paneles solares comercializado.

Por el lado del turismo, es alentador ver que en el sector de las embarcaciones se están dando pasos significativos hacia la adopción de tecnologías más limpias y sostenibles. Esto, seguramente, también impulsado por el turista más consciente con su entorno.

La empresa noruega “The Fjords” [8], por ejemplo, es una compañía naviera basada en una idea fundamental de combinar la industria marítima y el turismo para contribuir al desarrollo de destinos turísticos deseados y sostenibles, posee actualmente 3 embarcaciones de tipo catamarán que contribuyen a la disminución de emisiones de CO₂, cada uno de estos cuenta con una eslora de 42,5 m y capacidad de transportar 400 pasajeros a una velocidad de 19 nudos:

- **MS Vision of the Fjords.** Es un catamarán turístico que opera desde el 2016 de tipo híbrido diésel-eléctrico. El MS Vision cuenta con dos motores diésel de 749 kW cada uno, como principal fuente de potencia y con dos generadores diésel de 200 kW. Estos generadores entregan energía a 2 packs de baterías de 285 kWh que, a su vez, alimentan dos motores eléctricos de 150 kW cada uno [9].
- **MS Future of the Fjords.** Es un catamarán turístico que opera desde el 2018 de tipo eléctrico. El MS Future cuenta con dos motores eléctricos de 450 kW cada uno, los cuales son alimentados con un pack de baterías de 2,4 MWh [10].
- **MS Legacy of the Fjords.** Es un catamarán turístico que opera desde el 2020 de tipo eléctrico. El MS Legacy, al igual que el MS Future, cuenta con dos motores eléctricos de 450 kW alimentados por un pack de baterías de 2,4 MWh [11].



Figura 5: MS Vision of the Fjords [9]

Maid of the Mist, una empresa que opera en las Cataratas del Niágara introdujo en octubre de 2020 dos ferris totalmente eléctricos para ofrecer experiencias más ecológicas a los visitantes. Estas embarcaciones son alimentadas por dos bancos de baterías con una capacidad combinada de 316 kWh. Estas baterías suministran energía a motores eléctricos capaces de generar hasta 400 kW de potencia de salida [12].



Figura 6: Ferris turísticos eléctricos en servicio en las Cataratas del Niágara [12].

2.1.2. Contexto nacional

En Chile, se ha observado un crecimiento significativo en la adopción de vehículos eléctricos, lo que indica un compromiso con la movilidad sostenible. Según el Ministerio de Energía (2023) [14], hasta mayo del 2023 se contabilizaban cerca 6600 vehículos eléctricos en el país, de los cuales 3134 eran BEV, 1186 PHEV, 2171 buses y 109 camiones eléctricos. Es notable que, desde diciembre de 2017, la cantidad de vehículos eléctricos en Chile (243) haya presentado un aumento de más de 25 veces.

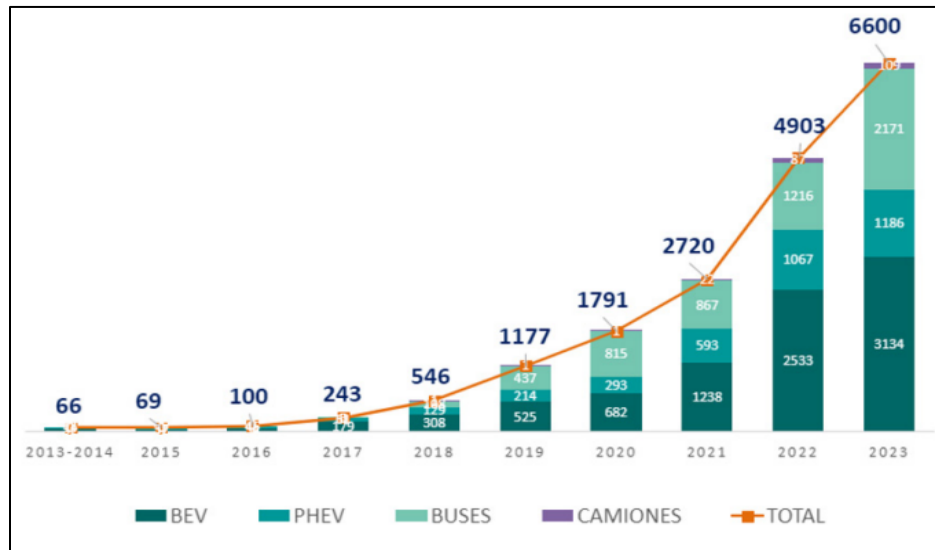


Figura 7: Crecimiento en la adopción de vehículos eléctricos en Chile [14].

Según el Ministerio de Energía (2022) [13], el gobierno chileno ha establecido metas ambiciosas a mediano y largo plazo para promover la transición hacia vehículos de cero emisiones. Estas metas incluyen que el 100% de las nuevas incorporaciones al transporte público urbano sean vehículos de cero emisiones para 2035, que el 100% de las ventas de vehículos livianos y medianos sean de cero emisiones para 2035, y que el 100% de las ventas de vehículos para transporte de pasajeros interurbanos y transporte terrestre de carga sean de cero emisiones para 2045. Además, se busca que el 100% de las ventas de maquinaria de más de 560 kW de potencia sea de cero emisiones a partir de 2035, y de más de 19 kW a partir de 2040. Estas metas indican un fuerte compromiso con la descarbonización del sector del transporte en Chile.

“Es alentador ver que en Chile se ha continuado con la expansión infraestructura de carga para vehículos eléctricos, lo que es fundamental para respaldar el crecimiento de esta tecnología y hacerla más accesible para los conductores. Al cierre del primer semestre de 2023, el país contaba con un total de 908 puntos de carga públicos distribuidos en todo el país (figura 8), además de 521 instalaciones de cargadores de carácter privado”. Taborelli, M. (2023) [15].

Dentro de los cargadores públicos, se aprecia una diversificación en la oferta, con 577 cargadores semirrápidos, 269 rápidos, 60 ultrarrápidos y dos lentos. Esta variedad de opciones proporciona flexibilidad a los usuarios y garantiza que los vehículos eléctricos puedan cargar de manera eficiente en una variedad de ubicaciones y niveles de velocidad de carga.

Las 521 instalaciones de cargadores privados representan un total de 852 cargadores y 991 conectores, lo que equivale a una potencia instalada de 9,11 MW.

En conjunto, esta infraestructura de carga pública y privada contribuye significativamente a la comodidad y la viabilidad de la movilidad eléctrica en Chile, lo

que a su vez respalda los objetivos de descarbonización y la transición hacia una movilidad más sostenible en el país.

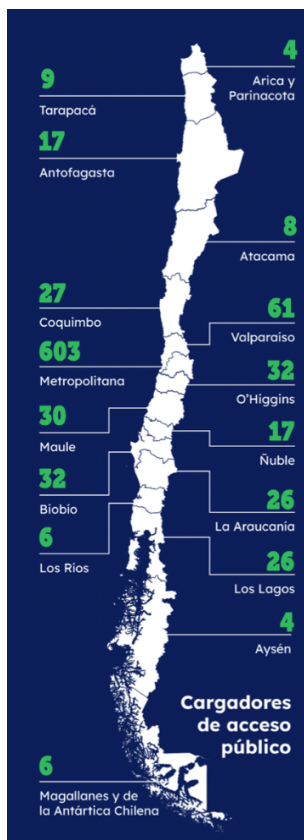


Figura 8: Distribución de puntos de carga según su acceso y ubicaciones [13].

Sin embargo, en el ámbito marítimo, las tecnologías de baterías y motores eléctricos enfrentan desafíos adicionales, como el peso y el espacio requerido, lo que ha llevado a considerar otras alternativas como los biocombustibles o las celdas de combustible como soluciones energéticamente más eficientes y viables para el sector marino. La elección de la tecnología adecuada para el transporte marítimo dependerá de diversos factores, incluidos los requisitos de potencia, autonomía y la disponibilidad de infraestructura de carga en puertos.

2.2. Hidrógeno como alternativa en el sector del transporte

El hidrógeno es un elemento químico que ha ganado una importancia creciente en la búsqueda de alternativas para sustituir los combustibles fósiles convencionales y reducir la huella de carbono asociada a las emisiones de los vehículos de combustión. Su relevancia radica en varias características únicas y ventajosas.

Es importante destacar que, a pesar de que el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, no se encuentra en su forma pura en la naturaleza, sino que generalmente está combinado con otros elementos, como el oxígeno, para formar moléculas de agua

(H₂O). Para obtener hidrógeno puro, se requieren diferentes procesos de separación, y uno de los métodos más destacados, hoy en día, es la electrólisis del agua.

Cuando se realiza la electrólisis del agua utilizando energías renovables no convencionales (ERNC), como la solar o la eólica, el hidrógeno producido se denomina "hidrógeno verde". Este término enfatiza la sostenibilidad del proceso, ya que la energía necesaria para dividir las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno proviene de fuentes limpias y renovables. Esto significa que el hidrógeno verde se produce de manera ambientalmente amigable, sin generar emisiones de gases de efecto invernadero ni contaminantes.

Una característica relevante del hidrógeno es que presenta una densidad energética excepcionalmente alta por unidad de masa, con 120 MJ/kg, casi tres veces mayor que la de la gasolina, que tiene 46 MJ/kg. Esta alta densidad energética lo hace atractivo como fuente de energía para vehículos y aplicaciones de movilidad, ya que proporciona una gran cantidad de energía en relación con su peso.

El hidrógeno puede utilizarse en sistemas electroquímicos llamados celdas de combustible, que generan energía eléctrica mediante reacciones químicas entre el hidrógeno y el oxígeno, produciendo electricidad, agua y calor. Esto promueve la electromovilidad y ofrece una alternativa limpia y eficiente para propulsar vehículos y equipos.

La iniciativa para el uso del hidrógeno verde como combustible ya es una realidad en varios países, incluyendo Estados Unidos, Canadá, Alemania, Italia, Japón y Chile, que forman parte de movimientos como "The Hydrogen Initiative" (H2I). Este tipo de iniciativas gubernamentales tiene como objetivo acelerar el desarrollo y la comercialización del hidrógeno y las tecnologías de celdas de combustible en diversas áreas de la economía, lo que refleja el compromiso global con la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles [16].

2.2.1. Contexto internacional

La demanda global de hidrógeno ha experimentado un aumento significativo en los últimos años, alcanzando aproximadamente 94 millones de toneladas para el año 2021, lo que representa un aumento del 5% en comparación con el año anterior. Este aumento se debe en gran parte a la creciente demanda en aplicaciones tradicionales del hidrógeno, como la industria y la refinería. Sin embargo, las nuevas aplicaciones, especialmente los vehículos con celdas de combustible (FCEV), también han impulsado el desarrollo y la demanda de hidrógeno.

Según IEA (2022) [16], hasta fines de 2021, se habían registrado más de 51.000 FCEV en todo el mundo, lo que marcó un aumento significativo en comparación con los 33.000 vehículos registrados en 2020. Este aumento del 15% en la existencia de FCEV se confirmó para junio de 2022, cuando se estimó que había cerca de 60.000 vehículos impulsados por hidrógeno en todo el mundo.

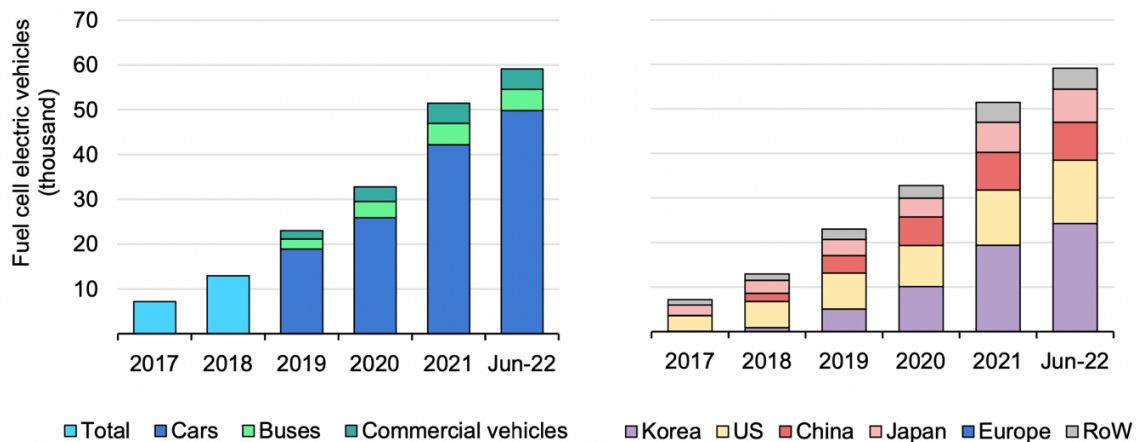


Figura 9: Existencias de FCEV en el mundo [16]

Si bien la mayoría de estos vehículos son livianos y de pasajeros, China se destacó en el segmento de vehículos de carga pesada impulsados por hidrógeno, con aproximadamente 800 vehículos de carga pesada en operación en 2021. Esto demuestra que las celdas de combustible también son aplicables en vehículos pesados [16]

A pesar del considerable avance en la utilización del hidrógeno verde como combustible alternativo en la búsqueda de un entorno sin emisiones, en la actualidad no es un competidor del combustible convencional debido a sus elevados costos de producción. No obstante, a largo plazo, según IRENA (2021) [73], se puede lograr una reducción de hasta un 85% en los costos de producción del hidrógeno verde. Esto se puede conseguir mediante una combinación de factores como la obtención de electricidad a un costo más económico, la disminución de los costos de capital de los electrolizadores, un incremento en la eficiencia y una optimización en la operación de los mismos.

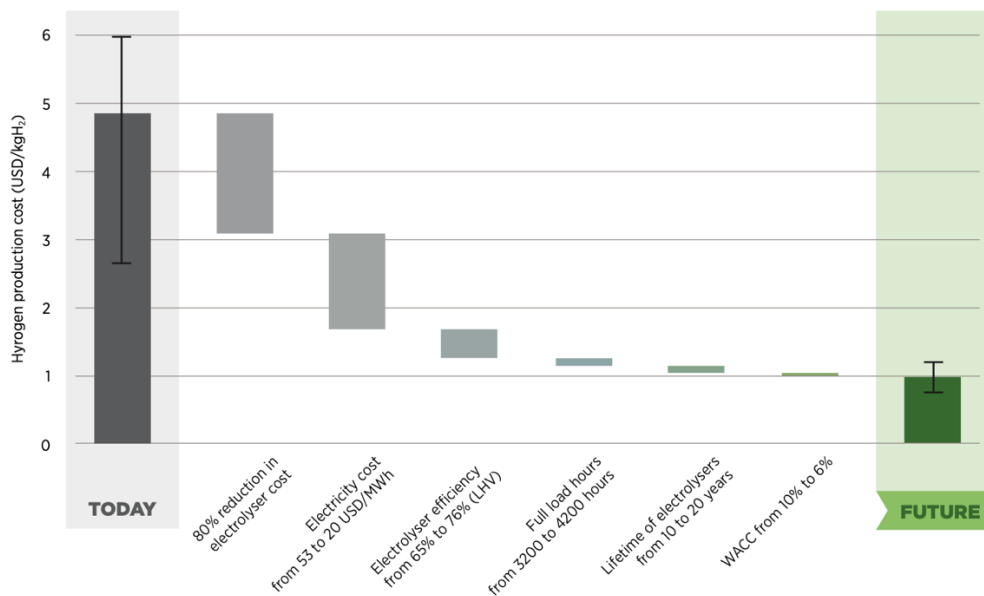


Figura 10: Reducción potencial del costo de producción del hidrógeno verde [73]

En Estados Unidos, la empresa Nikola ha desarrollado el prototipo "Tre FCEV Alpha", un camión de carga pesada impulsado por celdas de combustible. Este vehículo cuenta con dos paquetes de baterías con una capacidad total de 140 kWh y un sistema de almacenamiento de aproximadamente 70 kilogramos de hidrógeno, que alimenta dos celdas de combustible de 100 kW cada una, generando una potencia total continua de 480 kW [17]

En Corea del Sur, Hyundai Motor lanzó el camión "XCIENT FUEL CELL" en 2020. Este vehículo está impulsado por dos celdas de combustible de 90 kW cada una, que alimentan un motor de 350 Kw de potencia nominal. El "XCIENT" cuenta con siete depósitos de hidrógeno que proporcionan una autonomía máxima de 400 km por carga y un sistema de baterías de iones de litio con una capacidad total de 72 kWh. Actualmente, la empresa ya ha desplegado 47 unidades en Suiza donde prestan servicio a 23 clientes y han acumulado cerca de 4 millones de km conducidos hasta julio del 2022. También se han vendido 27 unidades en Alemania, los cuales serán utilizados por 7 empresas distintas dedicadas a la logística [19]

El "Energy Observer" (**figura 11**) es un catamarán revolucionario que representa un emocionante paso hacia un transporte marítimo más sostenible y ecológico. Este proyecto, en el que participan empresas francesas como Accor, Thelem, Grupe BPCE e internacionales como Toyota, comenzó en Francia en 2018, busca promover la innovación en el uso de energías renovables y educar sobre los desafíos relacionados con la energía limpia y la conservación del medio ambiente.

Este catamarán utiliza tres fuentes de energía renovable principales:

1. **Energía Solar:** El "Energy Observer" está equipado con un conjunto de paneles solares con una superficie de 202 metros cuadrados. Estos paneles pueden generar hasta 34 kWp de energía, lo que proporciona una fuente constante de electricidad a bordo. En promedio, produce alrededor de 120 kWh de energía al día, lo que permite alimentar al sistemas a bordo.
2. **Energía Eólica:** Para aumentar la velocidad y generar hidrógeno, el catamarán cuenta con dos velas Oceanwings de 12 metros de envergadura. Estas velas capturan la energía eólica y contribuyen a la propulsión del barco. Además, se utiliza la energía eólica para llevar a cabo el proceso de electrólisis para generar hidrógeno a partir del agua marina.
3. **Hidrógeno:** El catamarán está equipado con una celda de combustible que puede generar hasta 20 kW de energía eléctrica. Esta celda de combustible utiliza el hidrógeno producido mediante la electrólisis del agua marina. El hidrógeno se almacena en ocho tanques con una capacidad total de 332 litros, lo que equivale a aproximadamente 63 kg de hidrógeno. Esta energía se utiliza para alimentar el barco y sus sistemas eléctricos cuando no se dispone de suficiente energía solar o eólica.

Además de estas fuentes de energía renovable, el "Energy Observer" también cuenta con un conjunto de baterías con una capacidad de 112 kWh. Estas baterías permiten almacenar el exceso de energía generado por el sistema de paneles solares y las velas en

momentos en que la demanda es baja y liberar esa energía cuando se necesita, lo que contribuye a mantener el funcionamiento del barco de manera eficiente y sostenible [20]



Figura 11: Energy Observer [20]

A lo largo de su viaje, que ya ha cubierto más de 970,000 km, el "Energy Observer" ha demostrado la viabilidad de estas tecnologías y ha llevado a cabo investigaciones valiosas sobre la integración de múltiples fuentes de energía renovable en una embarcación. Su presencia en la isla de Mahe, Seychelles, representa un hito importante en su viaje hacia la promoción de soluciones sostenibles para el transporte marítimo y la conciencia ambiental [21].

En Estados Unidos, la empresa All American Marine y SWITCH Maritime anunciaron el ferry eléctrico "Sea Change", impulsado por hidrógeno y celdas de combustible. Este ferry tiene una capacidad de 75 pasajeros y utiliza una celda de combustible de 360 kW alimentada por un sistema de almacenamiento de 246 kg de hidrógeno. También cuenta con una batería de iones de litio y dos motores eléctricos de 300 kW para la propulsión [22]. Se espera que el "Sea Change" realice su primer viaje con pasajeros a finales de 2023 o principios de 2024.



Figura 12: All American Marine and SWITCH Maritime ferry "Sea Change" [22].

2.2.2. Contexto nacional

Después de varias décadas donde se cuestionaba el potencial energético del hidrógeno como sustituto de las tecnologías convencionales, hoy este elemento paso a ser una de las alternativas más populares para acabar con el aumento de las emisiones contaminantes, por lo que ha tomado un rol protagónico en la transición energética en el mundo.

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA) en su informe de 2022, se prevé que la demanda global de hidrógeno alcance los 115 millones de toneladas para el año 2030 [16]. Esto sitúa a Chile en una posición ideal, ya que, según la IEA, el país tiene una capacidad anual de producción de hidrógeno verde de aproximadamente 160 millones de toneladas, superando la estimación de la demanda para el año 2023. Esta ventaja se debe a que Chile es rico en fuentes de energía renovable, con un potencial energético que supera los 1800 GW, lo que equivale a 70 veces la demanda nacional. Además, en los últimos seis años, Chile ha quintuplicado su capacidad de generación de energía renovable, y se proyecta que para el año 2030, el 70% de su matriz energética provendrá de fuentes renovables.

Estas capacidades se deben, en parte, a las características geográficas de Chile, como la alta radiación solar en el norte del país y las características de los vientos en la costa del extremo austral, que se compara favorablemente con la de las zonas off-shore en otros países. Por ello, según la Estrategia nacional del hidrógeno verde [23], Chile cuenta con uno de los costos de producción de hidrógeno verde más bajos a nivel mundial (actualmente no hay producción) como se muestra en la **figura 13**, lo que lo convierte en uno de los productores de hidrógeno verde más competitivos del planeta.

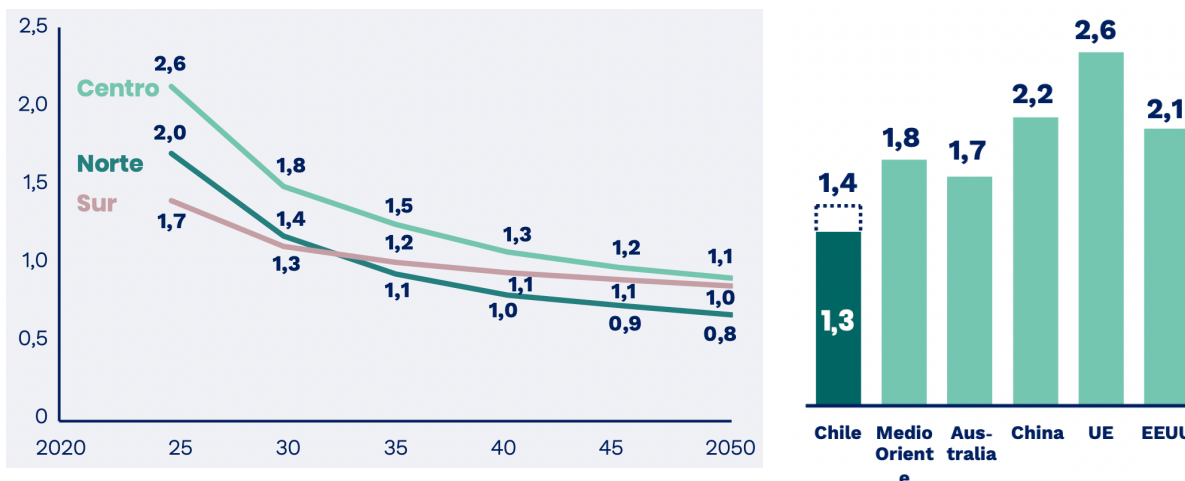


Figura 13: Costo nivelado de producción de hidrógeno verde (USD/kgH₂) más bajo del mundo [23].

Para aprovechar esta ventaja y conquistar el mercado global antes de 2030, el país ha implementado una estrategia nacional que se divide en tres etapas [23].

La primera fase, que abarca desde 2020 hasta 2025, se enfoca en activar la industria local y promover seis aplicaciones prioritarias, como el transporte de carga pesada, a

través de regulaciones que estimulen la producción de hidrógeno y fomenten la demanda de este combustible y sus derivados. Esta iniciativa busca establecer una cadena de suministro sólida, desarrollar la infraestructura necesaria y acumular conocimientos clave que permitirán a Chile acceder a mercados extranjeros y avanzar en la importación.

Las siguientes etapas, programadas para los períodos 2025-2030 y después de 2030, se centran en la expansión de la industria de producción de amoníaco verde y en consolidar la posición de Chile como un proveedor líder de energía limpia a nivel global. Esto se logrará a través de la exportación de amoníaco e hidrógeno verde, así como de e-metanol y combustibles sintéticos.

Por último, es importante destacar que en esta sección no se ha mencionado el uso de hidrógeno como combustible principal en vehículos terrestres y marinos en el mercado chileno. Esto se debe a que Chile está actualmente enfocado en fomentar y desarrollar la producción de e-metanol, hidrógeno verde y combustibles sintéticos en lugar de priorizar aplicaciones existentes que empleen hidrógeno como su principal fuente de energía. Un ejemplo ejemplar de esta estrategia es la planta Haru Oni, ubicada en la Región de Magallanes, la cual se caracteriza por ser una de las primeras de su tipo a nivel mundial y la más grande en América Latina. Esta instalación utiliza la energía eólica para generar hidrógeno verde. Además, el proyecto incluye un componente dedicado a la captura de dióxido de carbono de la atmósfera y, mediante un proceso de síntesis que combina el dióxido de carbono capturado y el hidrógeno, se produce combustible sintético [24]

De esta manera, el enfoque actual de Chile se centra en el hidrógeno verde como parte de su estrategia energética nacional, y aunque no se haya mencionado específicamente su aplicación en vehículos terrestres y marinos, su uso en el sector del transporte se considera un objetivo fundamental a nivel nacional. La implementación de hidrógeno verde en el transporte desempeñaría un papel significativo en la resolución de los desafíos ambientales y energéticos establecidos en el país.

2.3. E-Combustible como alternativa en el sector del transporte

Actualmente, el sector del transporte se encuentra inmerso en la revolución de la electromovilidad. Esto no constituye una sorpresa, ya que estas tecnologías han demostrado una reducción significativa en las emisiones de CO₂. Sin embargo, es crucial destacar que tanto los vehículos eléctricos como los de hidrógeno requieren diseños específicos para lograr un funcionamiento eficiente.

En el contexto de acelerar la transición hacia fuentes de energía más sostenibles, uno de los desafíos fundamentales es permitir que los vehículos existentes operen sin aumentar la contaminación ambiental, facilitando así una transición gradual hacia las nuevas tecnologías. Aquí es donde entra en juego un innovador concepto: los "E-combustibles" o "Electro-combustibles".

Los E-combustibles son combustibles sintéticos producidos mediante la combinación de hidrógeno generado a través de la electrólisis del agua y CO₂ capturado del ambiente, utilizando fuentes de energía renovable. Estos se consideran combustibles de carbono

neutral, ya que el CO₂ liberado durante la combustión es equivalente al CO₂ previamente capturado del entorno. El proceso de síntesis puede dar lugar a diversos tipos de E-combustibles, como el e-Diesel, e-Amonio, e-Metanol, e-Hidrógeno, cada uno con ventajas específicas según su aplicación.

Lo más destacable de estos E-combustibles es que solo requieren modificaciones mínimas en la tecnología de los vehículos de combustión interna existentes. Por ejemplo, según Efuels Allience [25], el e-Diesel puede utilizarse en motores Diesel con una eficiencia cercana al 30-36%, lo que se asemeja a la eficiencia alcanzada con Diesel convencional. Esto sugiere que los E-combustibles podrían ser una solución viable para mantener los niveles de CO₂ en la atmósfera bajo control y reemplazar efectivamente los combustibles fósiles tradicionales mientras las alternativas de cero emisiones continúan su desarrollo.

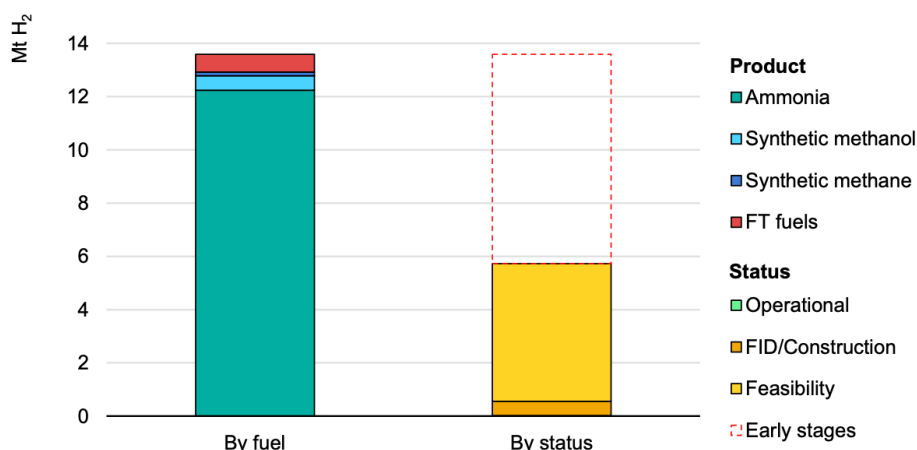
Sin embargo, dado que esta alternativa es relativamente nueva, actualmente son pocos los países que están llevando a cabo proyectos relacionados con los E-combustibles. Esto se debe en gran parte al considerable consumo de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables requerido en el proceso. Según Monika Griefahn (2022), aproximadamente el 60% del costo de producción de E-combustibles se destina a la obtención de hidrógeno mediante la electrólisis [26]. No obstante, según Lindstad, E., Lagemann, B., Riialand, A., Gamlem., G. and Valland, A. (2021) [27], tal como se muestra en la **figura 14**, si la producción de E-combustibles se realiza en un sector favorable donde los costos asociados a generación de energía renovable sean bajos, podría convertirse en una alternativa atractiva

Fuel types	Engine Type	GHG Emissions						Energy usage		New Built cost			Fuel Cost			
		LCV	WTT	TTW CO ₂	TTW CH ₄	TTW N ₂ O	WTW	WTW Input / Power Output	Engine	Tanks and add-ons such as scrubber	Total CAPEX	Low	High	Low per GJ	High per GJ	
		Mj/kg	g CO ₂ e/MJ – 100 yrs				MJ/MJ	USD/kW	USD / ton		USD/GJ					
Renewable Electricity							1.5					230	700	5.4	16.3	
Natural Gas		49.2	18.5									300		7.0		
Crude Oil (60 USD/barrel)		41.9										420		10.0		
HFO&Scrubber	Diesel	40.2	9.6	77.5	0.2	1.1	88.5	2.3	400	300	700	365	365	8.8		
VLSFO	Diesel	41.0	13.2	77.6	0.2	1.1	92.1	2.4	400	0	400	440	440	10.6		
MGO	Diesel	42.7	14.4	75.1	0.2	1.1	90.8	2.4	400	0	400	500	500	12.0		
LNG	DF	49.2	18.5	56.1	1.0	0.7	76.3	2.4	800	600	1400	380	380	9.0		
	Diesel															
LNG	DF Otto	49.2	18.5	56.1	10.4	0.7	85.7	2.4	400	600	1000	380	380	9.0		
LPG	DF	46.0	8.3	66.0	0.2	0.7	75.2	2.2	600	200	800	460	460	11.0		
	Diesel															
Liq.Hydrogen (NG)	Fuel Cell	120.0	150.8	0.0	0.0	0.0	150.8	4.5	1500	1200	2700	1,100	1,100	26.3		
E-Liq. Hydrogen	Fuel Cell	120.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1500	1200	2700	925	1,750	22.0	41.6	
Ammonia (NG)	DF	18.6	121.4	0.0	0.0	5.3	126.7	3.8	800	600	1400	1,100	1,100	26.3		
	Diesel															
E-Ammonia	DF	18.6	0.0	0.0	0.0	5.3	5.3	4.2	800	600	1400	940	1,750	22.0	41.0	
	Diesel															
E-LNG	DF Otto	49.2	0.0	0.0	10.4	0.7	11.1	6.2	400	600	1000	1,350	3,000	31.2	69.3	
E-LNG	DF	49.2	0.0	0.0	1.0	0.7	1.7	6.1	800	600	1400	1,350	3,000	31.2	69.3	
	Diesel															
E-Methanol	DF	19.9	0.0	0.0	0.2	0.7	0.9	6.5	600	200	800	1,360	3,235	31.2	74.2	
	Diesel															
E-Diesel	Diesel	42.7	0.0	0.0	0.2	1.1	1.3	7.1	400	0	400	1,530	3,575	35.0	81.8	

Figura 14: Costo de producción de e-combustibles por costo de energía en USD/ton. 27.

A nivel mundial, existen más de 70 proyectos operativos para producir hidrógeno a través de la electrólisis, con el objetivo de obtener productos basados en este elemento, que podrían servir como e-combustibles y reemplazar los combustibles convencionales. Sin embargo, la mayoría de estos proyectos se encuentran en escala de demostración. La producción total de hidrógeno de todos estos proyectos es limitada, con menos de 20 mil toneladas (kt), y la mayor parte de este hidrógeno se destina a la producción de metanol y amoníaco para aplicaciones industriales.

A pesar de la implementación limitada en la actualidad, el número de proyectos anunciados está aumentando a gran velocidad. Si todos los proyectos actualmente en desarrollo se llevaran a cabo a tiempo, el suministro de hidrógeno proveniente de electricidad de baja emisión para la producción de e-combustibles podría alcanzar casi 14 millones de toneladas para el año 2030, tal como se muestra en la **Figura 15**. Esto representa casi un tercio de la producción potencial de todos los proyectos anunciados de hidrógeno de baja emisión, que asciende a 38 millones de toneladas. Sin embargo, la mayoría de los proyectos (que representan casi 8 millones de toneladas de hidrógeno) se encuentran en etapas muy tempranas de desarrollo y solo una pequeña fracción (alrededor del 4%) ha alcanzado una decisión final de inversión firme (FID, por sus siglas en inglés). Según IEA (2023) [70].



IEA. CC BY 4.0.

Notes. FID = final investment decision; FT = Fischer-Tropsch. For ammonia and methanol, the figure includes all announced projects for the production of these products, including projects aiming to utilise them in fuel applications, in industrial applications, without a disclosed final use or for multiple purposes.

Source: IEA (2023), [Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database](#).

Figura 15: Producción global de hidrógeno por electrólisis que podría ser utilizada para producir e-combustibles por combustible y estado basado en proyectos anunciados para el año 2030 [70].

2.3.1. Contexto internacional

Del suministro total potencial de e-combustibles provenientes de proyectos anunciados mostrados en la **Figura 15**, el amoníaco representa el 90%, seguido por los combustibles FT (5%), el metanol (4%) y el metano (1%). Esto deja en claro que la producción de e-combustibles proveniente del proceso Fischer-Tropsch no es prioridad

actualmente, lo cual deja en una mala situación a la posibilidad de ser utilizados como alternativa para sustituir los combustibles convencionales. La principal razón de esto se debe a que, el principal impulsor para la producción de productos basados en hidrógeno utilizando hidrógeno electrolítico proviene de las aplicaciones industriales del amoníaco, especialmente, de la industria de fertilizantes.

Actualmente, los e-combustibles, a nivel internacional, siguen siendo una apuesta para el futuro, la cual requiere de una inversión importante y mayor conocimiento acerca de su funcionamiento. Sin embargo, ya existen registro de empresas enfocadas en el desarrollo de plantas pilotos con la finalidad de aumentar las oportunidades para la producción de e-combustibles y, a su vez, incentivar a otras empresas y gobiernos a formar parte de este movimiento ambiental.

La empresa líder en este tipo de proyectos es HIF Global, la cual es una compañía de e-combustibles fundada en el 2016 por AME y respaldada por la empresa alemana Porsche AG [28]. Esta empresa cuenta con varios proyectos y plantas pilotos a nivel mundial. El proyecto con mayor presente hoy en día es el Haru Oni, ubicado en la zona sur de Chile, el cual cuenta con una turbina eólica encargada de alimentar un electrolizador para generar hidrógeno verde y a su vez, producir e-combustibles mediante la síntesis del hidrógeno y el CO₂ capturado del ambiente, como ya se comentó en el capítulo anterior.

Por otro lado, HIF Global tiene otros proyectos futuros para seguir aumentando la cantidad de e-combustibles producidos a nivel mundial. El primero y más próximo a llevarse a cabo es el proyecto HIF USA, el cual, según lo indicado por la empresa, trata de una central eólica que estará operando en la Costa del Golfo de Estados Unidos y será capaz de producir 600 millones de galones de e-combustibles al año. Actualmente, este proyecto se encuentra en proceso de financiamiento, pero se estima que para el 2024 comience la fase de construcción, de modo que para el 2026 comience las operaciones comerciales con 200 millones de galones de e-combustibles, es decir, un tercio de la meta final [29].

Como segundo proyecto importante, HIF Global presenta su tercera planta comercial, HIF Asia Pacífico, la cual aprovechara la experiencia obtenida de los proyectos de Chile y USA. Se prevé que esta planta, ubicada en Australia y Nueva Zelanda, podrá producir hasta 100 millones de litros anuales de e-combustible una vez que comience su operación comercial en el 2026 [30].

Finalmente, la empresa estadounidense Greyrock, funda Infinium como compañía separada para enfocar sus esfuerzos en la producción de e-combustibles [31]. En el 2022, la compañía americana anuncio un acuerdo con Amazon para empezar a utilizar los e-combustibles en una flota de vehículos como reemplazo de los combustibles fósiles tradicionales. Según la misma compañía [32], la planta Infinium está ubicada en Texas y se estima que empiece la producción en el 2023.

2.3.2. Contexto nacional

La situación de los e-combustibles en Chile es una realidad. Tal como se ha mencionado a lo largo de este capítulo, Chile cuenta condiciones favorables para extraer al máximo el potencial de energías renovables como la solar y eólica, tal como ocurre en el norte con la radiación más alta del mundo y en el sur, con los vientos australes de gran velocidad. Debido a esto, empresas internacionales han optado por iniciar actividades e invertir en proyectos asociados a los e-combustibles y energías renovables.

HIF Global, empresa dedicada a la producción de e-combustibles alrededor del mundo, junto a Porsche, Siemens Energy, ENAP, Enel Green Power, Empresas Gasco y ExxonMobil, han desarrollado una planta piloto en el sur del país, específicamente en Punta Arenas, Región de Magallanes. Esta planta, llamada Haru Oni, es una de las primeras de su tipo a nivel mundial y consiste en una central eólica de 3,4 MW de capacidad que se encarga de producir hidrógeno mediante un electrolizador de agua de 1,2 MW de capacidad. Además, la instalación captura CO₂ de la atmósfera y con un proceso de síntesis se hace reaccionar el CO₂ capturado y el hidrógeno con la intención de producir 130 mil litros al año de e-combustibles [24].

Lo que hace unos meses sería un proyecto piloto con metas de producir 350 toneladas de e-metanol y 130000 litros de e-gasolina al año, a finales de diciembre del 2022, se produjeron los primeros litros de e-combustible, fueron cargados en un Porsche 911 para luego ser conducido alrededor de la planta. Este hito paso a ser un hecho histórico, ya que se trata de los primeros litros de e-combustibles producidos en el mundo, colocando a Chile como el país pionero de esta nueva alternativa de carbono neutral.

Finalmente, después de esta primera fase, el proyecto HIF Global buscará llegar hasta los 55 millones de litros anuales a mediados de la década. Alrededor de dos años después se espera que la capacidad sea de 550 millones de litros. Con este fin, la instalación en Magallanes iniciará operaciones comerciales en marzo de 2023 [33].

Capítulo 3

3. Metodología

Esta sección aborda el proceso metodológico que se implementará para determinar y dimensionar los elementos que conformarán la adaptación de una embarcación turística de tamaño mediano, con el propósito de habilitar su operación en tres escenarios particulares que serán objeto de análisis. Estos escenarios incluyen el uso de baterías y motores eléctricos, celdas de combustible de hidrógeno, así como e-combustibles. Además, se contemplará como una alternativa complementaria la posibilidad de aplicar tecnología híbrida.

Mediante esta metodología, se llevará a cabo un minucioso análisis de las especificaciones técnicas y los requisitos operativos de la embarcación en cuestión. Posteriormente, se procederá a la selección de los componentes necesarios para cada una de las alternativas mencionadas, y se desarrollará la ingeniería conceptual correspondiente.

Para dar inicio al desarrollo del marco metodológico asociado a este proyecto, se ha seleccionado una embarcación marina específica, la cual se trata de un catamarán que opera en el interior de un parque nacional ubicado en la región sur del país. Una vez que la embarcación ha sido especificada, se procede a identificar y recopilar las especificaciones técnicas pertinentes. Estas especificaciones fueron proporcionadas por el fabricante y el dueño de la embarcación. Se prestará especial atención a aspectos relacionados con el sistema de propulsión, capacidad de carga máxima, tiempo de operación y dimensiones físicas de los equipos.

Una vez que se han establecido las características técnicas y de operación, se lleva a cabo el cálculo de la demanda energética a la que se somete la embarcación durante un ciclo completo de funcionamiento, que abarca desde la salida del puerto de Petrohué, pasando por la llegada al puerto de Puella, hasta su regreso a Petrohué. Se asume que los viajes se desarrollan sin detenciones significativas durante el recorrido, lo que implica que el catamarán opera durante aproximadamente 4 horas al día. Esto permitirá determinar la cantidad de energía consumida en un ciclo de operación.

En el transcurso de este proyecto, se evalúa la demanda energética en función de la capacidad máxima que pueden ofrecer los motores actuales, con el objetivo de mantener la misma capacidad de carga que posee actualmente la embarcación. No obstante, en caso de que las alternativas bajo consideración requieran una modificación significativa del catamarán para su instalación, se evalúa las demandas energéticas reales a través de una visita a la embarcación, durante la cual se realizan mediciones precisas de todos los parámetros relacionados con el proyecto.

Una vez que se ha determinado la demanda energética, se procederá a la evaluación de cada una de las alternativas aplicadas al catamarán, siempre y cuando estas contribuyan a la reducción de las emisiones de CO₂ de la embarcación. Durante esta etapa, se definirá de

manera detallada el funcionamiento y el proceso asociado a cada alternativa, incluyendo los equipos y componentes necesarios para llevar a cabo la conversión de la embarcación.

Con el objetivo de encontrar la mejor combinación que maximice la vida útil y optimice la eficiencia del catamarán, se propone, al menos, dos fabricantes y modelos que estén disponibles en el mercado. Esto proporciona múltiples opciones para cada alternativa y permitirá realizar una evaluación más realista y completa.

Finalmente, una vez seleccionada la alternativa más adecuada mediante la evaluación comparativa realizada, se procederá a su implementación en la embarcación. Durante esta fase, el estudio técnico previamente realizado, proporcionará una visión completa de la conversión del catamarán. Esto permitirá evaluar posibles inversionistas interesados en llevar a cabo este proyecto en un futuro cercano.

3.1. Selección de la embarcación

La embarcación en cuestión es un catamarán que presta servicios de transporte turístico en el Lago Todos los Santos o Esmeralda ubicado en el Parque Nacional Vicente Pérez Rosales, ubicado en la Región de Los Lagos, al sur del país (**Figura 16**). El catamarán está equipado con dos motores diésel, cada uno con una potencia de 400 hp (equivalentes a 298 kW).



Figura 16: Catamarán Lagos Andinos.

3.2. Especificaciones técnicas del catamarán

En este apartado se detallan las especificaciones técnicas del catamarán suministradas por el fabricante. En la **Tabla 1** se muestran las características principales y la **Figura 17**, junto con la **Tabla 2** se encargan de mostrar e indicar la distribución de espacios y dimensiones generales.

Tabla 1: Características generales de la embarcación.

Motores	
Fabricante	Cummins
Modelo	NTA 855-M
Potencia	400 hp
Cantidad	2
Características	
Material de construcción	Acero naval
Capacidad de carga	144 ton
Número de pasajeros	308
Número de tripulantes	6-9
Tipo de nave	Catamarán
Tipo de carga	Pasajeros y equipaje
TRG	244 ton
Distancia diaria recorrida	74 km
Tiempo diario de operación	4 hr
Calado de diseño	1,6 m
Puntal	2,45 m

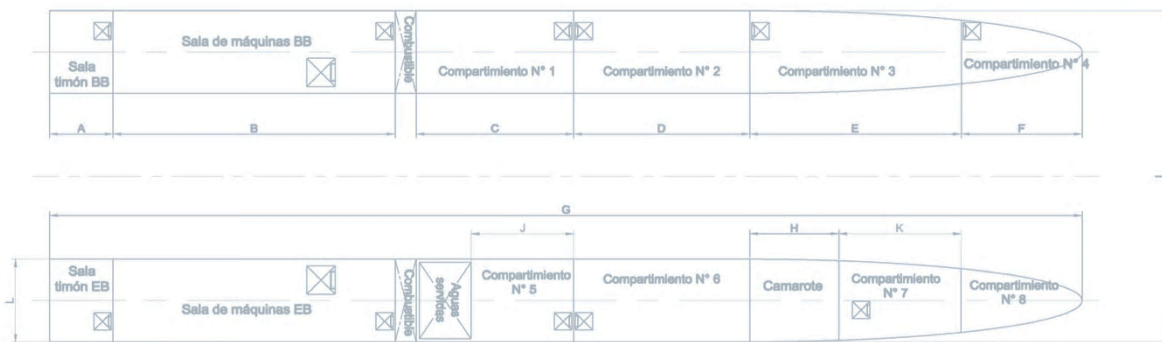


Figura 17: Distribución de espacios en los cascos y dimensiones generales.

Tabla 2: Dimensiones generales y distribución de espacios del catamarán.

Espacios	Sigla referencial	Medidas m
Manga	I	9,2
Eslora	G	32
Ancho de casco	L	2,7
Sala Timón BB/EB	A	2
Sala de máquinas BB/EB	B	8,7
Compartimiento N° 1	C	4,8
Compartimiento N° 2/6	D	5,4
Compartimiento N° 3	E	6,5
Compartimiento N° 4/8	F	3,7
Compartimiento N° 5	J	3,2
Compartimiento N° 7	K	3,8
Camarote	H	2,7

3.2.1. Especificaciones técnicas de los componentes del catamarán

En este apartado se caracterizan los componentes principales de la embarcación, tales como los motores, generador y caja reductora.

Motores diésel

El catamarán estudiado para este proyecto cuenta con dos motores Cummins modelo N/NT/NTA 855-M, los cuales cuentan con una potencia nominal de 400 hp (298 kW) cada uno. En la **Tabla 3** se detallan las características principales.

Tabla 3: Especificaciones técnicas de los motores diésel NTA 855-M. [34]

Fabricante	Cummins
Modelo	NTA 855-M
Potencia nominal	400 hp (298 kW)
Configuración	6 cilindros en línea, 4 tiempos
Combustible	Diésel
Capacidad de combustible	6 m ³
Consumo de combustible	79 l/hr
Refrigerante	Agua
Cilindrada	14 litros
Diámetro x Carrera	140x152 mm
Relación de compresión	14,5:1
Velocidad nominal	2100 rpm
Dimensiones	1809x881x1598 mm
Peso	1430 kg

Línea de propulsión

En este caso, la línea de propulsión del catamarán se encarga de transmitir la potencia generada por los motores a las hélices según sean sus requerimientos. En la embarcación, la línea de propulsión contempla 3 elementos relevantes:

- **Caja reductora:** equipo encargado de reducir las revoluciones con las que gira el motor diésel. La caja reductora del catamarán cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 4: Especificaciones técnicas de la caja reductora de los motores [35]

Fabricante	Twin Disc
Modelo	MG-514C
Velocidad máxima	2500 rpm
Peso	525 kg
Dimensiones	700x720x5000 mm
Reducción	3:1

- **Eje propulsor:** elemento o medio por donde se transmite la potencia del motor a la hélice. El eje del catamarán cuenta con un diámetro máximo de 100 [mm].
- **Hélice:** elemento mecánico provisto de álabes que giran con el eje y traza un movimiento rotativo que provoca la propulsión de la embarcación. Las hélices giran a una velocidad de 570 rpm

Cada motor cuenta con su línea de propulsión independiente, los que se traduce a que la embarcación cuenta con dos cajas reductoras, dos ejes de propulsión y dos hélices.

Sistema de gobierno

El sistema de gobierno de una embarcación engloba el conjunto de equipos y mecanismos destinados a controlar la dirección y el rumbo de la nave. En el caso del catamarán en estudio, se implementan un sistema principal de dirección hidráulico/eléctrico y un sistema hidráulico en caso de emergencia. Ambos sistemas tienen la función de gestionar el movimiento del timón, respondiendo de manera precisa a las necesidades de maniobra que el capitán desee llevar a cabo.

Sistema eléctrico

Se estima que el consumo eléctrico de la embarcación, cuando todos los equipos alimentados están en funcionamiento, es de 118 A a 26 kV, lo cual se traduce en un consumo energético de 20-25 kW. Para satisfacer esta demanda eléctrica, el catamarán dispone de dos grupos electrógenos diésel, los cuales se describen en la siguiente tabla:

Tabla 5: Especificaciones técnicas de los grupos electrógenos. [36] [37]

Grupo electrógeno N° 1		Grupo electrógeno N° 2	
Peso	852 kg	Peso	900 kg ¹
Dimensiones	2100x938x1285 mm	Dimensiones	1980x895x1300 ¹
Consumo	7,5 l/hr	Consumo	10 l/hr
Motor		Motor	
Marca	John Deere	Marca	Cummins
RPM	1500	RPM	1500
Modelo	3029TFS29	Modelo	6BT5.9
Generador		Generador	
Marca	Lureye	Marca	Stamford
Modelo	J44K	Modelo	UCM224E23
Capacidad	40 kVA	Capacidad	47 kVA
Frecuencia	50 Hz	Frecuencia	50 Hz

¹ Valores referenciales de un generador con 62,5 kVA de potencia.

3.3. Demanda energética

Calcular la demanda energética de la embarcación es esencial para definir correctamente los equipos y componentes adecuados en cantidad y características, con el fin de asegurar la eficiencia operativa de la embarcación. Por lo tanto, en esta sección, primeramente se determinan las especificaciones operacionales y, luego, la demanda energética a la que se encuentra sujeta el catamarán en estudio.

3.3.1. Especificaciones operacionales en motores

Tal como se comentó, la actividad que realiza el catamarán es el transporte de turistas, por lo que, el tiempo y velocidad de navegación es un factor importante para poder apreciar el panorama turístico que caracteriza al entorno. Por otro lado, la eficiencia y con ello el ahorro de combustible, cumple un rol importante para definir la velocidad adecuada en la navegación, lo cual se determina mediante las curvas de operación de los motores.

En esta sección se determina la demanda operacional del catamarán, en base al ciclo operacional que lo caracteriza.

El ciclo operacional de la embarcación se resume en el transporte de los turistas de un puerto a otro. Cada ciclo se divide en 3 etapas y se caracterizan a continuación:

- Zarpe: etapa del ciclo en el que el catamarán sale del puerto y se direcciona para empezar la navegación.
- Navegación: etapa del ciclo donde el catamarán alcanza la velocidad crucero y la mantiene constante.
- Arribo: etapa del ciclo donde el catamarán atraca en el muelle y descarga los pasajeros.

Debido a que se trata de un catamarán turístico en el sur de Chile, existen temporadas de alta y baja demanda, las cuales tendrán variaciones en la velocidad de operación y en los tiempos de navegación. Para esto se muestra la siguiente tabla, la cual indica los tiempos de duración y velocidad de operación en ambas temporadas.

Tabla 6: Parámetros y valores de operación en motores del catamarán en temp. alta y temp. baja.

Acción	Parámetros en temp. baja (abr-ago)			Parámetros en temp. alta (sep-mar)		
	Duración [min]	Potencia [kW]	rpm	Duración [min]	Potencia [kW]	rpm
Zarpe	5	176	850	5	176	850
Navegación	100	482	1550	95	530	1750
Atraco	5	176	850	5	176	850
Total	110			105		

De esta forma, en base a los parámetros mencionados en la **tabla 6**, se muestra la **figura 18**, la cual muestra el perfil operacional de cada ciclo de operación de ambas temporadas.

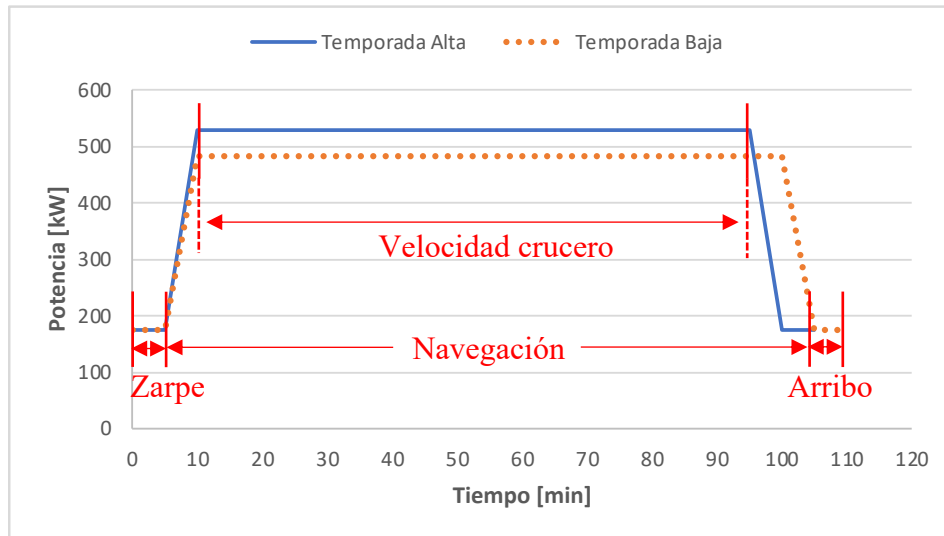


Figura 18: Perfil operacional temporada baja vs temporada alta.

Al conocer el tiempo y la potencia asociada a cada etapa del ciclo de operación, mediante el cálculo del área bajo la curva (**ecuación 1**), se llega a que la demanda operacional del catamarán es de 870 kWh en temporada alta y 835 kWh en temporada baja. Se debe tomar en cuenta que esta demanda operacional está asociada a los dos motores presentes en el catamarán.

$$E_{op.}[kWh] = \int_{t_0}^{t_1} P dt \quad (1)$$

donde t_0 representa el tiempo de partida de cada etapa, t_1 , el tiempo de llegada al puerto y P , la potencia requerida en cada etapa.

Además, el catamarán cuenta con dos ciclos de trabajo: el Transporte y el Retorno. El Transporte abarca el trayecto desde el puerto de Petrohué hasta Peulla y, el Retorno, desde Peulla hasta Petrohué. Por lo tanto, para obtener la energía total en un turno operacional, el cual abarca dos ciclos de trabajo, se requiere multiplicar la energía obtenida por el área bajo la curva por dos. De esta forma, la energía operacional diaria necesaria para la planta propulsora del catamarán asciende a **1740 kWh** en temporada alta y **1670 kWh** en temporada baja.

3.3.2. Especificaciones operacionales en generador

Al igual que los motores, los generadores de la embarcación cuentan con un perfil de operación y que es relevante de conocer, ya que es el equipo que se encarga de entregar la energía eléctrica a equipos como la calefacción, bombas hidráulicas, iluminación,

accionamiento de la grúa, ventiladores de sala de máquinas, etc. Sin embargo, la demanda de energía eléctrica no es continua y va a depender de la operación del catamarán. Para esto se muestra la siguiente figura con el perfil operacional del generador.



Figura 19: Perfil operacional del generador temporada alta vs temporada baja.

Para entender de mejor manera la figura, se tienen que dejar claro ciertos puntos que corresponden al itinerario de la embarcación:

- 8:00 → Se pone a funcionar el generador con una potencia de 5 kW para encender el alumbrado y otros equipos.
- 9:00 → Se enciende la calefacción para climatizar el interior de la embarcación y se alcanza una potencia de 10 kW. Este punto solo se considera en invierno (temporada baja).
- 9:30 → Se hace uso de la grúa para cargar el equipaje de todos los pasajeros y tripulantes. La grúa requiere de, aproximadamente, una potencia de 10 kW adicionales.
- 10:30 → Zarpe hacia el puerto de Peulla. Se encienden los demás equipos eléctricos llegando a entregar el generador una potencia de 10 kW en temporada alta y 15 kW en temporada baja.
- 12:15-12:20 → Arribo a Peulla. Se apaga el generador y se conecta a la red del puerto para mantener encendido el alumbrado.
- 16:00-16:30 → Zarpe al puerto de Petrohué. Se enciende el generador nuevamente y opera en condición normal de 10-15 kW.
- 17:50-18:00 → Arribo a Petrohué. Se deja encendido el generador solo con el alumbrado conectado para realizar el aseo de la embarcación. La potencia entregada es de 0,5 kW.
- 23:00 → Se apaga el generador.

Una vez determinado los valores de operación del generador durante un día, se procede a calcular el consumo energético asociado al servicio eléctrico de la embarcación mediante el cálculo del área bajo la curva, por lo que, se utiliza la **ecuación 1** para determinar el consumo eléctrico en cada temporada.

De esta forma se obtiene que la energía asociada al consumo eléctrico del catamarán en temporada alta es de **58 kWh** mientras que para la temporada baja es de **88 kWh**. La energía requerida en temporada baja es mayor principalmente por dos razones. La primera, el tiempo de navegación es un poco mayor, lo cual implica mayor tiempo de consumo. La segunda se debe a que, la temporada baja se da en invierno, por lo que es necesario tener encendida la calefacción.

Finalmente, se puede concluir que la demanda energética total a la cual está sometida el catamarán en un turno operacional sería la suma de la demanda operacional de los motores (propulsión) y del generador (consumo eléctrico).

$$E_T = E_{op} + E_{eléc} \quad (2)$$

De esta forma se obtiene que la demanda energética total es de **1760 kWh** en temporada baja y **1800 kWh** en temporada alta.

Para efectos de cálculos posteriores en este informe, se va a utilizar la mayor energía requerida para asegurar que, en ambas temporadas, se tenga la potencia suficiente para una óptima operación.

3.4. Emisiones de CO₂ generadas

Actualmente, el consumo de combustible del catamarán se promedia en 470 litros diarios, los cuales se reparten en: 68% (320 litros) por parte de los motores y 32% (150 litros) en los generadores.

Un motor diésel emite en promedio cerca de 2,65 kg de CO₂ por cada litro de combustible consumido. Por lo tanto, un consumo de 470 litros se traduce en una emisión diaria de aproximadamente 1.250 kg de CO₂. Si el catamarán opera durante los 365 días del año, la emisión total de CO₂ al ambiente superaría las 456 toneladas. No obstante, el catamarán se detiene para mantenimiento durante 20 a 30 días al año, lo que implica que se dejarían de emitir entre 25 a 37,5 toneladas de CO₂ al año. De esta forma, las emisiones de CO₂ del catamarán al año serían alrededor de 430 toneladas.

Para comprender mejor la magnitud de estas emisiones, podemos establecer una analogía utilizando la cantidad de embarcaciones necesarias para transportar la misma cantidad de personas que el catamarán. En este escenario, se consideran botes equipados con motores fuera de borda de 4 tiempos de 60 hp, capaces de transportar hasta 6 personas cada uno. Por lo tanto, serían necesarios 52 botes para llevar a las mismas 308 personas que puede alojar el catamarán.

Teniendo en cuenta que cada motor consume aproximadamente 19,2 litros de combustible por hora, el consumo total por las 4 horas de viaje de cada bote sería de 77 litros. Así, considerando que los motores emiten cerca de 2,65 kg de CO₂ por cada litro de combustible consumido, cada bote emite cerca de 204 kg de CO₂ diarios. Por lo tanto los 52 botes emiten, diariamente, un total de 10.600 kg de CO₂. Extrapolando este nivel de emisiones a la cantidad de días que opera el catamarán, se puede estimar que la emisiones de CO₂ anuales de los 52 botes alcanzaría las 3.550 toneladas al año, lo cual representa más de 8 veces a lo que emite el catamarán.

Por otro lado, de acuerdo con CONAF², Chile se ha comprometido a crear 200.000 hectáreas de bosque nativo para el año 2023, lo que se traduciría en la captura de aproximadamente 0,9 a 1,2 millones de toneladas de CO₂ equivalente al año. Por lo tanto, para compensar las emisiones de CO₂ generadas por la embarcación, se requerirían, al menos, alrededor de 96 hectáreas de bosque nativo. Hasta el año 2021, la superficie de bosque nativo en Chile alcanzó las 14.737.486 hectáreas, lo que significa que las 96 hectáreas necesarias para capturar las emisiones de CO₂ de la embarcación representarían menos del 0,0007% de la superficie total de bosque nativo en el país.

² <https://uchile.cl/noticias/141874/ingenieros-forestales-miden-captacion-de-co2-de-bosques-https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/cambio-climatico/>

Capítulo 4

4. Evaluación técnica de las alternativas

En esta sección, se examinan las diversas alternativas seleccionadas que pueden ser implementadas en la embarcación y se lleva a cabo un análisis exhaustivo de su principio de funcionamiento, los procesos a los que se someten y las tecnologías específicas disponibles actualmente asociadas a cada una de ellas.

Las alternativas que serán evaluadas durante el desarrollo de este proyecto son las siguientes:

1. Tecnología de baterías y motor eléctrico (B-ME)
2. Tecnología de celdas combustible y motor eléctrico (FC-ME)
3. E-combustibles (E-fuel)
4. Tecnología híbrida: eléctrico-diésel (EL-DI)
5. Tecnología híbrida: hidrógeno-diésel (H₂-DI)

4.1. Tecnología de baterías y motor eléctrico (B-ME)

Entre todas las alternativas, se puede decir que la tecnología de baterías y motores eléctricos es la que cuenta con el mayor desarrollo y aplicación actualmente, esto se debe, principalmente, a que es una tecnología libre de emisiones contaminantes al ambiente y que ambos equipos tienen desarrollo comercial, lo cual la sitúa como una de las alternativas más atractivas para implementar en este proyecto.

El sistema de baterías y motores eléctricos, se basa en un principio de funcionamiento relativamente sencillo. El componente principal son las baterías, las cuales almacenan la energía eléctrica y abastecen al sistema. Luego, esta energía se transfiere a los motores eléctricos, que la convierten en energía mecánica para propulsar la embarcación. Sin embargo, para lograr esta transferencia de energía eléctrica desde las baterías hasta los motores, se necesitan equipos complementarios que aseguran el óptimo rendimiento del sistema. Estos componentes son los inversores de DC/AC y los convertidores DC/DC. Finalmente, luego de cumplir con su ciclo de trabajo, las baterías son recargadas en un punto de carga.

A continuación, se detallan los principios de funcionamiento de las baterías, motores eléctricos y equipos complementarios, junto con la variedad de alternativas que existe para cada uno en la electromovilidad.

4.1.1. Análisis de baterías

Las baterías son dispositivos electroquímicos que almacenan energía en forma de electricidad y la liberan cuando es necesaria. Son componentes esenciales en una amplia variedad de dispositivos y aplicaciones, desde dispositivos electrónicos portátiles hasta sistemas de almacenamiento de energía a gran escala.

Normalmente, las baterías cuentan con cuatro elementos básicos: celdas con dos polos, uno positivo (cátodo) y uno negativo (ánodo); un electrolito conductor, una cámara de aire y un contenedor para todos los elementos mencionados.

El funcionamiento de las baterías se debe gracias a una reacción electroquímica de reducción y oxidación, que suele llamarse *Redox*. La reacción consiste en un intercambio de electrones entre los dos polos para la transferencia de energía, generando una oxidación de los materiales. Dichos polos están sumergidos en una solución electrolítica y cada uno de ellos, al ser de cargas diferentes, reacciona de manera opuesta: mientras el ánodo reacciona oxidándose por la liberación de electrones, el cátodo reduce su oxidación debido a la ganancia de electrones. Según Ferrovial [38].

En la medida en la que avanza la tecnología en busca de mejores soluciones para optimizar el rendimiento de la electromovilidad, se han logrado desarrollar diversas opciones de baterías que han destacado por encima de otras. Actualmente, en base a un estudio realizado por RACE (2022) en [39] y Peña Ordoñez, C. (2011) en [40] las más utilizadas son:

Baterías de plomo-ácido (PB-ácido)

Las baterías de plomo ácido son las más antiguas en el mercado y también las más comunes en vehículos convencionales. Suelen ser de 6V y 12V y cuentan con una autonomía aproximada de 100 km. Debido a la gran capacidad de carga y descarga durante breves periodos de tiempo, se emplean principalmente en vehículos de combustión para el encendido y abastecer de energía eléctrica los diferentes sistemas electrónicos del auto. Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico y en su interior una serie de placas de plomo dispuestas alternadamente.

Por otro lado, posee un ciclo de vida entre 500 y 800 ciclos de carga-descarga y una densidad de energía gravimétrica baja entre los 30-40 Wh/kg.

Baterías Níquel-Cadmio (NiCd)

Son baterías que utilizan un cátodo de hidróxido de níquel, un ánodo de un compuesto de cadmio y un electrodo de hidróxido de potasio.

Las baterías Níquel-Cadmio, cuentan con un ciclo de vida entre las 1500 y 2000 cargas y descargas, lo que representa casi 3 veces el ciclo de vida de una batería plomo-ácido. Sin embargo, su densidad no está muy alejada a la de plomo-ácido, ya que ronda entre los 40-60 Wh/kg.

Baterías Níquel-Hidruro metálico (NiMh)

El hidruro metálico de níquel tiene un rendimiento similar al de la batería de NiCd, siendo la principal diferencia que en la batería de NiMH utiliza un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico, que las hacen libre de cadmio, lo que conlleva a ciertas ventajas. Estas ventajas se centran básicamente en un aumento de capacidad, una disminución del peso y un menor efecto memoria³. Sin embargo, presenta un ciclo de vida más limitado que el de las baterías de NiCd, ya que se encuentra entre las 300 y 500 cargas y descargas, pero el rango de densidad gravimétrica es más amplio entre los 30-80 Wh/kg.

Dentro de las aplicaciones de coches eléctricos, las baterías NiMh son, actualmente, las más utilizadas por los fabricantes híbridos.

Baterías de litio

Las baterías de litio son, actualmente, las más utilizadas en la electromovilidad, ya que, al estar compuestas por litio, el cual es un metal mucho más ligero o más ligero conocido. Permite entregar una gran capacidad energética en poco peso, es decir, cuenta con la densidad gravimétrica más baja en el mercado de baterías.

Debido al poco peso y volumen que ocupan, se han desarrollado varias baterías a base de litio, algunas de estas son:

- **Polímero de litio (LiPo):** Las baterías de polímero de litio, también conocidas como LiPo, se destacan por su uso de un electrolito que se coloca en un recipiente de plástico no conductor de electricidad, lo que evita el paso de electrones.

El polímero sólido presenta ventajas en términos de fabricación, ya que permite lograr grosores extremadamente delgados, de aproximadamente 1 milímetro, lo que posibilita la creación de baterías con un espesor similar al de una tarjeta de crédito. Sin embargo, el polímero sólido enfrenta el desafío de una baja conductividad debido a su alta resistencia interna, lo que limita su capacidad de descarga. Además, tiende a aumentar su temperatura hasta alrededor de 60 grados Celsius, lo que la hace inadecuada para ciertas aplicaciones. Para solucionar estos problemas, se agrega a veces un gel al electrolito.

Las celdas de polímero de litio utilizan una bolsa flexible de aluminio en lugar de fundas rígidas, lo que conlleva un ahorro considerable en peso y tamaño para cada celda. Se piensa que estas baterías tienen el potencial de impulsar la próxima generación de vehículos eléctricos. Aunque los costos de un automóvil

³ El "efecto memoria" es un fenómeno en el que la capacidad de la batería se ve afectada por cargarla repetidamente sin dejarla descargarse por completo. Esto puede llevar a una pérdida de capacidad de la batería y reducir su vida útil.

eléctrico de este tipo son actualmente extremadamente altos, los defensores argumentan que a medida que aumente la producción, el costo de las baterías LiPo disminuirá.

Finalmente, el ciclo de vida de estas baterías son menores a 1000 cargas y recargas; y cuentan con una densidad gravimétrica que ronda entre los 130-200 Wh/kg.

- **Ion de Litio con cátodo de LiCoO_2 :** Las baterías de iones de litio con cátodo de LiCoO_2 (Litio-Cobalto-Oxido) son ampliamente utilizadas en la electrónica y se encuentran entre los tipos más populares de baterías recargables para dispositivos electrónicos portátiles. Ofrecen una excelente relación entre peso y capacidad de almacenamiento de energía, no sufren del efecto memoria y tienen una pérdida de carga lenta cuando no están en uso.

Además de su uso en la electrónica de consumo, estas baterías están ganando popularidad en aplicaciones militares, vehículos aeroespaciales y diversas aplicaciones debido a su alta densidad energética.

Las baterías LiCoO_2 cuenta con la mayor densidad gravimétrica disponible en el mercado, la cual oscila entre 100 a 250 Wh/kg. Sin embargo, su capacidad de descarga es relativamente baja, lo que las hace adecuadas para dispositivos electrónicos que no requieren descargas de corriente muy intensas, como portátiles y teléfonos móviles, entre otros.

- **Ion de litio con cátodo de LiFePO_4 :** Estas son una variante de las baterías de iones de litio con cátodo de LiCoO_2 anteriormente descritas y son comúnmente conocidas por sus siglas "LiFe." El fosfato de hierro litio (LiFePO_4) se caracteriza por su bajo costo, su carácter no tóxico, la abundancia del hierro, una excelente estabilidad térmica, buenas propiedades de seguridad y un buen rendimiento electroquímico. La mejora en su conductividad en comparación con el ion de litio con ánodo de LiCoO_2 se debe a la presencia de nanotubos de carbono.

Una ventaja clave de las baterías LiFePO_4 en comparación con otras baterías de litio es su mayor estabilidad química y térmica, lo que se traduce en una mayor seguridad. Al comparar el fosfato de hierro litio con su predecesor de mayor capacidad, el ion de litio se observa que después de un año, la densidad energética de una batería de LiCoO_2 será aproximadamente la misma que la de una batería de LiFePO_4 . Sin embargo, después de dos años, la densidad energética de la batería LiCoO_2 será inferior a la de la batería LiFePO_4 , debido a la mayor vida útil de esta última.

Una de las ventajas principales de las baterías LiFePO₄ en comparación con las LiCoO₂ es su mayor capacidad de descarga, la cual asciende a 2000. La química del fosfato de hierro litio ofrece el ciclo de vida más prolongado de todas las baterías disponibles en el mercado actual.

A continuación, se muestra una tabla resumen, la cual compara las distintas baterías analizadas en esta sección.

Tabla 7: Comparación entre los distintas tecnologías de baterías.

Tecnología /Parámetro	Pb-ácido	NiCd	NiMh	LiPo	LiCoO ₂	LiFePO ₄
Ciclos de vida	500-800	1500-2000	300-500	<1000	400-1200	2000
Densidad energética Wh/L	60-75	50-150	140-300	300	250-360	220
Densidad gravimétrica Wh/kg	30-40	40-60	30-80	130-200	100-250	90-110
Potencia específica W/kg	180	150	250-1000	7100	250-340	3000
Mantenimiento requerido	Cada 3-6 meses	Cada 30-60 días	Cada 60-90 días	No requiere	No requiere	No requiere
Eficiencia carga/descarga	50%-92%	70%-90%	66%	99.8%	80%-90%	-
Tolerancia a sobrecargas	-	Muy buena	Media	Muy mala	Mala	Muy mala

4.1.2. Análisis de motores eléctricos

Un motor eléctrico es una máquina rotatoria que convierte la energía eléctrica en energía mecánica de rotación, lo que permite la generación de movimiento y trabajo. Su principio de funcionamiento se basa en la interacción entre campos magnéticos y corrientes eléctricas y está compuesto principalmente por una serie de bobinas (o devanados) de alambre de cobre que forman parte del rotor (la parte giratoria) y un conjunto de imanes o electroimanes en el estator (la parte estacionaria).

Actualmente, en la electromovilidad, existen diversos tipos de motores eléctricos, sin embargo, los más utilizados son: motores síncronos de imanes permanentes, síncronos de reluctancia conmutada y asíncronos o de inducción [41]

Motores síncronos de imanes permanentes (IP)

En estos motores la velocidad de giro en el rotor es igual a la del campo magnético generado por el estator. Por otro lado, se caracterizan por su alta eficiencia, ya que al contar con imanes permanentes, el motor no necesita inducir un campo magnético, lo cual evita pérdidas en el rotor. Además, suelen ser más compactos y sencillos que los motores de inducción, lo que permite mayor disponibilidad para alojar baterías. Sin

embrago, su costo suele ser muy elevado, ya que suelen ser fabricados con imanes compuestos por tierras raras⁴.

Motores asíncronos o de inducción (MI)

A diferencia de los motores síncronos, estos motores cuentan con una velocidad de giro en el rotor distinta a la del campo magnético producido por el estator. Son muy utilizados en la electromovilidad, debido a su confiabilidad y simplicidad. No requieren escobillas, lo que reduce el desgaste y el mantenimiento. Por otro lado, se caracterizan por ser más económicos que los motores IP, pero con una eficiencia un poco menor. La principal desventaja de estos motores está en su riesgo a la sobre carga y que no son adecuados para aplicaciones que requieren una alta potencia, ya que su tamaño y peso aumentan considerablemente con la potencia.

Motores síncronos de reluctancia conmutada (SR)

En este tipo de motor, la corriente se conmuta a través de bobinas que, al activarse, crean un campo magnético giratorio. Este campo magnético en movimiento hace que los polos del rotor se atraigan, generando así un par motor.

Estos motores, al no contar con imanes permanentes ni escobillas, tienen la capacidad de proporcionar niveles elevados de par y potencia, sobre todo a altas velocidades. Además, son conocidos por ser robustos y económicos. Sin embargo, presentan eficiencia limitada a bajas revoluciones, tienden a ser más ruidosos y muestran cierta variabilidad en la entrega de par, la cual debe ser corregida electrónicamente.

A continuación, se muestra una tabla comparativa entre las 3 alternativas realizada por el Ministerio de Energía (2022) [42].

⁴ Se llama tierras raras a cualquiera de los 15 elementos químicos llamados técnicamente Lantánidos, desde los números atómicos 57 a 71. En particular esta clase de materiales incluyen al Neodimio (Nd, nro. atómico 60) y al Samario (Sm, nro. atómico 62), que son utilizados para la fabricación de imanes permanentes de alto producto B*H (SmCo o NdFeB), comúnmente llamados imanes de alta energía [42].

Tabla 8: Comparación de características para distintas alternativas de motores eléctricos [42]

Significado de colores	
	Comparativamente fuerte
	Intermedio
	Comparativamente débil

Característica/Tecnología	IP	MI	SR
Densidad de torque/potencia por kg de peso del motor			
Eficiencia a operación normal			
Eficiencia a alta velocidad nominal y carga parcial			
CPSR ⁵			
Capacidad de operar a temperaturas extremas y robustez del motor			
Costo			
Ruido acústico y ripple ⁶ en el torque			
Capacidad de autodetección de la posición de baja velocidad			
Tolerancia a fallas			

4.1.3. Análisis de sistemas complementarios

En un sistema que integra baterías y motores eléctricos, los componentes complementarios desempeñan un papel crítico al encargarse de la gestión y la eficiencia de la energía del sistema. Por lo tanto, en esta sección, se lleva a cabo un análisis detallado de los inversores y convertidores, destacando su importancia en el funcionamiento óptimo del sistema.

Inversores DC/AC

Según Tomar, U. (2023) [43], en la actualidad, la mayoría de los motores eléctricos utilizados en vehículos eléctricos son motores de corriente alterna (AC). Esto se debe a que presentan varias ventajas en comparación con los motores de corriente continua (DC), como una mayor eficiencia energética, menos necesidad de mantenimiento y un mejor control de velocidad y torque. Sin embargo, las baterías, que son los componentes encargados de suministrar la energía eléctrica a los motores, entregan corriente de manera continua. Por lo tanto, se requieren dispositivos capaces de transformar o invertir la corriente continua proveniente de las baterías a corriente alterna para su uso en los motores. Aquí es donde entran en juego los inversores DC/AC.

Los inversores son dispositivos eléctricos capaces de convertir la corriente desde alterna a continua y viceversa. Un inversor básico consiste en un oscilador que controla un transistor, el cual se utiliza para interrumpir la corriente de entrada y generar una onda rectangular. Esta onda rectangular alimenta un transformador que suaviza su forma,

⁵ CPSR: Razón de velocidad de operación a velocidad constante

⁶ Ripple (rizado en español): se refiere a fluctuaciones o variaciones no deseadas en la corriente eléctrica suministrada al motor que pueden generar ruido, vibraciones, desgastes prematuros en los componentes del motor y/o interferencias electromagnéticas.

haciendo que se asemeje más a una onda senoidal y proporcionando la tensión de salida necesaria. La forma de onda de salida de la tensión de un inversor ideal debería ser sinusoidal.

En términos simples, la electricidad de corriente continua produce una onda cuadrada brusca, mientras que la electricidad de corriente alterna genera una forma senoidal más suave. Esto permite que exista un mejor control en de la velocidad y par motor de un vehículo eléctrico, lo cual es esencial para una conducción suave y eficiente.

Conversores DC/DC

Los vehículos eléctricos suelen incorporar varios sistemas eléctricos que operan a diferentes tensiones. Por lo tanto, la tensión proporcionada por las baterías puede no ser la adecuada o puede exceder la requerida por otros equipos. En tales casos, es esencial utilizar un convertor DC/DC para adaptar la tensión a los niveles que sean necesarios.

Según un estudio realizado por Palacios Garcés, V. (2014) [45], existen tres topologías básicas o fundamentales de convertidores DC/DC que son: convertidor Buck, convertidor Boost y el convertidor Buck-Boost.

Convertor Buck

Se le conoce como convertidor más elemental de todos, y es la piedra angular de todas las demás topologías. Aunque es capaz de entregar una gran cantidad de potencia durante funcionamiento normal, no es una opción común entre los diseñadores debido a las siguientes limitaciones:

- El voltaje de entrada debe ser una o dos veces el voltaje de salida con el fin de mantener una buena regulación.
- El tiempo de recuperación inversa del diodo presenta un cortocircuito instantáneo a través de la fuente de entrada cuando el interruptor de potencia se enciende.
- Si el semiconductor del interruptor de potencia falla durante la condición de cortocircuito, la entrada se conecta en cortocircuito con la carga.

El esquema eléctrico del convertidor Buck básico se presenta en la **Figura 20**. Consta de una fuente de tensión controlada por un interruptor S, un diodo D, un filtro inductor L, un filtro capacitivo C y una carga de tipo resistiva R.

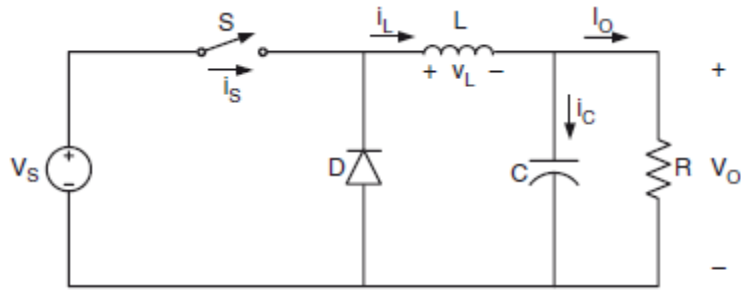


Figura 20: Esquema eléctrico de un convertidor Buck [45]

Según Ortúzar Dworsky (2002) [46], la operación Buck consiste en conmutar el semiconductor, transfiriendo así energía desde la fuente a la carga. Al cerrarse S, la corriente fluye a través de la bobina (inductor L) y el diodo (D) de salida hacia la carga, almacenando energía en el inductor y suministrando energía a la carga. Cuando el interruptor (S) se abre, la corriente del inductor intenta seguir fluyendo, pero como el circuito está abierto, la energía almacenada en el inductor se libera a través del diodo de salida hacia la carga. Durante esta fase, el inductor también actúa como un filtro, suavizando la corriente y el voltaje de salida.

El voltaje de salida promedio en un convertidor buck está determinado por el ciclo de trabajo del interruptor, es decir, la relación entre el tiempo en que el interruptor está encendido y el tiempo total del ciclo. Cuanto mayor sea el ciclo de trabajo, mayor será el voltaje de salida. Por lo tanto, ajustando el ciclo de trabajo, es posible regular el voltaje de salida del convertidor Buck.

Convertor Boost

Los convertidores de tipo Boost posibilitan la obtención de tensiones de salida superiores a las que se aplican en la entrada, y además, regulan la tensión de salida. Sin embargo, su capacidad de salida está limitada debido a los picos de corriente, que ejercen una carga adicional sobre el interruptor y el diodo. Asimismo, en cuanto a la protección contra transitorios peligrosos que puedan afectar la carga, estos convertidores tienen un rendimiento relativamente bajo.

En la **Figura 21** se muestra el esquema básico de un convertidor Boost, el cual se compone de una entrada de tensión de DC, una inductancia Boost L, un interruptor S, un diodo D, un filtro capacitivo C, y una resistencia de carga controlada R.

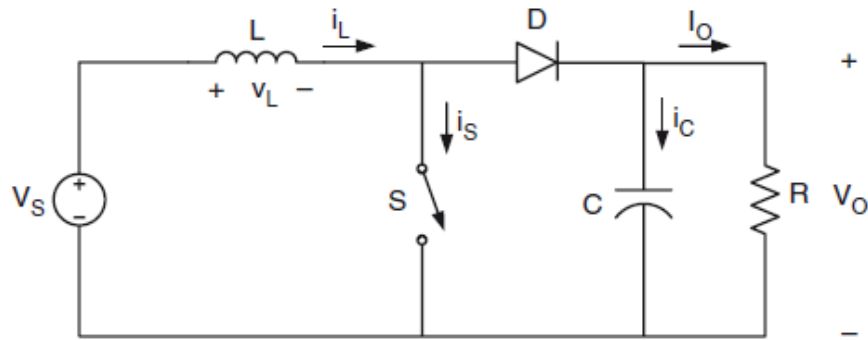


Figura 21: Esquema eléctrico de un convertidor Boost [45]

La operación del convertidor Boost implica alternar el estado del semiconductor para transferir energía desde la fuente hacia la carga. Esto se logra al cargar la inductancia mediante la creación de un cortocircuito de corta duración a través de ella al cerrar el interruptor S. Luego, el interruptor S se abre, permitiendo que la energía almacenada en la inductancia fluya a través del diodo [46]

Convertor Buck-Boost

A diferencia de los convertidores previos, un convertidor Buck-Boost permite obtener tensiones de salida que pueden ser mayores o menores que las tensiones de entrada, dependiendo del valor del ciclo de trabajo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el voltaje de salida que se obtiene es de polaridad invertida. Esta configuración de convertidor es equivalente a conectar en serie un convertidor Buck y un Boost.

En la **Figura 22** se muestra una topología no aislada del convertidor Buck-Boost, que consta de una fuente de voltaje (entrada), un interruptor controlado S, un inductor L, un diodo D, un capacitor de filtro C y una resistencia de carga R.

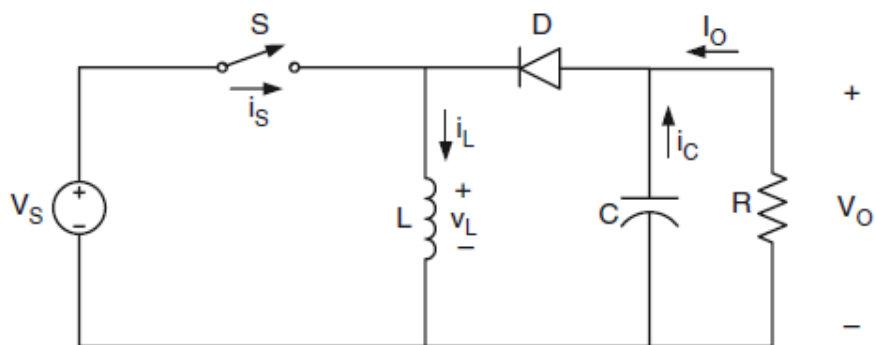


Figura 22: Esquema eléctrico de un convertidor Buck-Boost [45]

Cuando el interruptor S se encuentra cerrado, la corriente fluye a través del inductor, aumentando su valor, mientras que el diodo permanece en estado de polarización inversa, es decir, apagado. Por otro lado, cuando el interruptor está abierto, el diodo permite que la corriente fluya desde el inductor hacia la carga.

Si bien Ortúzar Dworsky (2002) establece en [46] que los convertidores Buck-Boost son ideales para sistemas en los que se requiere que la energía fluya en ambas direcciones entre dos puntos de fuente de tensión, con el propósito de cargar las baterías durante el freno regenerativo. Sin embargo, en el contexto de la embarcación estudiada, este sistema no es tan eficiente, ya que cuenta con un ciclo de operación continuo. Por lo tanto, para los fines de este proyecto, el convertidor más adecuado sería el Boost, ya que permite aumentar la tensión y el flujo de energía se produce en una sola dirección.

4.2. Tecnología de celda combustible y motor eléctrico (FC-ME)

El principio de funcionamiento de esta tecnología es similar al de las baterías y motores eléctricos. En este caso, el equipo encargado de suministrar la energía eléctrica no son las baterías, sino la celda de combustible, que, mediante una reacción química entre el hidrógeno suministrado (almacenado en cilindros) y el oxígeno, produce de corriente continua (DC). Por lo tanto, para lograr la transferencia de energía desde la celda combustible hasta los otros equipos, se requieren componentes complementarios, como los inversores DC/AC para alimentar el motor eléctrico que funciona con corriente alterna (AC) y convertidores DC/DC para ajustar los niveles de tensión según sea necesario. La **figura 23** muestra un esquema resumen del principio de funcionamiento de la tecnología celda combustible y motor eléctrico.

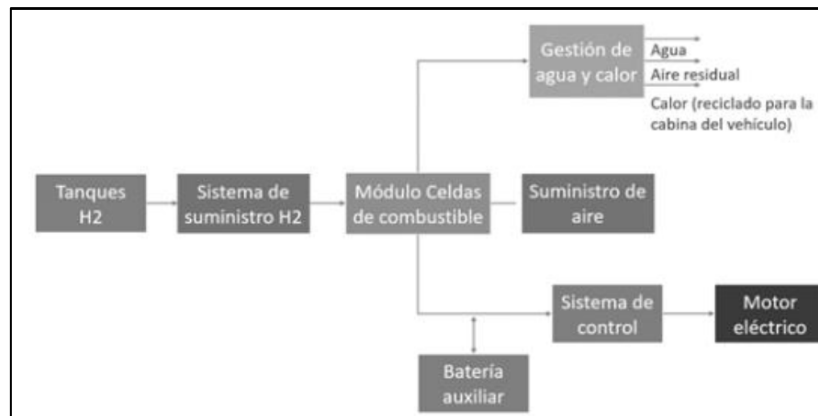


Figura 23: Esquema de principio de funcionamiento de un FCEV.

Aunque la tecnología de celdas de combustible y motores eléctricos se encuentra en una etapa relativamente incipiente debido a la falta de accesibilidad al hidrógeno verde y a los costos de producción elevados, resulta una solución atractiva para el sector marítimo por las ventajas energéticas que ofrece el hidrógeno en comparación con otras alternativas. A continuación, se procede a analizar el principio de funcionamiento y los componentes asociados a un sistema que opera con celdas de combustible y motores eléctricos.

4.2.1. Análisis de las celdas combustible (FC)

Las celdas de combustible (FC, por fuel cells) son dispositivos electroquímicos similares a las baterías convencionales, ya que ambos constan de electrodos positivos y negativos, así como de un electrolito. Sin embargo, a diferencia de las baterías, que pueden proporcionar energía solo durante un tiempo limitado antes de necesitar recargarse o reemplazarse, las celdas de combustible tienen la capacidad de operar de manera continua. Esto se debe a que pueden absorber suministros constantes de combustible y oxidante, lo que les permite generar electricidad de forma ininterrumpida siempre y cuando, exista suministro.

Según Acuña Garrido, F y Ventura Muñoz, Y. (2001) [47], una celda de combustible representa un sistema de flujo estable en el cual el combustible y el oxidante son proporcionados desde una fuente externa que permite la conversión de energía química en energía eléctrica, sin la necesidad de combustión y sin emitir contaminantes al aire o al agua. Este proceso es continuo y directo, y se basa en reacciones de reducción y oxidación que ocurren en presencia de un catalizador. Idealmente, no se produce ningún cambio en la composición química del electrolito ni de ambos electrodos.

Por otro lado Alvarado Flores, J., Ávalos Rodríguez, M. y Rutiaga Quiñones, J. (2011) [48], comentan que una celda de combustible se compone de cuatro partes principales: ánodo, cátodo, electrolito y el circuito externo. En el ánodo, el hidrógeno se oxida, con lo cual resultan protones y electrones, mientras que en el cátodo se reduce el oxígeno a especies óxido, las cuales reaccionan para formar agua. Dependiendo del electrolito, los protones o bien los iones óxido se transportan a través de un conductor iónico aislante, mientras que los electrones viajan a través de un circuito externo para liberar la energía eléctrica

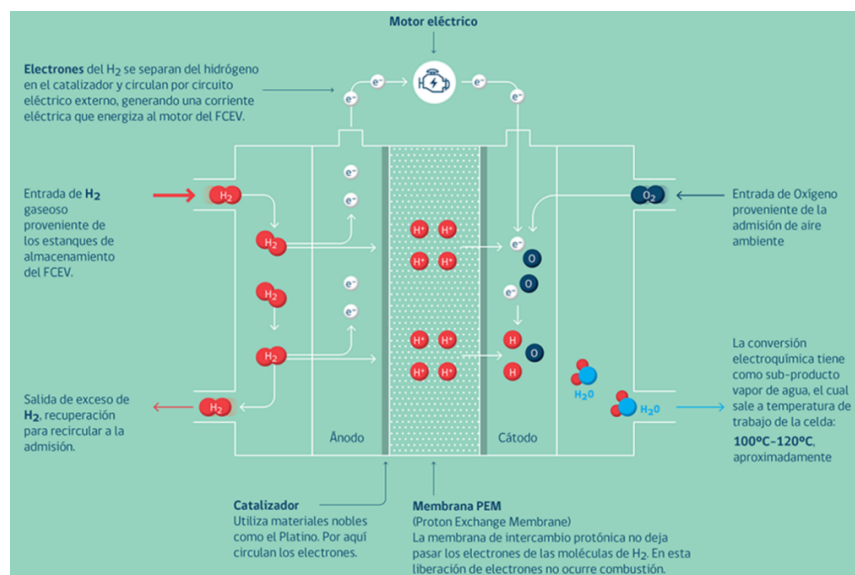


Figura 24: Principio de funcionamiento y componentes de una celda combustible de membrana PEM. [49]

Las celdas de combustible se clasifican principalmente por el tipo de electrolito que emplean. Esta clasificación determina el tipo de reacciones electroquímicas que tienen lugar en la celda, el tipo de catalizadores necesarios, el rango de temperatura en el que opera la celda, el combustible requerido y otros factores. Estas características, a su vez, afectan las aplicaciones para las cuales estas celdas son más adecuadas. Actualmente, hay varios tipos de celdas combustible en desarrollo, cada una con sus propias ventajas, limitaciones y aplicaciones potenciales.

Continuando con el estudio de Alvarado Flores, J., Ávalos Rodríguez, M. y Rutiaga Quiñones, J. (2011) [48], en relación con el tipo de electrolito utilizado, las celdas combustibles se pueden clasificar en 6 grupos principales:

Tabla 9: Tipos de celdas combustible según su electrolito [48].

Tipo de celda combustible	Electrolito más común
Celda combustible alcalina (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio sobre una matriz
Celda combustible de ácido fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico líquido sobre una matriz
Celda combustible de óxido sólido (SOFC)	Circonia estabilizada con Itria (YSZ)
Celda combustible de carbonatos fundidos (MCFC)	Carbonatos fundidos de litio, sodio y/o potasio
Celda combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)	Ácido Perfluorosulfónico (Nafion)
Celda combustible de metano directo (DMFC)	Nafion

Tal como se comentó, las celdas combustibles clasificadas anteriormente se diferencian entre ellas por el tipo de electrolito que utilizan para generar la energía eléctrica. En consecuencia, cada una cuenta con distintos parámetros de operación que afectan su eficiencia. Por lo tanto, cada celda combustible está diseñada para aplicaciones específicas, con el objetivo de operar en su rango óptimo de eficiencia. La siguiente tabla muestra un resumen.

Tabla 10: Comparación de las características técnicas de las celdas combustible [48].

Tipo FC	Temp. operación [°C]	Potencia de salida [kW]	Eficiencia eléctrica [%]	Aplicaciones	Ventajas
AFC	90-100	10-100	60	-Militar -Espacial	-La reacción catódica es más rápida en electrolitos alcalinos. -Permite alto rendimiento. -Puede utilizar una variedad de catalisis.
PAFC	150-200	50-1000	>40	-Distribución de energía.	-Alta eficiencia con CHP -Aumenta la tolerancia a impurezas en el hidrógeno.
SOFC	600-1000	>1-3000	35-43	-Potencia auxiliar -Alta distribución de energía.	-Alta eficiencia -Flexibilidad del combustible -Puede utilizar una variedad de catalisis. -Electrolito más delgado. -Mantenimiento mínimo. -Capacidad para CHP.
MCFC	600-700	<1-1000	45-47	-Alta distribución de energía.	-Alta eficiencia -Flexibilidad del combustible -Puede utilizar una variedad de catalisis. -Capacidad para CHP.
PEMFC	50-100	<1-250	53-58	-Energía portátil. -Distribución de baja energía. -Vehículos espaciales. -Transporte.	-El electrolito solido reduce los problemas de corrosión. -Mantenimiento mínimo. -Temperatura de operación baja. -Rápido inicio de funcionamiento.
DMFC	20-90	0,001-100	40	-Computadoras y otros servicios portátiles.	-Arranque rápido, reducción de costos.

4.2.2. Análisis del sistema de almacenamiento de hidrógeno

El hidrógeno tiene la mayor energía por unidad de masa que cualquier otro combustible y es que, tal como se muestra en la **figura 25**, un kg de H₂ tiene casi tres veces más energía que un kg de gasolina. Sin embargo, a temperatura ambiente resulta en una baja densidad energética por unidad de volumen, por lo tanto, requiere el desarrollo de avanzados métodos de almacenamiento con un potencial de mayor densidad energética. [50]

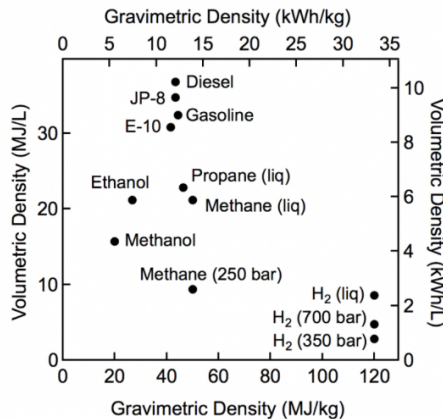


Figura 25: Comparación de la densidad gravimétrica y la densidad volumétrica para varios combustibles [50.]

Las formas de almacenar el hidrógeno se pueden dividir en forma física en estanques o química, mediante adsorción o absorción y también en otros compuestos. La **figura 26** muestra las principales formas de almacenamiento de hidrógeno.

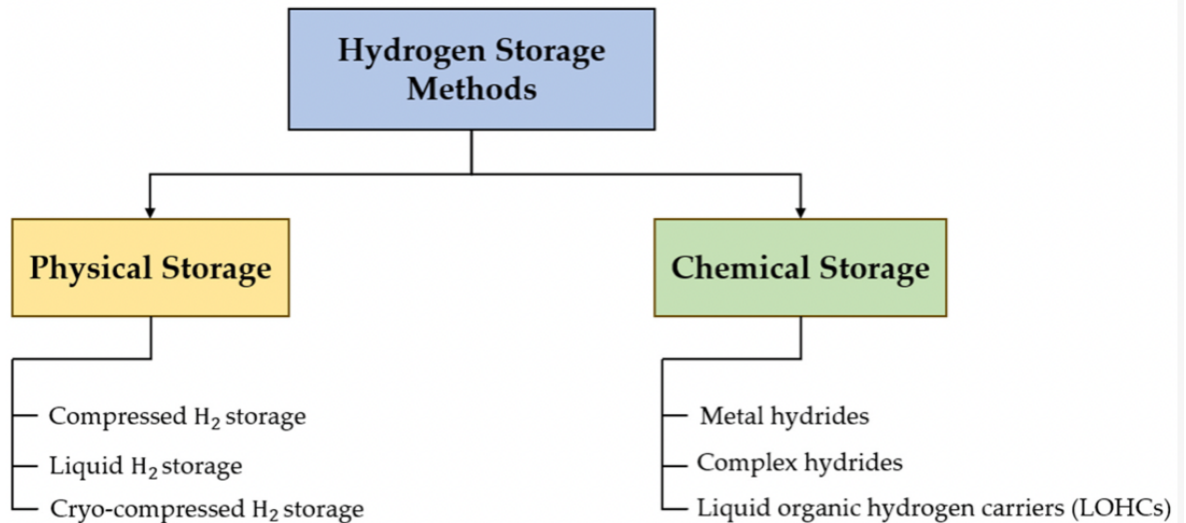


Figura 26: Principales formas de almacenamiento del hidrógeno [51].

Formas de almacenamiento físico

- **Gas comprimido**

Según Pérez, L. (2022) [52], el método más comúnmente utilizado para almacenar hidrógeno en vehículos de celdas de combustible son los tanques de hidrógeno comprimido. Existen cuatro tipos de cilindros contenedores de alta presión para este propósito.

1. **Tipo I:** Son recipientes a presión fabricados en metal. Se utilizan en depósitos de gas industrial con presiones entre 150 y 300 bares, pero su peso elevado los hace inviables para vehículos.
2. **Tipo II:** Estos recipientes tienen un aro de revestimiento metálico grueso envuelto con un compuesto de fibra de carbono o vidrio. Se emplean en hidrogeneras (estaciones de hidrógeno) y pueden soportar hasta 1000 bares.
3. **Tipo III:** Constituidos por un revestimiento metálico interno y envueltos en materiales compuestos para soportar esfuerzos mecánicos. Su diseño reduce el peso en comparación con los tipos I y II.
4. **Tipo IV:** Fabricados con una camisa polimérica de alta densidad, envuelta en fibra de carbono. Soportan presiones de hasta 700 bares y son ideales para aplicaciones portátiles debido a su bajo peso.

Los tanques Tipo III y Tipo IV utilizan materiales como la fibra de carbono combinada con epoxi (plástico reforzado con fibra de carbono, CFRP). Aunque son livianos y resistentes, deben mantenerse por debajo de 358 K (85 °C) para garantizar la

seguridad. Estos tanques son más caros debido al uso de fibra de carbono, pero son ampliamente utilizados en la electromovilidad

- **Hidrógeno líquido**

La licuefacción del hidrógeno es un método destinado a incrementar la densidad de energía volumétrica, también conocido como almacenamiento criogénico, ya que implica enfriar el H_2 a 20 K (-250 °C). A pesar de ser un proceso energéticamente costoso, eleva la densidad de energía volumétrica de 5 MJ/l (para H_2 comprimido a 690 atm) a 8 MJ/l (para hidrógeno líquido, LH_2). Este procedimiento reduce el volumen necesario para el almacenamiento, permitiendo el uso de tanques más pequeños y livianos.

Para mantener el hidrógeno en estado líquido, es crucial mantenerlo por debajo de su punto de ebullición de 20 K. Los tanques originales de LH_2 eran recipientes metálicos de doble pared. El recipiente interior contaba con un aislamiento multicapa compuesto por láminas metálicas separadas por lana de vidrio; el espacio entre los vasos internos y externos se evacuaba para crear un vacío.

A pesar de las mejoras significativas en la densidad volumétrica, el almacenamiento de LH_2 no se utiliza con frecuencia debido a varias razones. En primer lugar, al menos el 35% del contenido energético del combustible se utiliza para su licuefacción, lo que representa tres veces más energía que la necesaria para comprimir H_2 a 690 atm. En segundo lugar, el LH_2 se evapora fácilmente durante el proceso de suministro de combustible. En tercer lugar, el LH_2 se presuriza rápidamente mientras está a bordo de los vehículos, ya que absorbe el calor del entorno. Por lo tanto, el tanque debe ventilarse cada 3 a 5 días durante la inactividad para evitar pérdidas peligrosas y costosas por evaporación; sin control, todo el almacenamiento de hidrógeno se evaporaría en aproximadamente 2 semanas [52]

- **Hidrógeno crio-comprimido**

El almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido se ha convertido en una opción interesante para aprovechar las características de los principios de almacenamiento de hidrógeno comprimido y líquido. Esta técnica permite almacenar hidrógeno a presiones elevadas por encima del ambiente y a temperaturas cercanas a su punto de ebullición. La compresión de 1 bar a 350 bar del hidrógeno a -233 °C aumenta en 28% su densidad, lo que resulta en una mayor eficiencia de almacenamiento. Este enfoque brinda una mayor capacidad de almacenamiento de energía por unidad de volumen, mitigando problemas como la demanda de altas presiones y volúmenes en el almacenamiento de hidrógeno comprimido, así como las pérdidas por evaporación asociadas con el almacenamiento de hidrógeno líquido.

Según Gómez, J. y Santos, D. (2023) [51], el sistema de almacenamiento crio-comprimido permite su aplicación a bordo de vehículos mediante recipientes de Tipo III o Tipo IV. Además, el recipiente utilizado para el almacenamiento de hidrógeno criogénico debe estar diseñado para resistir condiciones extremas de baja temperatura y

alta presión, asegurando la contención efectiva del fluido criogénico. Esto permite que el sistema de almacenamiento sea alimentado con varios métodos de almacenamiento de hidrógeno, incluyendo hidrógeno líquido (LH₂), hidrógeno comprimido en frío, hidrógeno comprimido a temperatura ambiente o hidrógeno crio-comprimido. Esta versatilidad otorga al sistema de almacenamiento crio-comprimido una ventaja significativa sobre otras técnicas de almacenamiento. A pesar de estos beneficios, los tanques crio-comprimidos aún no son comercialmente factibles debido a la disponibilidad de infraestructura y el costo asociado con esta técnica de almacenamiento.

Formas de almacenamiento químicas

- **Hidruros metálicos**

Los hidruros metálicos están siendo explorados como una solución potencial para el almacenamiento reversible de hidrógeno a bordo de vehículos, ya que pueden liberar hidrógeno a temperaturas y presiones relativamente bajas requeridas para las celdas de combustible. Los hidruros son compuestos químicos en los cuales el hidrógeno se combina con otro elemento. Varios metales pueden formar hidruros metálicos mediante una reacción reversible con hidrógeno o reacciones electroquímicas. La formación de hidruros metálicos mediante la reacción con H₂ puede expresarse mediante la siguiente ecuación:



donde M representa el metal o un compuesto inter-metálico, MH_x es el hidruro respectivo formado en la reacción, Q es el calor de la reacción, y x representa la relación de hidrógeno al metal. Como consecuencia de la reducción de la entropía del hidruro en relación tanto al metal como a la fase gaseosa del hidrógeno, la formación de hidruros suele estar acompañada por la liberación de calor, mientras que la reacción inversa que implica la liberación de hidrógeno es un proceso endotérmico. Por lo tanto, desorción de hidrógeno requiere el suministro de calor. Los metales pueden ser hidrogenados mediante gas hidrógeno molecular o átomos de hidrógeno obtenidos de un electrolito. En el caso de la carga en fase gaseosa, el proceso involucra múltiples etapas de reacción del hidrógeno con el metal para formar el hidruro, lo cual debe ser considerado.

El hidruro de magnesio (MgH₂) ha sido ampliamente investigado como un potencial material de almacenamiento de hidrógeno debido a su alta capacidad de almacenamiento gravimétrico del 10,1% en peso. Sin embargo, su limitada reversibilidad dentro de un rango práctico de presión de hidrógeno lo hace inadecuado para el almacenamiento de hidrógeno a bordo de vehículos eléctricos [51].

- **Hidruros complejos**

La formación de hidruros complejos ocurre mediante la reacción del hidrógeno atómico que contiene aniones complejos como amidas y borohidruros con los cationes metálicos como los elementos del grupo 1 o 2. La liberación de hidrógeno de estos

compuestos ocurre mediante la descomposición del "anfitrión" en dos o más componentes. Las amidas y borohidruros se encuentran entre los hidruros complejos actualmente investigados como materiales prometedores de almacenamiento de hidrógeno.

Debido a la utilización de materiales más ligeros, los hidruros complejos exhiben densidades gravimétricas más altas que los hidruros inter-metálicos. Sin embargo, estos materiales enfrentan desventajas ya que requieren una temperatura de hidrogenación y deshidrogenación alta (500 K-700 K) y son susceptibles a la descomposición.

Un desafío común con los hidruros complejos es la ocurrencia de reacciones de deshidrogenación de múltiples etapas que requieren diferentes condiciones de temperatura y presión, lo que agrega complejidad a las aplicaciones a bordo de vehículos eléctricos [51]

- **Portadores de hidrógeno orgánico líquido (LOHCs)**

Los LOHCs se utilizan para el almacenamiento de hidrógeno a través de una reacción química. Estos portadores son compuestos orgánicos insaturados que contienen enlaces dobles o triples de carbono que experimentan hidrogenación al unirse con hidrógeno. Esta reacción exotérmica ocurre a presión y temperatura elevadas (30-50 bar y 150-200 °C, respectivamente), facilitada por un catalizador. El almacenamiento de hidrógeno se logra mediante la hidrogenación y deshidrogenación reversible de los enlaces dobles de carbono. La hidrogenación es un proceso exotérmico que ocurre a alta presión y temperatura, mientras que la deshidrogenación es un proceso endotérmico que tiene lugar a presión atmosférica. Ambos procesos dependen del catalizador, teniendo un papel significativo en facilitar la reacción.

La capacidad de almacenamiento de hidrógeno de compuestos orgánicos insaturados suele ser alrededor del 6 % en peso. La unión molecular de hidrógeno en los materiales LOHC aumenta significativamente su densidad volumétrica, lo que permite su transporte y distribución de manera similar al petróleo crudo real. Esto permite la utilización de la infraestructura de combustible existente sin necesidad de modificaciones significativas en las instalaciones de repostaje, transporte y almacenamiento, lo que ofrece una ventaja para la adopción generalizada de esta tecnología. Los materiales LOHC de mayor densidad volumétrica suelen ser económicamente rentables y fácilmente accesibles. Generalmente poseen propiedades no tóxicas y bajas temperaturas de deshidrogenación; sin embargo, la hidrogenación y deshidrogenación de los LOHCs requieren una energía intensiva, convirtiendo esta opción en no adecuada para aplicaciones a bordo de vehículos eléctricos con la tecnología actual [51]

4.3. E-combustibles (E-fuels)

Tal como se mencionó en el subcapítulo: “**E-Combustibles como alternativas en el sector del transporte**”, los E-combustibles son combustibles sintéticos producidos

mediante la combinación de hidrógeno generado a través de la electrólisis del agua y CO₂ capturado del ambiente, utilizando fuentes de energía renovable.

Para comprender de mejor manera el proceso de producción de estos hidrocarburos, se muestra la siguiente figura.

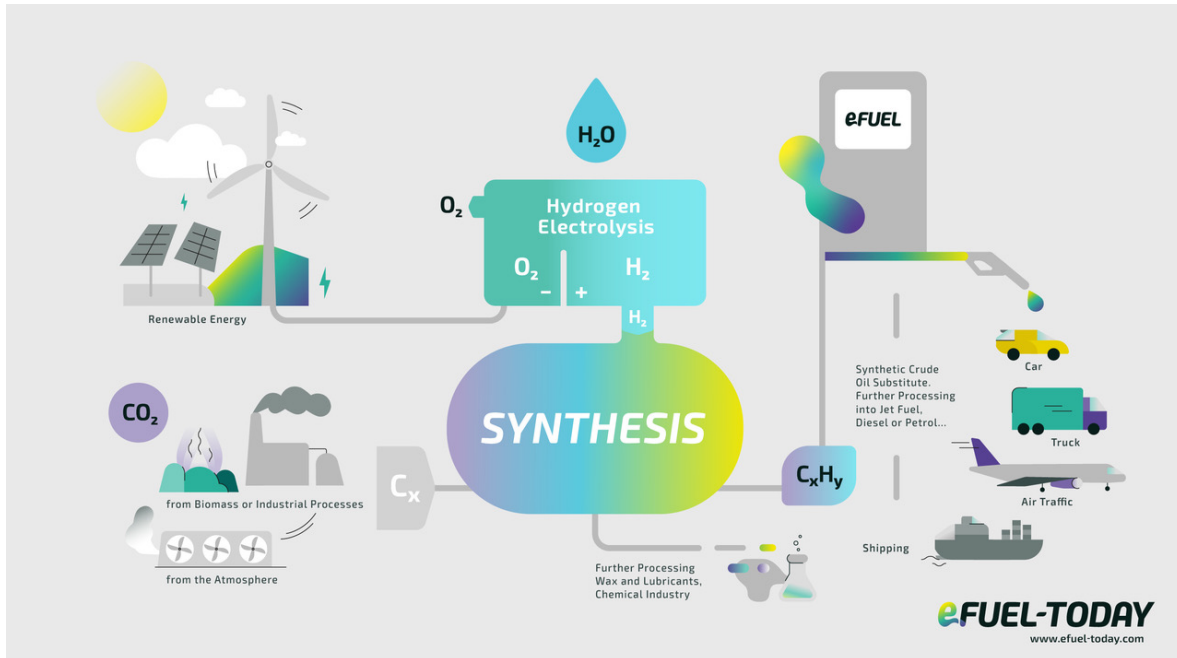


Figura 27: Proceso de producción de los e-combustibles [56]

De esta manera, se puede notar que el proceso de producción de los e-combustible cuenta con 4 etapas antes de ser suministrada en los medios de transporte. A continuación, se describen las etapas de producción y los equipos asociados.

4.3.1. Captura del CO₂

En un estudio realizado por Galán, G., Martín, M. y Grossmann, I. (2023) [53], se describe tres fuentes para capturar CO₂ de la atmósfera: la captura directa de CO₂ del aire, fuentes industriales y fuentes biogénicas.

Según IEA, actualmente se utilizan dos enfoques tecnológicos para capturar CO₂ del aire: DAC sólido y DAC líquido. El DAC sólido (S-DAC) se basa en adsorbentes sólidos que operan en presiones de vacío y a temperatura media (80-120 °C). El DAC líquido (L-DAC) se basa en una solución acuosa básica (como el hidróxido de potasio), que libera el CO₂ capturado a través de una serie de unidades que operan a alta temperatura (entre 300 °C y 900 °C).

La captura de CO₂ del aire es más costosa en términos de energía que la captura de una fuente puntual, como los gases de combustión de una central eléctrica o una planta de cemento [54]. Esta diferencia radica en que el CO₂ en la atmósfera está considerablemente más diluido. Por lo tanto, para recuperar una cantidad significativa de

CO₂ del aire, se necesitan volúmenes enormes, lo que implica el uso de numerosos ventiladores y un consiguiente alto consumo de energía [53].

En el caso de la captura de CO₂ de fuentes industriales, un estudio realizado por Roa Villalón, A. (2022) [57], indica que existen tres tecnologías: la captura postcombustión, la captura precombustión y oxicomustión.

Finalmente, por el lado de las fuentes biogénicas, son aquellas fuentes estacionarias en las que se realizan procesos en los que se libera el CO₂ almacenado en materiales biológicos. Ejemplos de estos procesos son combustión, fermentación, descomposición u otros. Las fuentes más comunes son: transformación de biogás a biometano, combustión de biomasa y procesos de fermentación industriales [57].

4.3.2. Producción de hidrógeno verde

Tal como se mencionó en el subcapítulo “**Hidrógeno como alternativa en el sector del transporte**”, la producción de hidrógeno verde se logra mediante el proceso de la electrólisis del agua utilizando fuentes de energía renovables, como lo son la eólica y solar. Por lo tanto, al considerar que el suministro de energía eléctrica ya es renovable, el equipo principal de este proceso es el electrolizador de agua.

La electrólisis del agua es un proceso que implica el paso de una corriente eléctrica a través del agua para separar sus moléculas en hidrógeno y oxígeno. Esta división controlada ocurre dentro de un dispositivo llamado electrolizador.

Según Soto Alegre, O. (2020) [55], el electrolizador consta de dos terminales metálicos: el ánodo y el cátodo, los cuales están separados a una distancia específica y sumergidos en un electrolito o solución. El ánodo está conectado al terminal positivo de la batería o fuente de alimentación de corriente continua, mientras que el cátodo está conectado al terminal negativo. Se aplica una tensión continua en estos electrodos, lo que da lugar a una reacción electroquímica en sus superficies. En el ánodo se forma oxígeno, mientras que en el cátodo se produce hidrógeno. El esquema básico del electrolizador se presenta en la siguiente figura.

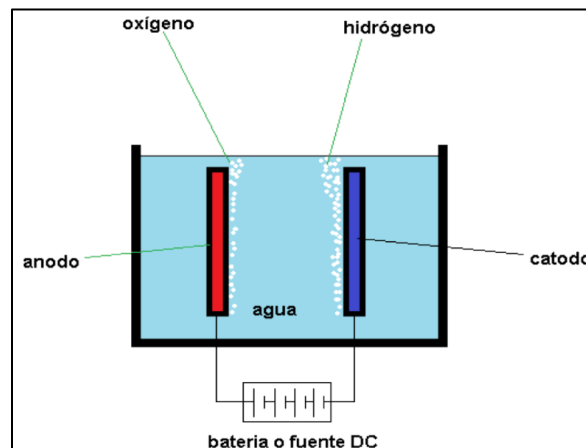


Figura 28: Esquema básico de un electrolizador [55].

A continuación, se describen los 3 tipos de electrolizadores existentes, los cuales cuentan con el mismo principio de funcionamiento, pero se diferencian por el electrolito que utilizan y el separador de gases [55]

- **Electrolizador alcalino**

Está conformado por dos electrodos separados por una membrana o diafragma separador de gases. Este conjunto se encuentra sumergido en un electrolito líquido que suele ser una solución acuosa concentrada de agua destilada con KOH (hidróxido de potasio), del orden de 25-30% en peso, para aumentar su conductividad iónica.

La electrolisis alcalina es una tecnología madura y la más extendida a nivel comercial en el mundo, para la producción de hidrógeno hasta el rango de 1 MW. En el ánodo y cátodo utiliza elementos químicos no nobles como catalizadores, lo cual disminuye su costo de construcción. La vida útil de la celda se estima en 90.000 horas aproximadamente.

Las desventajas de esta tecnología son:

- Bajas densidades de corriente debido a altas pérdidas óhmicas a través del electrolito líquido y el diafragma.
- Grado de pureza de los gases producidos. El diafragma no impide completamente el cruce de gases producidos (La pureza del hidrógeno alcanza cerca del 99%).
- Baja presión de operación debido al electrolito líquido, que lo hace voluminoso para una configuración en serie (arreglo del estilo pila).
- Utilización de químicos en el electrolito NaOH (Hidróxido de Sodio) y KOH (Hidróxido de Potasio), que hacen la operación más complicada que en el caso de solo utilizar agua.

- **Electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM)**

En los electrolizadores PEM, el electrolito es una membrana polimérica delgada, que no permite que se mezclen los gases, ni permite la conducción electrónica. Está compuesta por grupos funcionales del ácido sulfónico (-SO₃H) que son responsables de la capacidad de conducción del protón (H⁺) a través de ella. La membrana más utilizada para la electrolisis del agua es Nafión.

El proceso de electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM, por sus siglas en inglés) posee diversas ventajas. Se destacan las altas densidades de corriente logradas gracias a la delgadez de la membrana, lo que asegura una excelente conductividad de protones (0,1 S/cm). Además, el transporte rápido de protones a través de la membrana se debe al diseño específico para este propósito.

Otra ventaja importante es el amplio rango de carga parcial que permite que la celda funcione eficientemente, desde un 10% hasta el 100% de la potencia nominal de entrada. El diseño compacto del sistema se logra gracias al uso de electrolito sólido, y el gas producido presenta una alta pureza (99,999%) gracias a la membrana que evita la mezcla de gases.

Desde un punto de vista ecológico, este método no requiere elementos químicos adicionales en el agua, a diferencia de algunos otros procesos de electrólisis. Además, los electrolizadores PEM tienen un tamaño reducido debido a su capacidad para alcanzar altas densidades de corriente (superiores a 1A/cm²).

Sin embargo, este método presenta ciertas desventajas, como el alto costo de los componentes. Por otro lado, los materiales pueden presentar baja durabilidad si el ensamblado de la celda se lleva a cabo de manera descuidada, como un excesivo torque o el contacto de los electrodos con bordes filosos de la membrana.

- **Electrolizador de óxido sólido (SOE)**

El electrolizador de óxido sólido (SOE) posibilita la electrólisis del vapor de agua a altas temperaturas, oscilando entre los 600°C y los 900°C, lo que resulta en mayores eficiencias si se compara con los electrolizadores alcalinos o PEM. No obstante, aún se encuentra en una etapa de desarrollo predominante en laboratorios.

Este tipo de electrolizador presenta diversas ventajas:

- Puede operar a alta presión, lo que elimina la necesidad de utilizar energía adicional para comprimir gases en una etapa posterior.
- No requiere elementos químicos nobles, como catalizadores, lo que reduce significativamente los costos de construcción del equipo.
- Exhibe una eficiencia del proceso de conversión electroquímica del 100%, lo que significa que toda la energía eléctrica aplicada se convierte en energía química almacenada en el hidrógeno y el oxígeno.

Sin embargo, esta eficiencia extrema también es su principal desventaja, ya que el proceso necesita ser llevado a cabo a altas temperaturas, en el rango de 600 a 900 °C, lo que resulta en una reducida durabilidad de las cerámicas utilizadas en su construcción. Además, para alcanzar esas temperaturas, se requiere una fuente de energía adicional, como la nuclear, solar concentrada, geotérmica u otras, que pueda proporcionar las condiciones térmicas necesarias.

4.3.3. Producción de los e-combustibles

Una vez obtenido el hidrógeno mediante la electrolisis del agua y capturado el CO₂ del ambiente, se someten ambos compuestos a un proceso de síntesis en donde se hacen reaccionar para producir hidrocarburos, o e-combustibles.

Según Efuel-today (2023) [56], el proceso frecuentemente ejecutado es la síntesis de Fischer-Tropsch. Esta síntesis es una reacción de polimerización por condensación del CO que produce hidrocarburos, olefinas, parafinas y oxigenados. Ocurre en presencia de catalizadores metálicos a temperaturas de 150 a 300 °C (302 a 572 °F) y presiones de una a varias decenas de atmósferas.

El proceso Fischer-Tropsch, es una técnica bastante desarrollada y muy utilizada en varios procesos químicos que involucra la conversión del gas de síntesis (compuesto por H₂ y CO) mediante la presencia de un catalizador en un reactor, ya sea de lecho fijo o fluidizado. Su objetivo es producir hidrocarburos de cadenas más largas que el metano. Entre los productos líquidos obtenidos de esta síntesis se encuentran diésel, nafta, crudo sintético, metanol, olefinas, gasolinas, amonio y otros, los cuales tienen un alto valor agregado.

Los catalizadores comúnmente utilizados en la síntesis de Fischer-Tropsch son de níquel para la hidrogenación de grasas y productos químicos, hierro y cobalto para la obtención de hidrocarburos, y cobre para la síntesis de alcoholes. Estos catalizadores han evolucionado con el tiempo para mejorar su eficiencia y selectividad. Según Araujo-Ferrer, S.C., De Almeida, A., Zabala, A. y Granados, A. (2013) [58].

4.3.4. Proceso adicional

Después del proceso de síntesis y obtención de e-combustibles, se lleva a cabo una etapa final de refinamiento para ajustar aún más los hidrocarburos, permitiendo obtener variaciones específicas según el tipo de síntesis realizada. Esta etapa final conlleva la producción de una amplia gama de e-combustibles. Entre estos electro-hidrocarburos se incluyen e-Metanol, e-Hidrógeno, e-GNL, e-Diésel y e-Amoníaco [59].

4.4. Tecnología híbrida: Eléctrico-Diésel (EL-DI)

En el transporte, se le conoce como sistema híbrido a aquel vehículo de transporte que utilice dos motores o sistemas de propulsión de distinta naturaleza. En este caso, se le denomina eléctrico-diésel, ya que consiste en una mezcla motores/generadores de combustión interna y motores eléctricos alimentados de un sistema de almacenamiento de energía como las baterías.

Según Berkehal Inal, O., Charpentier, J. y Deniz, C. (2021) [60], los sistemas de propulsión híbridos para barcos pueden clasificarse en tres configuraciones diferentes según la distribución de energía de las fuentes de energía hacia la hélice: configuración en serie, paralela y combinada serie-paralela, según la técnica de transmisión utilizada para la propulsión.

4.4.1. Configuración en serie

La configuración en serie de la propulsión híbrida para barcos es una técnica relativamente madura en comparación con otras configuraciones. En este sistema, todos los generadores de energía, como las celdas de combustible, fuentes de energía renovable (RES) o generadores diésel, y las fuentes de almacenamiento de energía (ESS), como baterías o supercondensadores, junto con los convertidores correspondientes, están conectados a una red eléctrica principal, como se muestra en la **Figura 29** (rectángulo azul). Las hélices son accionadas con motores de corriente alterna (CA) suministrados con frecuencia variable, conectados a la barra colectora principal de corriente continua (DC) mediante un convertidor DC/CA, mientras que la batería y la celda de combustible están conectadas a través de un convertidor DC/DC y pueden utilizarse directamente en el bus de DC. Otros consumidores de energía eléctrica distribuidos, como aire acondicionado, cargas hoteleras, equipos de navegación y otros sistemas, también están conectados a la red principal. Se pueden utilizar muchas combinaciones de fuentes de energía y sistemas de almacenamiento de energía con esta configuración, y dependen de las especificaciones del barco.

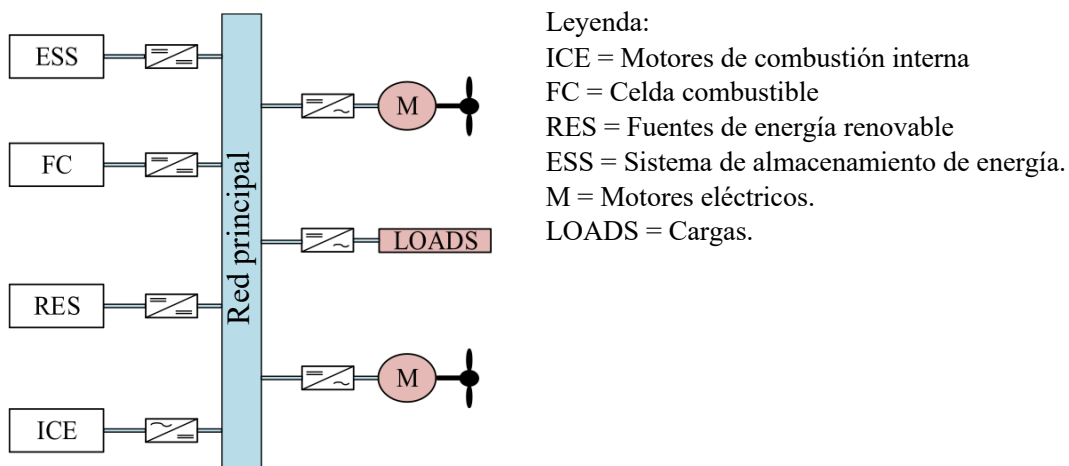


Figura 29: Sistema híbrido en serie [60].

La principal ventaja de la configuración en serie proviene de tener varios modos de operación. Dado que la energía eléctrica total del sistema se recopila y utiliza una barra colectora común para la distribución de la energía, se pueden utilizar

múltiples modos de funcionamiento, especialmente utilizando solo uno (por ejemplo, solo la energía de la batería) o una combinación de fuentes de energía (por ejemplo, celda de combustible-batería, motor de combustión interna-supercapacitor, u otras combinaciones adaptadas al barco y al punto de operación). Por otro lado, las otras fuentes de energía en el sistema, como ESS, FC, o RES, permiten que los motores diésel trabajen en su rango de alta eficiencia al ayudar en la región de baja carga donde el motor diésel sufre de baja eficiencia.

4.4.2. Configuración en paralelo

La principal diferencia de la configuración paralela radica en mantener una parte de la conexión mecánica directa entre los motores de combustión interna y las hélices. Prácticamente, la generación y almacenamiento eléctrico del sistema son muy similares a la configuración en serie; sin embargo, difieren en la propulsión y en la carga. Así, el sistema de almacenamiento de energía, otras fuentes de energía y el motor eléctrico adicional, conectado a la caja de cambios, tienen como objetivo mejorar el rendimiento al asistir en la propulsión, como se observa en la **Figura 30**. En otras palabras, el motor eléctrico asistido reduce la carga térmica del motor de combustión interna y, por lo tanto, una carga reducida conlleva a un menor consumo de combustible y emisiones.

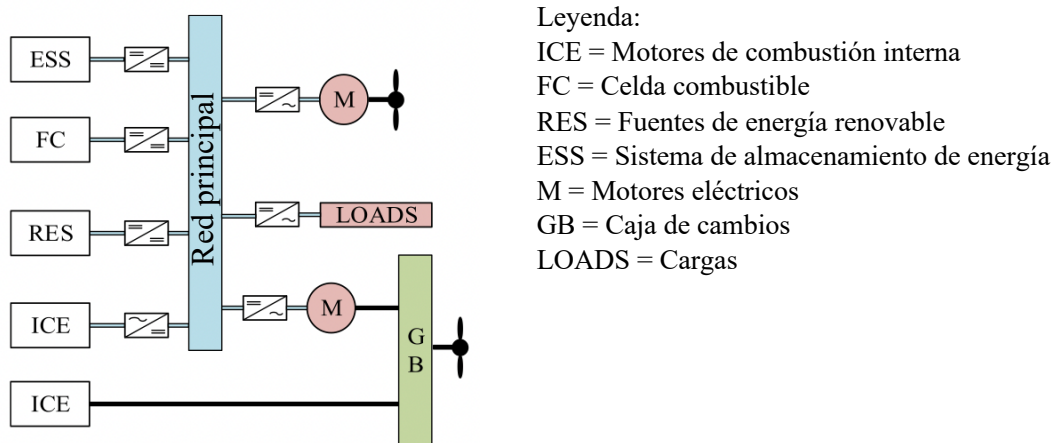


Figura 30: Sistema híbrido en paralelo [60]

La principal ventaja de la configuración paralela radica en combinar las características de propulsión eléctrica y mecánica, y sus beneficios. Por ejemplo, la limitada maniobrabilidad debido a la propulsión mecánica se elimina gracias a la propulsión eléctrica. Como otro ejemplo, el motor diésel puede trabajar en un espectro de alta eficiencia y bajo consumo de combustible sin tener problemas debido a la carga térmica, gracias al suministro del motor eléctrico auxiliar. Sin embargo, el equilibrio entre los enlaces mecánicos y eléctricos a la unidad de propulsión debe ser elaborado con cuidado. Por lo tanto, la estrategia de control para esta configuración

cobra importancia y permite encontrar un punto óptimo de alta eficiencia para diferentes demandas de energía. Como otra ventaja, el tamaño de los componentes eléctricos puede reducirse en capacidad de potencia gracias a la capacidad del motor de combustión interna para suministrar demandas de potencia transitoria más altas.

4.4.3. Configuración serie-paralelo

El sistema híbrido de propulsión serie-paralelo es una combinación de ambas configuraciones que respalda características específicas de cada sistema. Esta configuración única permite que el sistema funcione de muchas formas diferentes; por ejemplo, mecánicamente directo, totalmente eléctrico, solo híbrido en serie, solo híbrido en paralelo o ambos. Aunque el lado de la propulsión es similar a la configuración en paralelo, la conexión mecánica tiene otro enlace con la barra de bus eléctrica a través de una caja de cambios diferente antes de alimentar el motor de la hélice, como se ve en la **Figura 31**. La arquitectura del sistema híbrido es relativamente compleja en comparación con otras configuraciones. Sin embargo, consta de ventajas de ambas configuraciones, como contener diferentes modos de operación mediante el uso de controles de flujo de energía más flexibles y la optimización del consumo de energía.

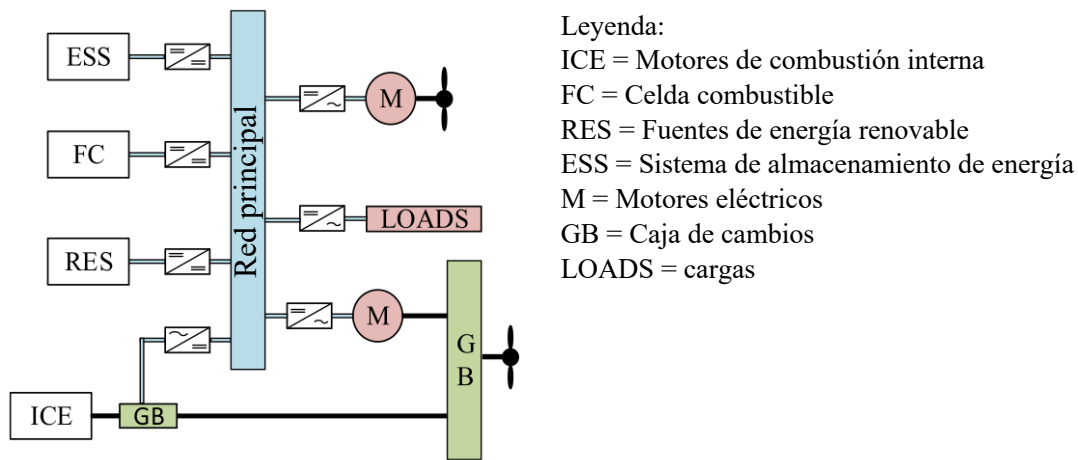


Figura 31: Sistema híbrido serie-paralelo [60]

Se puede notar que los elementos y equipos empleados en un sistema híbrido son similares a los utilizados en un sistema de baterías y motores eléctricos convencional. La diferencia fundamental radica en la persistencia de emisiones debido al uso de combustibles fósiles por parte de los motores-generadores. No obstante, al emplear las baterías durante los momentos en los que los motores-generadores operan a una baja eficiencia (es decir, en rangos de baja velocidad de operación), se logra reducir el consumo de combustibles fósiles. Este enfoque conlleva la consecuente disminución de emisiones de CO₂, lo que resulta beneficioso en términos medioambientales.

4.5. Tecnología híbrida: Hidrógeno-Diésel (H₂-DI)

La tecnología híbrida diésel-hidrógeno es la menos convencional entre todas las alternativas que se evalúan en este proyecto. A menudo, se asocia la combinación de diésel e hidrógeno con la utilización de un motor dual que opera con la mezcla de dos combustibles distintos. No obstante, en este proyecto, no se analizan los motores duales como una solución para la reducción de las emisiones de CO₂ generadas por la embarcación. En cambio, se considera una novedosa tecnología emergente que implica un equipo capaz de generar hidrógeno gaseoso por sí mismo e introducirlo en la entrada de aire del motor diésel. Esta acción genera ciertos beneficios, tanto en términos medioambientales como en la operación general del sistema.

Proveniente de Canadá, la empresa dynaCERT⁷ cuenta con una tecnología conocida como HydraGEN (ver figura) que tiene como finalidad, disminuir las emisiones de efecto invernadero y el consumo de combustible, mediante la producción de hidrógeno por medio de la electrólisis de agua destilada. Este equipo se espera que tenga mayor impacto en las industrias de transporte de carga pesada y la generación de energía.



Figura 32: Imagen referencial del equipo HydraGEN [61].

El principio de funcionamiento del HydraGEN consiste en la generación de gases de H₂ y O₂ por medio de la electrólisis⁸ de agua destilada que almacena en un reservorio. Luego, los gases producidos son suministrados a la entrada de aire del motor diésel, generando una mezcla homogénea de la combustión. La cantidad de gases de hidrógeno y oxígeno que se introduce a la entrada de aire es controlada por un sistema de control, de modo de ajustar los niveles de H₂ y O₂ con el fin de proporcionar una relación óptima para las necesidades específicas del motor.

⁷ <https://dynacert.com>

⁸ El electrolito utilizado es de hidróxido de potasio (KOH).

La introducción de gas hidrógeno en la entrada de aire del motor como un impulsor de la combustión ofrece varios beneficios. Entre ellos, se destaca la posibilidad de lograr una combustión más rápida y completa. Este proceso conlleva una disminución en la temperatura de combustión, lo que a su vez reduce la producción de NOx y otros subproductos de carbono. Además, esta práctica mejora la economía del combustible. Al garantizar una combustión más eficiente y completa, se optimiza el consumo de combustible, generando mayor energía y reduciendo la cantidad de combustible no quemado, lo que reduce las emisiones de hidrocarburos.

De manera más específica [61], mediante pruebas realizadas a motores de vehículos de carga pesada y certificadas por el “PIT Group” en Montreal y “TÜV NORD” en Alemania, se tuvieron los siguientes resultados:

- 6% a 19.2% de reducción en el consumo de combustible.
- Hasta un 88.7% de reducción en los NOx producido.
- Hasta un 46.7% de reducción en el CO producido.
- Hasta un 9.6% de reducción en el CO₂ producido.
- Hasta un 57.1% de reducción en el THC producido.
- Hasta un 55.3% de reducción de partículas (no humo negro).
- Mayor potencia y torque.
- Extiende la vida del motor y del aceite (menores costos de mantenimiento).
- Reducción en el uso del "Diesel Exhaust Fluid" (DEF) en un 40% a 60%.
- Reducción del período de reemplazo del "Diesel Particulate Filter" (DPF) en al menos un 33%.

Capítulo 5

5. Adaptación de alternativas

En este capítulo se dimensionan y detallan las especificaciones técnicas de los componentes de la adaptación, basándose en el consumo energético de cada alternativa para la propulsión del catamarán descrito en el **capítulo 3**. Debido a que no fue posible obtener los datos específicos de voltaje y corriente de operación de los equipos, se excluye el dimensionamiento de inversores y convertidores. Además, estos componentes no contribuyen de manera significativa al peso y volumen de la adaptación, por lo que el cálculo del impacto sobre la misma puede ser despreciado. Sin embargo, en caso de llevarse a cabo la conversión, estos datos deben ser verificados para cada equipo. La metodología presentada a continuación ofrece un enfoque global de los requisitos mínimos de energía y potencia que deben cumplir los dispositivos.

Para llevar a cabo el análisis de adaptación de las alternativas seleccionadas en la embarcación, primero se identifican los componentes asociados a los motores diésel actuales que serán retirados. Este proceso es fundamental para calcular el volumen disponible y el peso que se eliminará. De esta manera, se puede estudiar cada configuración y elegir la más adecuada, asegurando una distribución eficiente del peso y el volumen. Este enfoque tiene como objetivo prevenir posibles efectos adversos en la operación del catamarán, ya que, el aumento del peso en una embarcación genera un mayor desplazamiento de agua, lo cual se asocia a una mayor superficie de contacto aumentando el roce en el casco. Esta consecuencia genera un mayor potencia requerida para mantener la velocidad de navegación de una embarcación.

5.1. Adaptación de un catamarán eléctrico con baterías

Esta sección procura presentar la configuración y los equipos empleados en la adaptación de la tecnología de baterías y motores eléctricos al catamarán. Por consiguiente, es crucial dimensionar la cantidad de baterías necesarias para asegurar un ciclo operativo sin contratiempos. Asimismo, la elección de los motores eléctricos dependerá de su capacidad para mantener el régimen operativo actual. En la selección tanto de las baterías como de los motores eléctricos, se consideran factores críticos como el espacio disponible y el peso.

5.1.1. Dimensionamiento de baterías

En este caso, las baterías deben ser capaces de cubrir con toda la demanda energética de la embarcación, por lo que, se debe considerar el escenario crítico donde la demanda energética sea máxima. Esta demanda máxima se da en la temporada alta y asciende a los 1800 kWh.

Para poder cubrir con la demanda, se analizaron dos fabricantes de baterías que comercializan a aplicaciones marinas:

Tabla 11: Características de baterías seleccionadas [6364](#).

Fabricante	Modelo	Energía [kWh]	Densidad grav. [Wh/kg]	Peso [kg]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Volumen [m ³]
CATL	High Energy Density Pack	35,23	160	220,2	1060	630	240	0,16
Corvus	Dolphin energy	199	168	1183	672	500	2725	0,92

Aunque ambos modelos de baterías presentan una densidad gravimétrica relativamente similar, las baterías Corvus cuentan con una altura de 2,7 metros, lo que las hace difíciles de instalar debido al espacio limitado disponible en los cascos del catamarán. Por lo tanto, se opta por seleccionar las baterías del fabricante CATL.

Ahora, al considerar las características de la batería CATL y la demanda energética total de la embarcación, se puede determinar la cantidad que será necesaria mediante la siguiente ecuación:

$$N_{bat} = \frac{E_T}{E_b} \quad (4)$$

De esta forma, se presenta la siguiente tabla referente a los parámetros para el dimensionamiento de las baterías.

Tabla 12: Parámetros para el dimensionamiento de baterías.

Baterías	Modelo	Cantidad	Peso [kg]	Volumen [m ³]
CATL	High Energy Density Pack	52	11450	9

5.1.2. Dimensionamiento de motores eléctricos

En este caso, cada motor eléctrico debe ser capaz de suministrar la potencia máxima de la embarcación (298 kW) y mantener las revoluciones actuales de la hélice (570 RPM). Por lo tanto, se eligió como mejor opción el siguiente motor de jaula ardilla:

Tabla 13: Características del motor eléctrico seleccionado.

Fabricante	Modelo	Potencia [kW]	Peso [kg]	Largo [mm]	Alto [mm]	Ancho [mm]	Velocidad [rpm]
ABB	M3BP355	299	1820	1479	1000	800	1750

En base a los datos de la tabla y considerando que se necesitan dos motores, los parámetros de dimensionamiento de ambos motores quedarían como:

Tabla 14: Parámetros para el dimensionamiento de los motores eléctricos.

Fabricante	Modelo	Cantidad	Peso [kg]	Volumen [m ³]
ABB	M3BP355	2	3640	1,2

5.1.3. Configuración de la adaptación de baterías y motores eléctricos

Una vez seleccionados y dimensionados los componentes principales que serán adaptados a la embarcación, se muestra la configuración que tendrá esta alternativa mediante un diagrama de flujo.

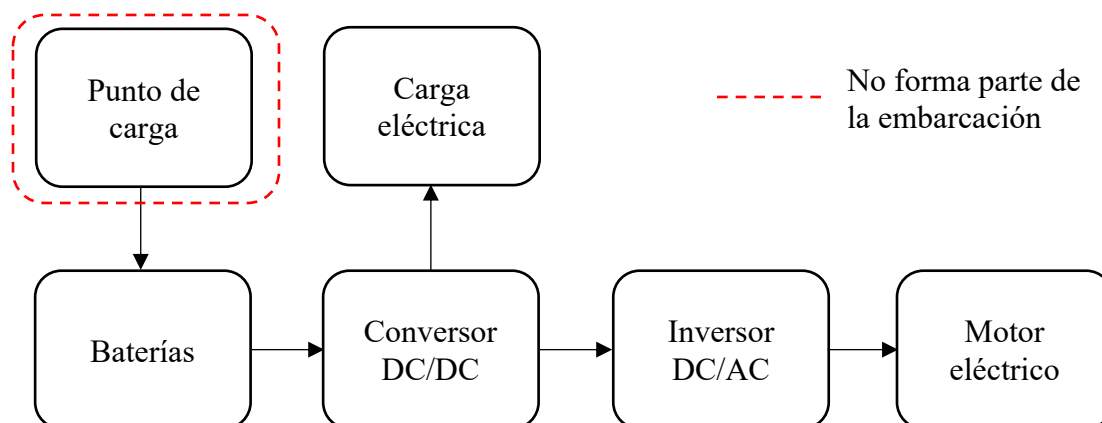


Figura 33: Diagrama de flujo de configuración baterías y motores eléctricos.

5.2. Adaptación de un catamarán con celda combustible

En la adaptación de un catamarán a un sistema de celda combustible y motor eléctrico, es necesario, al igual en el sistema de baterías y motor eléctrico, dimensionar los equipos asociados. En este caso, el equipo principal en suministrar la energía necesaria para abastecer la operación y la demanda eléctrica es la celda combustible. Sin embargo, para fines de este proyecto, se analiza la adaptación de un sistema híbrido entre celda combustible y baterías, con la finalidad de abastecer la demanda total sin sobre dimensionar el sistema o sobre exigir las celdas combustibles.

5.2.1. Dimensionamiento de la celda combustible

La celda de combustible es la fuente principal de energía eléctrica en el tren de potencia de la adaptación. Se caracteriza por su potencia nominal y debe seleccionarse sin sobredimensionarla, ya que representa el mayor costo entre los componentes de la adaptación, y este valor está vinculado directamente a la potencia que puede proporcionar.

Las celdas no toleran variaciones bruscas en la entrega de energía, ya que esto impacta directamente en su vida útil. Se recomienda que operen con cambios mínimos en los flujos de energía. Además de proporcionar una base energética estable, deben ser capaces de suministrar energía al sistema auxiliar cuando se encuentre descargado. Esto ocurre cuando el consumo de energía de la embarcación no alcanza su pico máximo, es decir, en etapas que superan la capacidad máxima de la celda de combustible.

El dimensionamiento de la celda combustible va a depender del perfil operacional de la embarcación cuando se encuentre navegando y los máximos valores se obtuvieron en la temporada alta, donde la potencia alcanza los 265 kW. Por lo tanto, la celda combustible debe ser capaz de entregar, al menos, el 75% de la potencia total necesaria.

Se llevó a cabo una investigación entre diversas empresas fabricantes y proveedoras de celdas de combustible para seleccionar la más adecuada en la adaptación. Durante este proceso, se identificaron las siguientes opciones:

Tabla 15: Características de celdas combustible seleccionadas [65] [66].

FABRICANTE	Modelo	POTENCIA [kW]	PESO [kg]	LARGO [mm]	ALTO [mm]	ANCHO [mm]	EFICIENCIA [%]
Horizon	VL III Series Liquid-Cooled System	205	259,5	1256	730	730	44%
Ballard	Fcmove-XD	120	250	596	985	745	45%

Tal como se mostró en la **Tabla 6**, la potencia requerida en la navegación en temporada alta alcanza los 265 kW, por lo que, según la suposición establecida, la celda combustible debería ser capaz de entregar, al menos, 198 kW. Por lo tanto, para evitar utilizar más de una celda combustible por casco, se selecciona la fabricada por Horizon. Dicha celda combustible será capaz de entregar 200 kW al sistema sin tener que sobredimensionarlos ni requerir de gran cantidad de unidades para lograr el impulso de la embarcación. La gráfica de perfil operacional propuesta de la celda combustible sería de la siguiente manera:

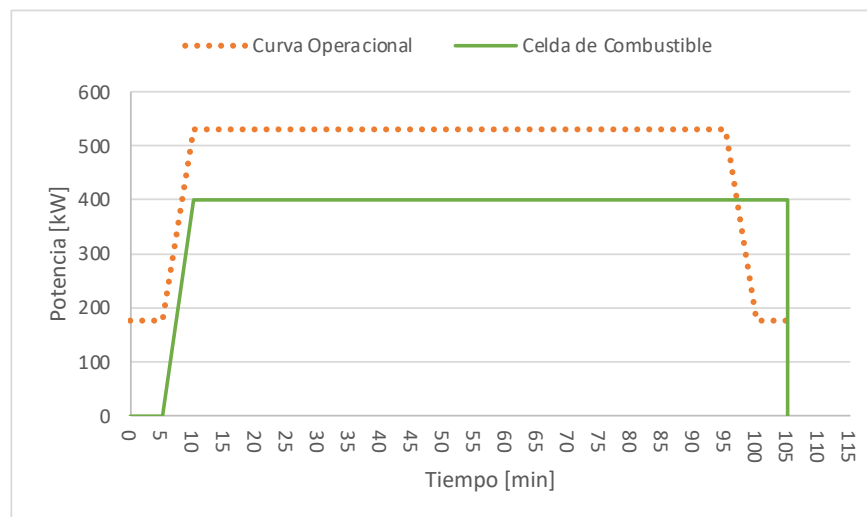


Figura 34: Perfil operacional propuesto para de la celda combustible vs curva operacional del catamarán.

Para la adaptación del equipo, es necesario utilizar dos celdas combustible, una para cada sistema de propulsión. La siguiente tabla muestra los parámetros de dimensionamiento asociados:

Tabla 16: Parámetros para el dimensionamiento de las celdas combustible.

Fabricante	Modelo	Cantidad	Peso [kg]	Volumen [m ³]
Horizon	VL III Series Liquid-Cooled System	2	519	1,33

5.2.2. Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de hidrógeno

Para dimensionar el sistema de almacenamiento de energía, es fundamental cumplir con las demandas energéticas operacionales, para ellos se conoce que la energía total máxima requerida en un turno de funcionamiento es de 1740 kWh. Por otro lado, la eficiencia de la celda combustible y de los motores eléctricos son datos de importancia, ya que permitirán calcular la energía que debe almacenarse en hidrógeno mediante la **ecuación 5**.

La celda de combustible seleccionada para este proyecto es la Horizon, la cual tiene un eficiencia del 44%, mientras que el motor eléctrico es de clase IE2⁹, lo que se traduce a una eficiencia del 96%, aproximadamente. Por lo tanto, se puede calcular la energía de hidrógeno necesaria como:

$$E_{H_2} = \frac{E_T * 2}{\eta_{PEM} * \eta_{motor}} \quad (5)$$

donde E_{H_2} es la energía que debe almacenarse en hidrógeno, $E_T * 2$, la energía total requerida en dos turnos de operación, y η_{PEM} y η_{motor} , la eficiencia de la celda combustible y del motor, respectivamente.

El resultado de la **ecuación 5** entrega que la energía requerida en hidrógeno es de 8240 kWh. Por lo tanto, al conocer que el poder calorífico del hidrógeno es de 33,33 kWh/kg, se puede calcular el peso de hidrógeno asociado a la energía requerida mediante la siguiente ecuación:

$$M_{H_2} = \frac{E_{H_2}}{PCI_{H_2}} \quad (6)$$

donde M_{H_2} es la masa de hidrógeno necesaria, E_{H_2} , la energía que debe almacenarse en hidrógeno y PCI_{H_2} , el poder calorífico inferior del hidrógeno. Al resolver la ecuación se obtiene que la masa de hidrógeno necesaria es de 250 kg en dos turnos operacionales.

Dentro de las alternativas para sistemas de almacenamiento de hidrógeno, existen dos opciones viables para implementar. Una de ellas es el almacenamiento en tanques a 350 o 700 bar, y la otra opción es la acumulación de hidrógeno en hidruros metálicos (MH). Ambas alternativas presentan características tanto favorables como desfavorables.

En el caso de los tanques del almacenamiento de gases comprimidos, la opción de 700 bar es la más adecuada, ya que puede contener el doble de presión que uno de 350

⁹ La sigla IE2 hace referencia a una de las 3 clases de eficiencia de los motores eléctricos. En este caso, se trata de un motor con un alto nivel de eficiencia, alrededor de 96%.

bar. Esta característica permite entregar mayor potencia o energía durante un periodo de tiempo más prolongado. Además, un cilindro de 700 bar puede ser más compacto y liviano que uno de 350 bar para almacenar la misma cantidad de gas. Esto es crucial en aplicaciones donde el espacio o el peso son limitados, como lo es en la aplicación marina.

Por otro lado, los tanques a alta presión tienen una mayor densidad de energía gravimétrica en comparación con los tanques de hidruros metálicos (MH). En contraste, los tanques de MH presentan una mayor densidad de energía volumétrica en comparación con los tanques a 700 bar. Si el objetivo es optimizar la adaptación según el volumen, se debería seleccionar un sistema de almacenamiento de MH. Por otro lado, si se busca optimizar según el peso, se debería elegir un sistema de almacenamiento con tanques a alta presión de 700 bar.

Como se explica en el **capítulo 7**, el aumento de peso en una embarcación es un condicionante importante en la selección de la alternativa, por lo que, para este proyecto se selecciona como alternativa de almacenamiento los cilindros de gas comprimido a 700 bar.

La empresa Hexagon Purus, cuenta con una gran variedad de cilindros de gas comprimido [67]. En base a un análisis realizado para determinar el sistema de almacenamiento más apropiado para el proyecto, se presenta la siguiente tabla indicando los parámetros de dimensionamiento de los cilindros de almacenamiento para un funcionamiento de 2 turnos de operación.

Tabla 17: Parámetros de dimensionamiento del sistema de almacenamiento.

Modelo	Presión de trabajo [bar]	Cantidad	Peso en cilindro [kg]	Peso cilindro + H ₂ [kg]	Volumen [m ³]
H2-70-600X2060	700	18	3.438	3.688	10,5

5.2.3. Dimensionamiento de baterías

En un sistema híbrido entre una celda combustible y baterías, estas últimas complementan la potencia suministrada por la celda combustible. Por lo tanto, es necesario que las baterías puedan proporcionar la potencia que la celda combustible no puede satisfacer, ya sea debido a cargas variables que resultan en una baja eficiencia de la celda combustible o porque excede su límite de potencia máxima.

Para efectos de este proyecto, las baterías se van a encargar de suministrar la energía que entrega el generador actual para el servicio eléctrico, la potencia necesaria en el zarpe y la potencia remanente que no puede cubrir la celda combustible durante la navegación del catamarán.

De acuerdo con las especificaciones operativas del generador mencionadas en la sección **“Especificaciones operacionales en generador”**, el pack de baterías tiene que ser capaz de entregar 88 kWh para cubrir el consumo de un día de operación en temporada baja, el cual es la que cuenta con mayor consumo eléctrico. De esta forma y considerando

el mismo fabricante de baterías CATL de la **tabla 11** y haciendo uso de la **ecuación 4**, se estima que para cubrir la demanda de consumo eléctrico se necesitan 3 baterías.

Además de satisfacer el consumo eléctrico del catamarán, las baterías proporcionarán la energía necesaria para el zarpe, ya que tienen la capacidad de suministrar energía de manera instantánea, y suplirán la potencia adicional que no puede ser cubierta por la celda combustible. Según la sección “**Especificaciones operacionales en motores**”, en la **tabla 6**, el zarpe requiere 88 kW durante 0,083 hr y la navegación necesita 265 kW durante 1,58 hr. Dado que la celda combustible entrega 200 kW, las baterías deben aportar el remanente de potencia, que es de 65 kW, en el mismo intervalo de tiempo. Por lo tanto, la energía total que deben proporcionar las baterías durante ambos trayectos de navegación asciende a 440 kWh, lo que equivale a 13 baterías.

A continuación, la siguiente tabla indica los parámetros asociados al dimensionamiento del pack de baterías.

Tabla 18: Parámetros para el dimensionamiento del pack de baterías en un sistema de celda combustible.

Baterías	Aplicación	Cantidad	Peso [kg]	Volumen [m ³]
CATL	Consumo eléctrico	3	661	0,5
	Zarpe y navegación	13	2.862	2,1
Total		16	3.523	2,6

Tal como se comentó, el sistema híbrido entre celda combustible y baterías aplicado a la embarcación, cuenta con ventajas de no sobre exigir a los equipos y componentes utilizados, ya que trabajan de forma complementaria para entregar un funcionamiento óptimo y seguro. A continuación, se muestra el gráfico del perfil operacional de ambas tecnologías versus el perfil operacional del catamarán.

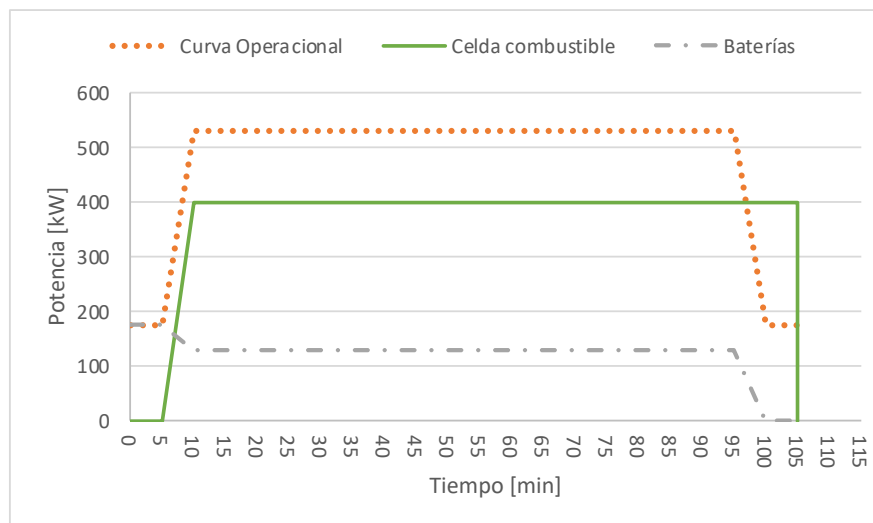


Figura 35: Perfil operacional de baterías y celda combustible vs la curva operacional.

5.2.4. Configuración de la adaptación de celda combustible

Una vez seleccionados y dimensionados los componentes principales que serán adaptados a la embarcación, se muestra la configuración que tendrá esta alternativa mediante un diagrama de flujo.

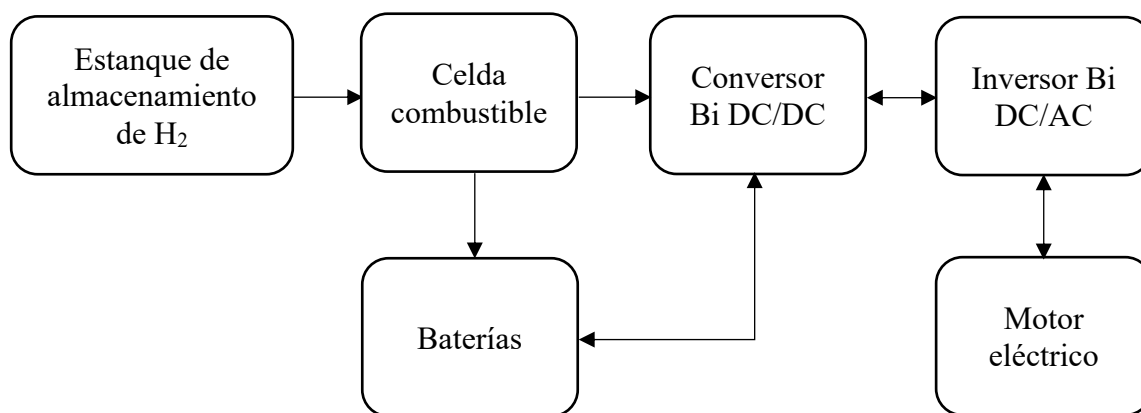


Figura 36: Diagrama de flujo configuración híbrida celda combustible y baterías.

5.3. Adaptación de un catamarán con e-combustibles

A diferencia de las otras alternativas, la adaptación de un catamarán impulsado por e-combustibles, no requiere de cambio o adición de equipos al sistema ya que, tal como se comentó en el subcapítulo “**E-Combustibles como alternativas en el sector del transporte**”, este hidrocarburo puede operar de manera eficiente en los motores de combustión interna. Por lo tanto, la configuración que tendrá esta alternativa será la misma que posee actualmente el catamarán.

Ahora, si bien esta alternativa no requiere de adaptaciones o cambio de configuraciones, es importante considerar lo comentando por Efuels Alliance en [25], donde indican que la eficiencia del motor varía entre 30-36%, lo cual es menor al 40% de eficiencia que operan actualmente los motores con diésel convencional. Por lo tanto, el consumo de e-combustibles será mayor al consumo actual del diésel.

Es importante destacar que los cálculos realizados para calcular el consumo de e-combustible están basados en suposiciones, ya que al tratarse de un hidrocarburo relativamente nuevo, no existe mucha información acerca de, por ejemplo, su poder calorífico o la eficiencia que tienen en los motores actuales. Sin embargo, son aproximaciones interesantes para el proyecto.

Tal como se comentó anteriormente, actualmente, el catamarán presenta un consumo promedio total de 470 litros por día de operación. Para determinar el consumo de e-combustible en base al requerimiento energético del catamarán, se utiliza la **ecuación 7**.

$$\text{Consumo}_{e-comb.} = \frac{E_T}{PCI_{diésel} * \eta_{motor}} \quad (7)$$

donde, E_T es la energía total requerida para un ciclo de operación (1798 kWh), $PCI_{diésel}$, el poder calorífico inferior del diésel (10 kWh/L) y η_{motor} , la eficiencia con la que trabaja el motor utilizando e-combustible como principal fuente de energía (30%). De esta forma, al resolver la ecuación y considerando el panorama más conservador, el consumo de e-combustible asciende a los 600 litros por día, lo cual se traduce en un aumento del 28% aproximadamente.

El aumento de consumo de combustible no afectaría en la configuración o equipos actuales del catamarán. Sin embargo, el llenado de los tanques se tendría que hacer de manera más recurrente, lo que se traduce en un aumento en los gastos de operación.

5.4. Adaptación de un catamarán con sistema híbrido eléctrico-diésel

En el contexto de este estudio, el sistema híbrido que se planea adaptar adoptará una configuración en serie. En este diseño, el grupo electrógeno desempeñará el papel principal en el suministro de energía para los motores eléctricos que impulsarán la embarcación. No obstante, siguiendo el enfoque mencionado en “**Adaptación de un catamarán con celda combustible**”, se emplearán baterías para complementar el sistema cuando la carga del grupo electrógeno sea baja. Esta estrategia tiene como objetivo evitar variaciones en la potencia del sistema y mantener al grupo electrógeno operando en su rango de máxima eficiencia.

5.4.1. Dimensionamiento del grupo electrógeno

Tal como se comentó, el grupo electrógeno es la principal fuente de potencia en el sistema, ya que se encarga de suministrar energía a los motores eléctricos y lograr el impulso de la embarcación.

Al igual que todas las alternativas, para dimensionar los motores-generadores, hay que tener en consideración el perfil operacional de la embarcación. Sin embargo, en este caso, el dimensionamiento del grupo electrógeno se realiza considerando la potencia máxima de los motores eléctricos, los cuales se especifican en la **tabla 13** y un factor de pérdidas que se asume de 1,17.

De esta forma, se muestra la siguiente ecuación para calcular la potencia necesaria en el grupo electrógeno:

$$P_{G.E.} = P \text{ máx}_{ME} * f \quad (8)$$

donde $P_{G.E.}$ es la potencia del grupo electrógeno en kW, $P \text{ máx}_{ME}$, la potencia máxima del motor eléctrico en kW y f el factor de pérdidas.

Al resolver la ecuación 8, se obtiene que la potencia necesaria del grupo electrógeno es de 350 kW. Este valor permitirá que el equipo entregue la energía necesaria al motor eléctrico y mantenga un régimen operacional eficiente.

Una vez determinada la potencia del grupo electrógeno, se realizó una comparativa con los disponibles en el mercado en la cual destacó uno en particular

Tabla 19: Especificaciones técnicas del grupo electrógeno seleccionado [69].

Grupo electrógeno	
Peso	2100 kg
Dimensiones	3150x1000x1600 mm
Consumo	87,5 l/hr
Potencia nominal	350 kW/437,5 kVA
Motor	
Marca	Cummins
Velocidad nominal	1800 rpm
Modelo	KTA19-DM
Generador	
Marca	Stamford
Modelo	CCFJ350J-WTP
Voltaje nominal	400/230 V
Corriente nominal	630 A
Frecuencia	50 Hz

Finalmente, la gráfica de perfil operacional se ve se la siguiente manera:

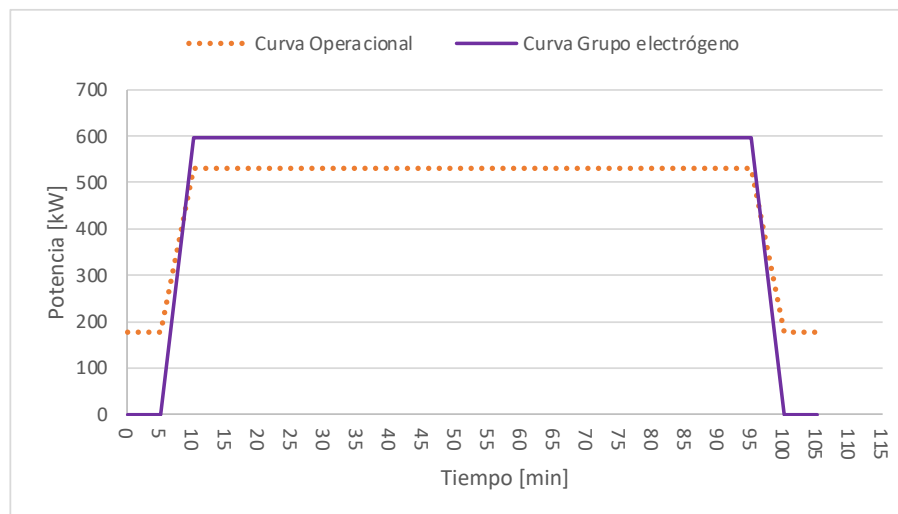


Figura 37: Perfil operacional del grupo electrógeno vs curva operacional del catamarán.

Para la adaptación del equipo, será necesario utilizar dos grupo electrógeno, una para cada sistema de prolucción. La siguiente tabla muestra los parámetros de dimensionamiento asociados:

Tabla 20: Parámetros para el dimensionamiento del grupo electrógeno.

Equipo	Cantidad	Peso [kg]	Volumen [m ³]
Grupo electrógeno	2	4200	10,1

5.4.2. Dimensionamiento del pack de baterías

El pack de baterías, como en el caso anterior de la “**Adaptación de un catamarán con celda combustible**”, cumple la función de complementar la demanda energética del catamarán. Su papel principal es proporcionar energía durante el funcionamiento del generador actual, así como durante el zarpe y arribo de la embarcación. En consecuencia, el grupo electrógeno solo se acoplará durante la fase de navegación.

Al basarse en las especificaciones operativas del generador mencionadas en la sección “**Especificaciones operacionales en generador**”, se requiere que el pack de baterías suministre 88 kWh para cubrir el consumo de un día de operación en temporada baja, que es la etapa con mayor consumo eléctrico. Para satisfacer esta demanda y considerando el mismo fabricante de baterías CATL de la **Tabla 11**. Al utilizar la ecuación 5, se estima que se necesitan 3 packs de baterías para cubrir este consumo eléctrico.

Además, para atender la demanda energética durante el zarpe y arribo de la embarcación, se evalúan la potencia y el tiempo asociados a cada etapa. Según la **Tabla 6**, se determina que se necesita una potencia de 88 kW durante 0,083 hr (5 min) para cada una de estas acciones. Por lo tanto, la energía total requerida para ambas etapas durante un turno de operación asciende a 60 kWh, lo que implica la necesidad de utilizar 1 pack de baterías para cubrir la demanda.

De esta forma, se presenta la siguiente tabla indicando los parámetros asociados al dimensionamiento del pack de baterías:

Tabla 21: Parámetros de dimensionamiento del pack de baterías en un sistema electro-diésel.

Baterías	Aplicación	Cantidad	Peso [kg]	Volumen [m ³]
CATL	Consumo eléctrico	3	660	0,5
	Zarpe y Arribo	2	440	0,35
Total		5	1.100	0,85

Finalmente, al incluir el aporte energético de cada sistema, se tiene el siguiente gráfica del perfil operacional:

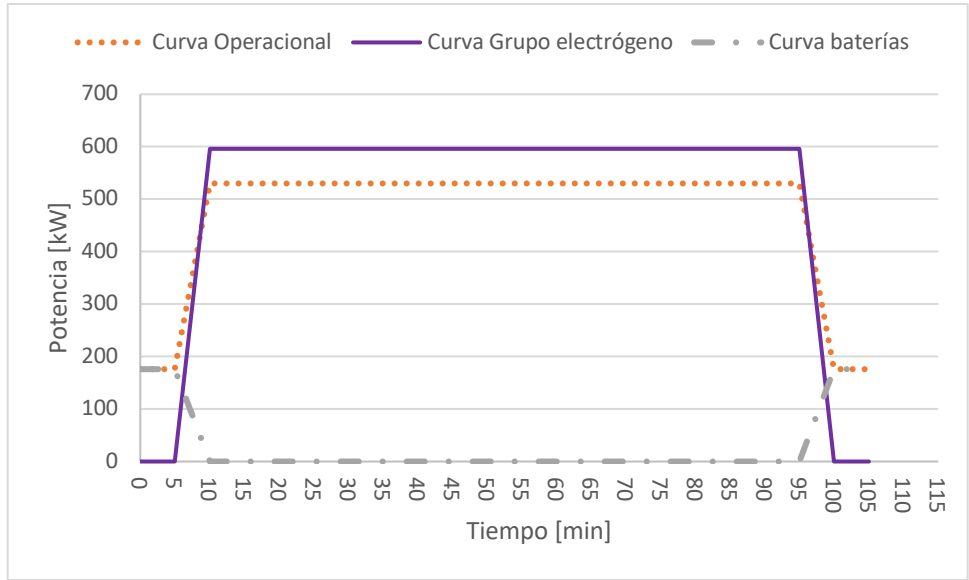


Figura 38: Perfil operativo del grupo electrógeno y baterías vs curva operacional del catamarán.

Un aspecto crucial a tener en cuenta es la capacidad del grupo electrógeno para suministrar una potencia superior a la requerida por el catamarán. Esta característica posibilita que, cuando las baterías no estén en uso, puedan recargarse al aprovechar el excedente de potencia proporcionado por el grupo electrógeno. Con esta capacidad, se elimina la necesidad de depender exclusivamente de un sistema de carga en el puerto, lo que ofrece una mayor autonomía y flexibilidad al sistema híbrido.

5.4.3. Configuración de la adaptación de un sistema híbrido eléctrico-diésel

Una vez seleccionados y dimensionados los componentes principales que serán adaptados a la embarcación, se muestra la configuración que tendrá esta alternativa mediante un diagrama de flujo.

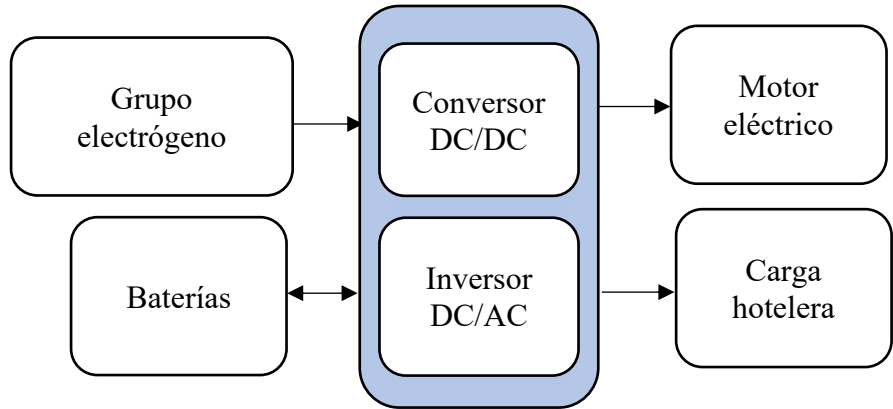


Figura 39: Diagrama de flujo de la configuración híbrida eléctrico-diésel.

5.5. Adaptación de un catamarán con sistema híbrido diésel-hidrógeno

Al mencionar un sistema híbrido, generalmente se piensa en dos sistemas de propulsión de diferente naturaleza que impulsan una embarcación. No obstante, en esta situación se hace referencia a un sistema en el que dos dispositivos, el motor diésel y el Hydragen, operan en conjunto para reducir las emisiones de CO₂ producidas por la embarcación. Por lo tanto, la única diferencia que habría entre la configuración actual y la adaptación de este sistema, es la integración del hydragen como equipo que inyecta el hidrógeno al motor.

En esta sección no se genera un dimensionamiento del hydragen, ya que al ser un equipo suministrado por la empresa Indelta, la selección del equipo la realizan en base a los parámetros de funcionamiento del motor. Alguno de los parámetros solicitados fue el consumo de combustible que tiene cada motor, el tiempo de funcionamiento, la velocidad de giro en RPM y la distancia recorrida. En base a los datos proporcionados, se seleccionó el modelo de hydragen apropiado para la aplicación.

La siguiente tabla muestra las especificaciones del equipo Hydragen seleccionado.

Tabla 22: Especificaciones técnicas del Hydragen.

FABRICANTE	Modelo	Peso [kg]	Largo [mm]	Alto [mm]	Ancho [mm]
INDELTA	HG1R	35,4	510	610	248

Cabe destacar, que para cada sistema de propulsión se utiliza un equipo Hydragen, por lo que, se necesitan 2 equipos en total para la adaptación del equipo a la configuración actual. De esta forma, se presenta la siguiente tabla referente a los parámetros de dimensionamiento.

Tabla 23: Parametros de dimensionamiento del Hydragen.

FABRICANTE	Modelo	cantidad	Peso [kg]	Volumen [m ³]
INDELTA	HG1R	2	70,8	0,15

5.5.1. Configuración de la adaptación del Hydragen

Una vez seleccionados y dimensionados los componentes principales que serán adaptados a la embarcación, se muestra la configuración que tendrá esta alternativa mediante un diagrama de flujo.

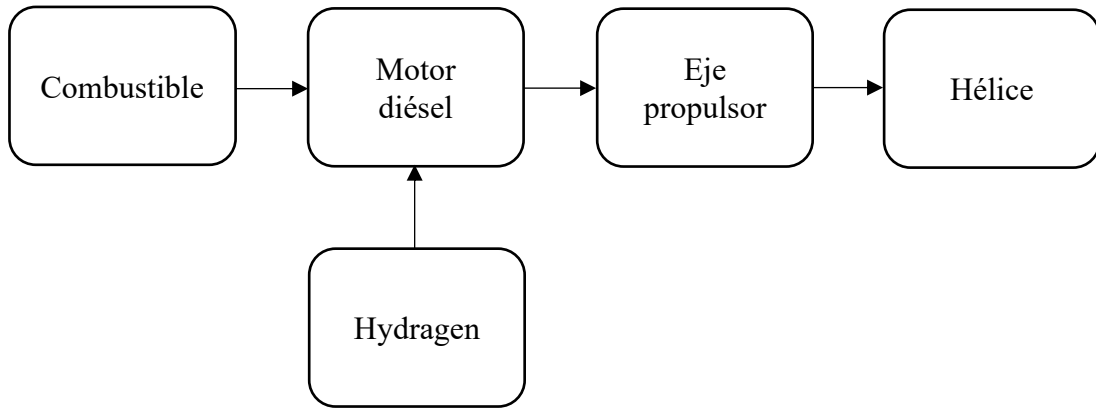


Figura 40: Diagrama de flujo de la configuración híbrida diésel-hidrógeno.

Capítulo 6

6. Evaluación y selección de alternativa

En este capítulo, se aborda la generación de soluciones con el propósito de identificar la alternativa más adecuada para adaptar en la embarcación. Se establecen criterios de comparación, los cuales serán evaluados mediante ponderaciones. Estos criterios se derivan de las necesidades específicas del catamarán para mantener un funcionamiento eficiente, alineándose con el objetivo principal del proyecto: reducir o eliminar las emisiones de CO₂ generadas.

Para desarrollar estos criterios, es crucial comprender las ventajas y desventajas de cada alternativa, así como el peso y volumen asociados a los equipos y componentes de estas opciones, en comparación con la tecnología actual. Esto permitirá evaluar el aumento o la disminución en el peso y volumen que cada alternativa representa con respecto a la configuración actual.

Tal como se comentó en el **capítulo 4**, se omiten los parámetros eléctricos de voltaje y corriente debido a la falta de especificaciones sobre la dinámica operacional del catamarán. Por la misma razón, se excluyen de la sumatoria total los inversores y convertidores. Además, estos componentes no contribuyen de manera significativa al peso y volumen de la adaptación, por lo que el cálculo del impacto sobre la misma puede ser omitido

6.1. Reducción de emisiones de CO₂

El desarrollo de este estudio tiene como objetivo principal la disminución de las emisiones de CO₂ generadas por el catamarán. Por lo tanto, cada una de las alternativas evaluadas van alineadas con este objetivo, siendo la alternativa de 100% baterías, celdas de combustible y e-combustibles las que logran eliminar por completo estas emisiones. Mientras que por el lado de los sistemas híbrido electro-diésel e hidrógeno-diésel, reducen las reducen en cierto porcentaje. A continuación, se detalla el aporte ambiental que genera cada alternativa y algunas desventajas.

Baterías y motores eléctricos

Cuando se busca eliminar por completo las emisiones contaminantes en la operación de vehículos, tanto terrestres como marinos, la primera opción que se considera es la de baterías con motores eléctricos. Esta configuración se destaca porque sus componentes no generan gases de efecto invernadero (GEI) durante su funcionamiento, lo que la posiciona como una de las alternativas más atractivas en el mercado.

Sin embargo, esta alternativa también presenta inconvenientes en términos de contaminación. Por ejemplo, el reciclaje y disposición de las baterías de litio una vez que llegan al final de su vida útil, así como las emisiones contaminantes relacionadas con la

extracción y procesamiento del litio utilizado en dichas baterías. De acuerdo con un estudio publicado por DICTUC (2022) [71], el litio producido en Chile muestra la menor huella de carbono en el mundo, con un total de 4.022 kg de CO₂ equivalente por tonelada de litio. El 12% de las emisiones totales se generan durante las operaciones de extracción en el salar de Atacama, mientras que el 88% restante proviene de las plantas químicas.

Otro factor importante a considerar es la energía con la que se cargan las batería, ya que si es generada mediante combustibles fósiles, existirá una huella de carbono asociada al uso de esta tecnología.

Celdas de combustible y motores eléctricos

Al igual que la tecnología de baterías y motores eléctricos, las embarcaciones impulsadas mediante celdas de combustible son otra alternativa atractiva cuando se desea eliminar por completo las emisiones de GEI generadas durante la navegación. Esto se debe a que la celda combustible produce únicamente agua y calor como residuo del proceso de electroquímico que realiza.

Sin embargo, uno de los inconvenientes en términos de contaminación radica en que, actualmente, según el IEA [72], el 99,3% de la producción de hidrógeno se lleva a cabo mediante combustibles fósiles sin captura de carbono, es decir, casi la totalidad del hidrógeno producido es de tipo "gris". Únicamente el 0,1% del hidrógeno se genera a partir de fuentes de energía renovable. Esta situación representa un impacto negativo significativo cuando se considera el uso de celdas de combustible para propulsar embarcaciones, ya que, aunque la operación sea libre de emisiones, la producción del hidrógeno no lo es.

Tecnología E-combustibles

Los e-combustibles, tal como se ha comentado durante el informe, son combustibles carbono neutral, por lo que, los niveles de CO₂, generados por la combustión del hidrocarburo, no aumentan. Esto se debe a que, tal como se comentó en el Capítulo 3 en “E-combustibles”, su producción se realiza mediante procesos que no generan emisiones de GEI al ambiente y que uno de los compuestos asociados es el CO₂ capturado directamente de la atmósfera. De esta forma, la misma cantidad del CO₂ capturado será emitida al ambiente, manteniendo un nivel neutro.

Si bien, los e-combustibles no generan un aumento de niveles de CO₂ en el ambiente, uno de los inconvenientes de estos hidrocarburos es que siguen siendo una alternativa contaminante, ya que en la combustión se generan otros gases contaminantes como NO_x, CO, entre otros, que son emitidos al ambiente.

Por otro lado, es importante considerar que mientras que el transporte de los e-combustible se realiza mediante las alternativas convencionales, estará ligado a la generación de emisiones, por lo que, no se considera totalmente limpio. Sin embargo, es atractiva para ser considerada como una alternativa de transición sin tener que abandonar la tecnología actual.

Tecnología híbrida eléctrico-diésel

En el caso de estudio, la alternativa híbrida eléctrica-diésel ofrece una reducción en las emisiones de CO₂ generadas por la configuración actual. Esto se logra al introducir un sistema eléctrico que actúa como complemento para satisfacer la demanda energética de la embarcación. Esta adición permite reducir en, aproximadamente, un 23% las emisiones y garantiza que el grupo electrógeno opere dentro de un rango de máxima eficiencia.

A pesar de que esta tecnología conserva la generación de emisiones de CO₂ durante su funcionamiento, se puede considerar como una alternativa menos contaminante. La reducción en las emisiones contribuye de manera positiva al ambiente y mejora las condiciones durante la navegación.

Tecnología híbrida diésel-hidrógeno

En el caso de la configuración diésel-hidrógeno, se presenta una situación similar a la híbrida eléctrico-diésel. Gracias al equipo HydraGEN, que inyecta hidrógeno en la combustión del diésel, se logran resultados positivos en cuanto a la reducción de emisiones de contaminantes. Como se mencionó en la sección “**Tecnología híbrida: Diésel-Hidrógeno**”, esta configuración puede reducir las emisiones de CO₂ generadas por la embarcación hasta en un 9,6%. Aunque este valor pueda parecer no muy significativo, representa un paso interesante en la transición hacia tecnologías más limpias. Sin embargo, al no ser un equipo autónomo, debe ser conectado al sistema eléctrico de la embarcación, por lo que la generación de este hidrógeno no sería verde.

En base al aporte que genera cada alternativa en la reducción de las emisiones de CO₂ generadas por la embarcación, se presenta el siguiente gráfico, el cual indica el porcentaje en que se reducen las emisiones en base a la situación actual.

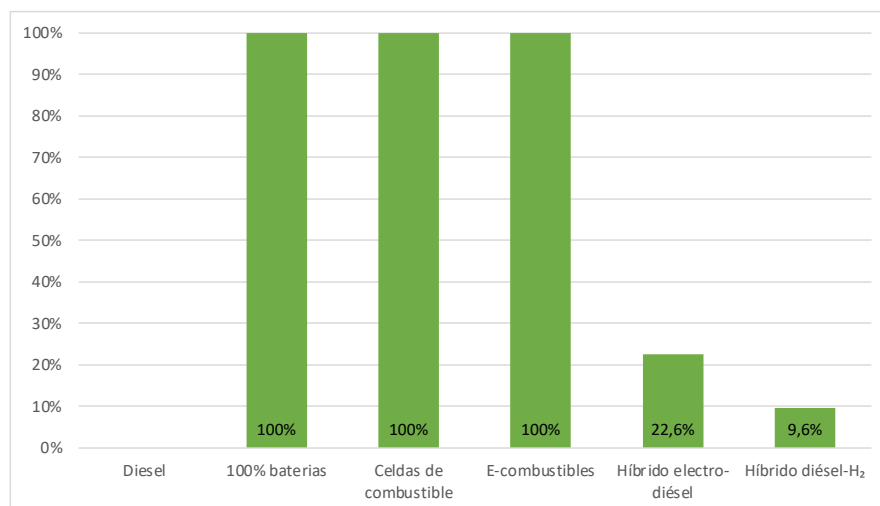


Figura 41: Porcentaje de reducción de emisiones de CO₂ en cada alternativa.

6.2. Distribución y comparación de peso y volumen

En la **figura 42 y 43**, se resumen la distribución del peso y volumen de los componentes de la adaptación de cada alternativa al catamarán y se destaca su aporte porcentual en cuanto a peso y volumen. Para más detalle, ver **Anexo 1**.

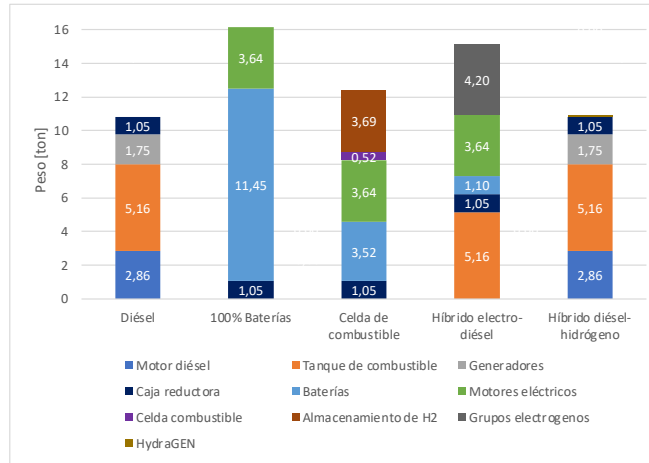


Figura 42: Distribución de pesos según los componentes de cada alternativa.

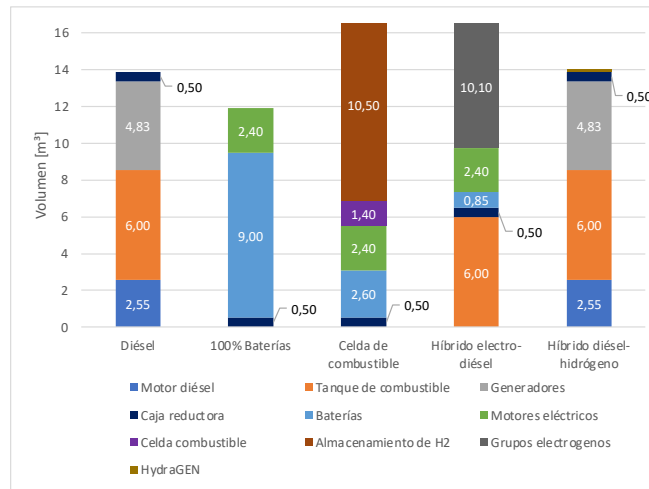


Figura 43: Distribución de volumen según los componentes de cada alternativa.

De la **figura 42 y 43** se pueden concluir varias cosas:

- En la configuración actual diésel, el elemento más relevante es el tanque de combustible. Cada casco está equipado con un tanque de combustible que suministra a los motores y generadores, representando un 48% en peso y 43% en el volumen total de la configuración.
- En la alternativa de un catamarán impulsado 100% por baterías, se presentan el mayor peso. La demanda energética asociada a la embarcación genera que el número de baterías necesarias sea elevado, lo cual se traduce en el 71% del peso

y 76% del volumen total. Sin embargo, se presenta como la alternativa con el menor volumen ocupado.

- La configuración de e-combustibles mantiene el peso y volumen como el diésel actual, por lo que no aparece Enel análisis.
- El caso híbrido eléctrico-diésel presenta el segundo mayor peso en comparación con todas las alternativas. Esta situación se atribuye a la inclusión de equipos eléctricos que operan en conjunto con los sistemas diésel. En este caso, se reemplazan los motores y generadores actuales por grupos electrógenos, los cuales son los equipos que mayor volumen ocupan con un 51%.
- La opción de la celda de combustible es una de las alternativas con menor peso asociado con aproximadamente 12,5 toneladas. Cuenta con una buena distribución del peso, ya que, exceptuando las celdas de combustible y la cajas reductoras, los otros componentes tienen pesos similares. La mayor desventaja de esta alternativa está en el volumen, debido al sistema de almacenamiento que ocupa el 60% del volumen total convirtiéndola en la segunda alternativa que mayor espacio requiere.
- El caso híbrido diésel-hidrógeno, cuenta con parámetros similares a la configuración actual, debido a que se mantienen los mismos equipos, pero se añade el HydraGEN como componente que inyecta el hidrógeno a los motores diésel. Sin embargo, el HydraGEN solo aumenta en 1% el peso y volumen total, por lo que, es muy similar a la configuración diésel.

6.3. Ventajas y desventajas

El dimensionamiento de cada alternativa es crucial para primero, analizar si es viable técnicamente para la conversión de este catamarán. Luego, para determinar cuál sería la más adecuada para adaptarse a la embarcación, ya que el peso y el volumen que ocuparán son parámetros fundamentales en esta selección. Sin embargo, existen otras limitaciones igualmente relevantes que deben tenerse en cuenta en la evaluación final. Estas limitaciones abarcan aspectos relacionados con la eficiencia operativa de la embarcación, el estado de desarrollo e infraestructura de cada alternativa, acceso a energía eléctrica en la zona, entre otros. A continuación, se detallan cada una de estas limitaciones, junto con los beneficios y desventajas inherentes a cada alternativa.

6.3.1. Estado de desarrollo tecnológico y estructural

Baterías y motores eléctricos

La configuración de baterías y motores eléctricos es una de las opciones más desarrolladas y comercializadas en el ámbito de la electromovilidad en la actualidad. En el **contexto nacional**, al cierre del primer semestre de 2023, el país ha experimentado un crecimiento significativo en la infraestructura de carga. Con un total de 908 puntos de carga públicos y 521 instalaciones de cargadores privados distribuidos por todo el país, se evidencia un avance constante en este aspecto.

No obstante, la limitación más notable de esta tecnología sigue siendo la disponibilidad y extensión de los puntos de carga para vehículos eléctricos en comparación con las estaciones de servicio convencionales. Esto puede presentar un desafío para una adopción más amplia de vehículos eléctricos.

En relación con este proyecto, una de las limitaciones clave es el acceso a la energía eléctrica en Petrohué. Esta localidad se alimenta de la red eléctrica que llega a Ensenada y Puerto Varas, pero en este tramo, el suministro eléctrico puede no ser constante. Por otro lado, en Peulla no hay acceso a la red eléctrica, pero se cuenta con turbinas hidráulicas para generar electricidad. Sin embargo, la generación de energía fluctúa drásticamente entre verano e invierno; en verano, la capacidad de generación disminuye debido a la reducción del caudal de agua, mientras que en invierno, se produce un excedente de energía. Actualmente, se están llevando a cabo trabajos para mejorar la eficiencia de las turbinas e impulsar otras medidas que aumenten la generación de energía en la zona.

Celdas de combustible y motores eléctricos

Aunque el hidrógeno presenta un gran potencial como combustible y ofrece varias ventajas, sigue siendo una tecnología relativamente nueva que requiere un mayor desarrollo tanto en el aspecto tecnológico como en el estructural.

En la actualidad, la disponibilidad y accesibilidad al hidrógeno verde como combustible están bastante limitadas, principalmente debido a los altos costos de producción asociados, según comenta la IRENA [73]. No obstante, una vez superadas estas barreras, es probable que se convierta en una de las alternativas más atractivas para vehículos de carga pesada y otros sectores industriales.

Tecnología E-combustibles

Como se mencionó en la sección de “E-combustibles”, uno de los elementos cruciales en su producción es el hidrógeno verde. En la actualidad, el estado de desarrollo de los e-combustibles se encuentra un paso detrás del hidrógeno. Es importante destacar que actualmente no existen vehículos que funcionen con e-combustibles; todos los proyectos en marcha son prototipos diseñados para evaluar la eficacia de estos combustibles como sustitutos de los combustibles fósiles.

La problemática en el desarrollo estructural también se hace presente. Aunque los e-combustibles, al ser hidrocarburos como el diésel, podrían aprovechar las mismas estaciones de servicio actuales como puntos de carga, esta especulación aún está por confirmarse. Es necesario esperar a obtener resultados satisfactorios para definir y avanzar en la viabilidad y adopción masiva de este tipo de combustible.

Tecnología híbrida eléctrico-diésel

Junto con la tecnología de baterías y motores eléctricos, la configuración híbrida eléctrica-diésel es una de las alternativas con mayor desarrollo tecnológico. La

combinación de sistemas eléctricos con el diésel proporciona una serie de beneficios, incluida la reducción de emisiones contaminantes.

En la actualidad, en los procesos de retrofit de embarcaciones, como el que se evalúa en este proyecto, la adopción de tecnología híbrida electro-diésel ha demostrado su efectividad y ha generado beneficios tanto económicos como ambientales.

Sin embargo, en el ámbito del desarrollo estructural, se observan diferencias. Mientras que la configuración diésel puede mantener la metodología actual, el sistema eléctrico presenta desafíos, como la necesidad de un punto de carga en el puerto para recargar las baterías, lo cual se encuentra limitado: en Petrohué, debido al nivel de tensión y corriente disponibles, y en Peulla, por la dependencia de caudales para generar energía eléctrica. No obstante, esta alternativa aprovecha el remanente de potencia disponible del grupo electrógeno para recargar las baterías en momentos en los que no se requiere su uso.

Tecnología híbrida diésel-hidrógeno

A diferencia de la celda combustible que trabaja con hidrógeno como combustible, el HydraGEN, es un equipo que genera su propio hidrógeno mediante un electrolizador que cuenta al interior del equipo. Por lo tanto, se puede sacar de la ecuación la dependencia de la comercialización del hidrógeno verde.

Por parte de la infraestructura, el único consumible del HydraGEN es el agua destilada, la cual puede ser obtenida sin dificultad alguna.

6.3.2. Eficiencia operativa, autonomía y mantenimiento

Baterías y Motores eléctricos

La eficiencia energética es una de las ventajas más relevantes que presenta esta tecnología. Los motores eléctricos, son más eficientes en la conversión de energía eléctrica en movimiento que los motores de combustión interna, lo que resulta en un uso más eficiente de la energía. Por otro lado, el mantenimiento asociado a los equipos disminuye en comparación con la tecnología actual, ya que los vehículos eléctricos tienden a tener costos operativos más bajos debido a la menor necesidad de mantenimiento en comparación con los vehículos de combustión interna, ya que tienen menos piezas móviles y no requieren cambios de aceite, filtros de aire, etc.

Sin embargo, la autonomía de los vehículos eléctricos todavía es una preocupación para algunos consumidores, ya que, en comparación con los vehículos de gasolina, pueden requerir más tiempo para recargar y tienen una autonomía menor con una sola carga.

Celdas de combustible y motores eléctricos

Al igual que la alternativa de baterías, esta configuración cuenta con motores eléctricos para generar el impulso de la embarcación, por lo que, se tiene una mejor eficiencia energética debido a la mayor eficiencia que tienen los motores eléctricos versus los motores a combustión interna.

Además, al hacer la comparativa con la tecnología de baterías y motores eléctricos, la autonomía y tiempos de recarga de esta alternativa es mayor, ya que el repostaje de hidrógeno en vehículos de celda de combustible es similar al proceso de repostaje de combustibles líquidos, lo que agiliza los tiempos de recarga.

Sin embargo, las celdas de combustible pueden experimentar problemas de durabilidad y vida útil, especialmente en condiciones extremas o debido a la degradación de los materiales, lo que puede afectar su rendimiento a largo plazo y requerir costosas reparaciones o reemplazos. No obstante, es importante destacar que estas limitaciones podrían mitigarse con los avances tecnológicos y mejoras continuas en el diseño y materiales de las celdas combustibles.

Tecnología E-combustibles

Para evaluar completamente la eficiencia operativa de los e-combustibles, se requiere un mayor desarrollo y aplicación de estos hidrocarburos. A partir de la eficiencia estimada del 30-36%, como se menciona en 25, se sugiere que la eficiencia operativa podría ser menor, lo que resultaría en un mayor consumo de combustible. Sin embargo, a pesar de la potencial disminución en la eficiencia, se prevé que la autonomía no se vea afectada y se mantenga similar a la que proporciona la configuración actual.

Tecnología híbrida eléctrico-diésel

La configuración híbrida eléctrico-diésel combina lo mejor de los sistemas eléctricos a baterías y del diésel. Esta fusión ofrece mejoras significativas en la autonomía gracias a la configuración diésel, junto con una mayor eficiencia energética. Los motores-generadores trabajan en su punto óptimo de eficiencia y las baterías aportan energía cuando la demanda es menor, lo que reduce el consumo de combustible.

No obstante, presenta ciertas desventajas. La configuración híbrida eléctrico-diésel pueden requerir un mantenimiento más especializado debido a la combinación de sistemas eléctricos y diésel. Esto puede generar costos y tiempos de mantenimiento más altos en comparación con otras alternativas. Asimismo, la integración de dos sistemas de propulsión diferentes aumenta la complejidad técnica del vehículo, lo que potencialmente puede provocar fallos o problemas mecánicos.

Tecnología híbrida diésel-hidrógeno

En esta configuración la autonomía actual se conserva, por lo que no existen problemáticas asociadas a los tiempos de inactividad debido a la recarga de combustible.

Por otro lado, según lo especificado en “**Tecnología híbrida: Diésel-Hidrógeno**”, la inyección de hidrógeno en la combustión del diésel aporta beneficios sustanciales como la reducción del consumo de combustible, mayor potencia y torque, y mejoras en la combustión. Estos factores se traducen en menores tiempos de mantenimiento en los componentes mecánicos. Sin embargo, existe una dependencia directa con la empresa en caso de mantenimiento o fallas del equipo, lo cual puede resultar desfavorable.

6.3.3. CAPEX y OPEX

El análisis económico que se realiza en esta sección es bastante general y tiene el fin de utilizar indicadores solo en forma comparativa que permitan comparar las alternativas evaluadas.

Baterías y motores eléctricos

El CAPEX de este proyecto se relaciona con la inversión requerida en los equipos esenciales para la adaptación, como las baterías, motores eléctricos y equipos adicionales necesarios para lograr un funcionamiento eficiente. Además, se debe considerar la instalación de un punto de carga para las baterías.

Por otro lado, en lo que respecta al OPEX, que se basa principalmente en la operatividad, se consideran factores como el costo de la energía eléctrica utilizada para cargar las baterías y el mantenimiento de los equipos.

En este sentido, al observar que el mantenimiento de los equipos en esta configuración es relativamente bajo en comparación con la configuración actual y que el costo de la energía eléctrica es moderado, el gasto principal asociado a esta alternativa está relacionado con el CAPEX.

Celdas de combustible y motores eléctricos

Al analizar la configuración de un catamarán propulsado por celdas de combustible de hidrógeno, su CAPEX se vincula con la inversión necesaria en equipos esenciales para la adaptación, tales como baterías, motores eléctricos, celdas de combustible, equipos eléctricos adicionales para lograr un funcionamiento eficiente, y la instalación de puntos de carga tanto eléctricos como de hidrógeno. En comparación con la alternativa eléctrica de baterías, el CAPEX asociado a esta configuración es, posiblemente, más elevado debido a la complejidad y el costo elevado de fabricación de las celdas de combustible, que representan una tecnología más avanzada y costosa.

En cuanto al OPEX, se mantienen los gastos relacionados con la energía eléctrica necesaria para cargar las baterías y el mantenimiento de los equipos. Sin embargo, se agrega el costo del hidrógeno utilizado para recargar los cilindros de almacenamiento que alimentan las celdas de combustible. Como resultado, se prevé que el gasto operativo de un catamarán impulsado por celdas de combustible de hidrógeno sea mayor que el de una

configuración basada en baterías, ya que el precio del hidrógeno sigue siendo considerablemente elevado en comparación con otros combustibles.

En resumen, al comparar ambas configuraciones eléctricas, la de baterías y la de celdas de combustible, se observa que, en la actualidad, un catamarán propulsado por celdas de combustible de hidrógeno probablemente tenga un mayor OPEX. Sin embargo, en términos de CAPEX, es importante evaluar el costo asociado con la cantidad de baterías requeridas para impulsar el catamarán en comparación con el uso de celdas de combustible.

Tecnología E-combustibles

La particularidad de esta alternativa radica en que, si se mantiene la tecnología actual empleada por el catamarán, no se incurriría en un CAPEX asociado al proyecto.

Sin embargo, el OPEX sería considerablemente más elevado debido a la complejidad de la producción de los e-combustibles, que requieren de varios procesos y equipos costosos como electrolizadores, equipos para la captura del CO₂ y la generación de hidrógeno a partir de fuentes de energía limpia. En consecuencia, el costo de e-combustibles sería mucho mayor en comparación con el del diésel actual y similar o ligeramente mayor que el del hidrógeno verde.

Tecnología híbrida eléctrico-diésel

La adaptación de una tecnología híbrida electro-diésel en la embarcación estaría asociada un CAPEX elevado debido a la dificultad que hay en la instalación de un sistema dual y que funcione de manera eficiente. Además, se consideran otros equipos como el grupo electrógeno que serían la principal fuente de energía del sistema.

Sin embargo, una de las ventajas de esta alternativa está asociado con el funcionamiento del grupo electrógeno en su punto de máxima eficiencia, lo que se traduce a un menor consumo de diésel. Además, el remanente de energía que no es utilizado en el proceso, permite recargar las baterías, por lo que, disminuye el gasto asociado a la recarga de baterías. De este modo, el gasto operacional en esta alternativa es menor que la configuración actual.

Tecnología híbrida diésel-hidrógeno

El CAPEX en la adaptación de esta alternativa está asociado al valor del equipo HydraGEN y a la instalación del mismo, por lo que sería, después de los e-combustibles, la alternativa con menor CAPEX entre todas.

En el caso del OPEX, según los beneficios que entrega el HydraGEN, habrá un menor consumo de combustible y menores costos de mantenimiento. Sin embargo, se le agrega los costos asociados a la reposición del agua destilada.

6.4. Generación de conceptos y soluciones

En esta sección, se ha desarrollado una tabla de generación de conceptos y soluciones, con el propósito de determinar la alternativa más adecuada para adaptarse en la embarcación. Para llevar a cabo esta evaluación, se han establecido criterios específicos que serán ponderados y evaluados en función de las ventajas y desventajas asociadas a cada alternativa. A continuación, se presenta los criterios utilizados para realizar la evaluación de alternativas.

Tabla 24: Criterios de evaluación

Criterios de evaluación	
Emisiones de CO ₂ generadas (1)	Accesibilidad a la tecnología (6)
Peso (2)	Autonomía (7)
Volumen (3)	Instalación (8)
CAPEX (4)	Eficiencia operacional (9)
OPEX (5)	

Después de establecer los criterios, se procede a compararlos entre sí para asignarles un peso jerárquico basada en su importancia dentro del proyecto.

Tabla 25: Lista de comparación entre los criterios.

Criterio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total	Peso
1	1	3	5	3	3	5	5	7	5	37,00	0,26
2	0,33	1	5	1	3	5	3	5	3	26,33	0,18
3	0,2	0,2	1	0,2	0,33	0,33	0,33	1	1	4,60	0,03
4	0,33	1	5	1	5	3	3	5	3	26,33	0,18
5	0,33	0,33	3	0,2	1	3	1	3	1	12,87	0,09
6	0,2	0,20	3	0,33	0,33	1	0,33	3	0,33	8,73	0,06
7	0,2	0,33	3	0,33	1	3	1	3	1	12,87	0,09
8	0,14	0,33	1	0,20	0,33	0,33	0,33	1	0,33	3,88	0,03
9	0,2	0,33	1	0,33	1	3	1	3	1	10,87	0,08
Total										141,61	1

Donde la escala de comparación y leyenda son:

Escala:

- 1- Igual importancia
- 3- Levemente más importante
- 5- Más importante
- 7- Mucho más importante
- 1/n- Recíproco de los valores

Leyenda:

- 1. Emisiones de CO₂ generadas
- 2. Peso
- 3. Volumen
- 4. CAPEX
- 5. OPEX

6. Accesibilidad a la tecnología
7. Autonomía
8. Instalación
9. Eficiencia operacional

De la **Tabla 26** se puede notar que el criterio de evaluación con mayor peso son las emisiones de CO₂ generadas con el 26%, lo cual va de la mano con el objetivo principal del proyecto. Seguido de este criterio, se tienen dos con mucha relevancia como son el peso y el CAPEX asociado a cada alternativa con un 18% cada una. El peso se considera crucial debido a su influencia en el desplazamiento de agua de la embarcación, lo que puede impactar en la potencia necesaria para mantener su funcionamiento habitual. Del mismo modo, el CAPEX asociado a cada opción es un factor significativo, ya que la inversión requerida es una limitante y un elemento clave en la toma de decisiones en cualquier proyecto.

Por otro lado, los criterios con menor peso son la instalación de la alternativa y el volumen con un 3% cada una. En este proyecto, el volumen ocupado por las alternativas no es un factor relevante, ya que se cuenta con mucho espacio para la disposición de los equipos necesarios. Ahora, en la instalación de la alternativa, si bien cada una tendrá asociada una dificultad de instalación respectiva, esta no afecta a la operación de la embarcación.

Tabla 26: Evaluación de las alternativas según el criterio establecido.

Criterios de evaluación	Pesos %	Alternativas evaluadas									
		100% Baterías		Celda combustible		E-combustibles		Eléctrico-diésel		Diésel-H ₂	
		Valor	Peso de resultado	Valor	Peso de resultado	Valor	Peso de resultado	Valor	Peso de resultado	Valor	Peso de resultado
CO ₂	25,8	1	25,8	1	25,8	3	77,4	3	77,4	4	103,2
Peso	18,4	5	91,8	3	55,1	2	36,7	4	73,4	2	36,7
Volumen	3,2	1	3,2	4	12,8	3	9,6	5	16,0	3	9,6
CAPEX	18,4	5	91,8	4	73,4	1	18,4	3	55,1	3	55,1
OPEX	9,0	2	17,9	4	35,9	5	44,8	2	17,9	3	26,9
Acc. Tec.	6,1	2	12,2	4	24,3	5	30,4	2	12,2	2	12,2
Autonomía	9,0	4	35,9	2	17,9	3	26,9	2	17,9	2	17,9
Instalación	2,7	3	8,1	3	8,1	1	2,7	4	10,8	3	8,1
Ef. Op.	7,6	2	15,1	4	30,3	5	37,9	2	15,1	3	22,7
Total	1	301,8		283,6		284,8		295,9		292,4	

Donde la escala de evaluación es:

1- Mejor

- 3- Aceptable
- 5- Deficiente

Los resultados obtenidos de la **Tabla 27** indican que la combinación de celda combustible con baterías y motores eléctricos es la opción más adecuada para la implementación en la embarcación. Esta alternativa ha sido calificada con la ponderación más baja, lo que indica que las limitaciones evaluadas tienen un impacto menor en comparación con las demás alternativas consideradas.

La razón principal por la que se destaca esta alternativa es su mínimo impacto ambiental. Al no generar emisiones de CO₂, un criterio de gran relevancia en la evaluación, esta opción tiene una ventaja significativa en comparación con las alternativas no eléctricas. Además, presenta una ponderación intermedia en el peso de equipos en comparación con otras opciones, lo cual la hace apropiada para la adaptación. Sin embargo, el análisis realizado se basa en una evaluación en el largo plazo, ya que, actualmente, no hay mercado de hidrógeno verde, lo cual descascararía por completo esta alternativa.

Por otro lado, la ponderación asignada a los criterios de eficiencia operacional, autonomía y accesibilidad a la tecnología, son valores que podrán ir disminuyendo a medida que se desarrollen mayores avances. Lo mismo ocurre con el CAPEX y OPEX, los cuales son de las ponderaciones más altas asignadas, ya que se trata de una tecnología en desarrollo, por lo que, los equipos e insumos asociados, actualmente, presentan altos costos comparados con las alternativas ya establecidas en el mercado.

Capítulo 7

7. Adaptación de la alternativa seleccionada

En este capítulo se define la configuración que tendrá la alternativa seleccionada al adaptarla en la embarcación. Para esto se muestra la representación gráfica de la distribución de cada componente aprovechando los espacios disponibles en los cascos. Además, se detalla el aumento porcentual tanto en peso como en volumen al que se vería afectado la embarcación. Finalmente, se indica el flujo energético de la configuración y algunas recomendaciones en la disposición de los equipos utilizados.

7.1. Análisis de adaptación

En una embarcación, un aumento en el peso es mucho más crítico que un aumento en el volumen, debido a que el peso adicional puede afectar significativamente el rendimiento y la estabilidad de la embarcación. Un mayor peso puede reducir la velocidad, aumentar el consumo de combustible o la necesidad de potencia y afectar la maniobrabilidad. Además, el exceso de peso puede comprometer la seguridad, especialmente en condiciones climáticas adversas. Por lo tanto, es muy importante realizar un análisis del aumento del peso y las repercusiones asociadas.

Para el cálculo del aumento en el desplazamiento se hizo en referencia a la situación que se encontraba sometida la embarcación el día de la visita, donde la capacidad ocupada por los pasajeros era solo del 5% (15 pasajeros) de su máxima capacidad, 5 tripulantes de 9 posibles y, se asume que los tanques de combustibles estaban a un 50%, al igual que los otros consumibles como los tanques de agua. De esta forma y al asignar un peso promedio de 80 kg por pasajero y 90 kg por tripulante, se pudo estimar que el desplazamiento estaba alrededor de las 116 toneladas, lo cual es 20% menos que las 144 toneladas de desplazamiento a máxima capacidad.

Ahora, mediante una ingeniería inversa, en base al desplazamiento del catamarán calculado y haciendo uso del plano de curvas hidrostáticas, se interceptan la línea del desplazamiento con la curva de navegación en agua dulce (**Anexo 3**). Al proyectar al eje vertical el corte de la curva de agua dulce con el desplazamiento, se obtiene un calado de 1,380 m.

El aumento del desplazamiento provocado por la adaptación de los componentes asociados al sistema de celdas de combustible a hidrógeno se calcula mediante la suma del peso de cada componente de la nueva adaptación y la resta de los equipos que serán extraídos. Por lo tanto, al realizar esta operación matemática, se tiene que el aumento en el desplazamiento es de 1,6 toneladas, es decir, el nuevo desplazamiento alcanza las 167,6 toneladas. Este nuevo desplazamiento significa un aumento en el nivel del agua, en distancia vertical, por 1,2 cm. Sin embargo, para el análisis de la alternativa de celdas de combustible y baterías, este aumento en el desplazamiento se suma al calado de diseño,

ya que, el estudio de aumento en el desplazamiento se realiza cuando el catamarán está en su carga máxima.

Si bien los catamaranes se caracterizan por ser embarcaciones muy estables, son bastante susceptibles a un aumento en el peso, afectando su velocidad de navegación. De esta forma, se realiza una simulación mediante el software MaxSurf, el cual permite conocer cuál es la pérdida de velocidad que se genera al aumentar la superficie mojada de los cascos.

Para realizar la simulación, primeramente, se parte con la generación del casco con la ayuda de los planos de líneas y generales del catamarán. Posteriormente se genera el mallado, para dar mayor precisión a la simulación y establecen las condiciones de borde, como la línea del calado de diseño, la línea base y las perpendiculares de proa y popa. Con todos los datos anteriores ingresados, se genera análisis hidrostático para constatar que los resultados obtenidos son coherentes y buenas aproximaciones a la realidad. Una vez que se verifican los resultados del análisis hidrostático, se realiza la simulación en el módulo Hull Speed, el cual permite simular el catamarán mediante diferentes modelos de análisis. En este caso, se utilizó el modelo Holtrop, ya que, según Castañé, C. (2018) [74], es el método más conocido y extendido gracias a su relativa simplicidad y sirve para la predicción de la resistencia total y potencia propulsiva del catamarán.

Como resultado de la simulación realizada, el aumento en el calado de la embarcación por 1,2 cm debido al incremento del desplazamiento genera que la potencia aumente a 585 kW cuando el catamarán navega a 12 nudos. Por lo tanto, en la adaptación de la configuración de celdas de combustible y baterías, para que el catamarán mantenga su régimen operacional actual, se requiere un extra de potencia de 55 kW. Sin embargo, si se analiza en el otro sentido, donde se desea mantener los 530 kW de potencia requerido por el catamarán en su etapa de navegación, la velocidad disminuye a 11,5 nudos. Esto significa una duración más prolongada en la navegación, pasando de los 95 minutos a 105, es decir, un incremento de 10,5% (10 min) en comparación con la situación actual.

De esta forma, en base a la simulación realizada, la adaptación de la tecnología de celdas de combustible y baterías genera una disminución de 4,2% de la velocidad cuando se mantiene el nivel de potencia al que fue dimensionado la configuración. Y si, por otro lado, se desea mantener una velocidad de 12 nudos, el aumento en la potencia requerido es del 10,4%.

La siguiente figura, muestra la curva del comportamiento de los motores en base a las medida tomadas en la visita al catamarán. Estas a su vez, se comparan con las obtenidas por la simulación en MaxSurf en la adaptación del sistema de celdas de combustible y baterías.

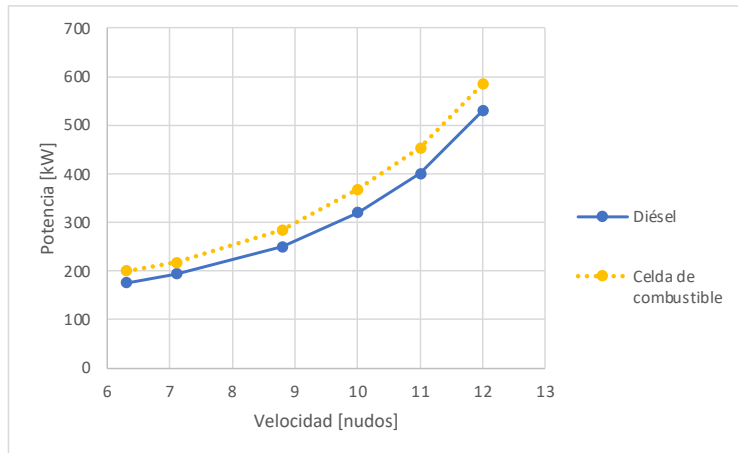


Figura 44: Curva de potencia vs velocidad del motor diésel actual vs la configuración de celdas de combustible y baterías.

7.2. Disposición de los componentes

Las embarcaciones de tipo catamarán se caracterizan por ser muy estables, esto se debe a su amplia manga que se logra gracias a su diseño de doble cascos paralelos. Además, gracias a su amplia manga, en los catamaranes se puede distribuir el peso a lo largo de una mayor área horizontal, lo cual permite reducir el centro de gravedad y contribuir con una mejor estabilidad.

De esta forma, en la adaptación de la alternativa de celdas de combustible y baterías, es necesario realizar un análisis en la distribución de los equipos, para no condicionar la estabilidad actual del catamarán. Por lo tanto, para evitar que se genere un asiento o encausamiento de la embarcación, primeramente, se determina la ubicación del centro de gravedad (CG) del catamarán, esto con la ayuda del plano de curvas hidrostáticas, el cual indica la ubicación del LCB¹⁰ (Posición del centro de boyantes). Según Guerrero, B. (2011) [75], el centro de boyantes se encuentra en la misma línea vertical que el centro de gravedad, tal como se muestra en la **figura 45**. Si bien se puede notar que el centro de gravedad y de boyantes no están a la misma altura, una de las características mencionadas del catamarán es su gran estabilidad, por lo que, una variación vertical en la posición del centro de boyantes, no sería perjudicial. Esto permite evaluar la ubicación de los componentes en base al centro de boyantes y no al centro de gravedad ya que, el plano de curvas hidrostáticas solo indica la posición del LCB.

¹⁰ Centro de boyantes: es el punto de aplicación de todas las fuerzas de flotación que actúan sobre un casco sumergido.

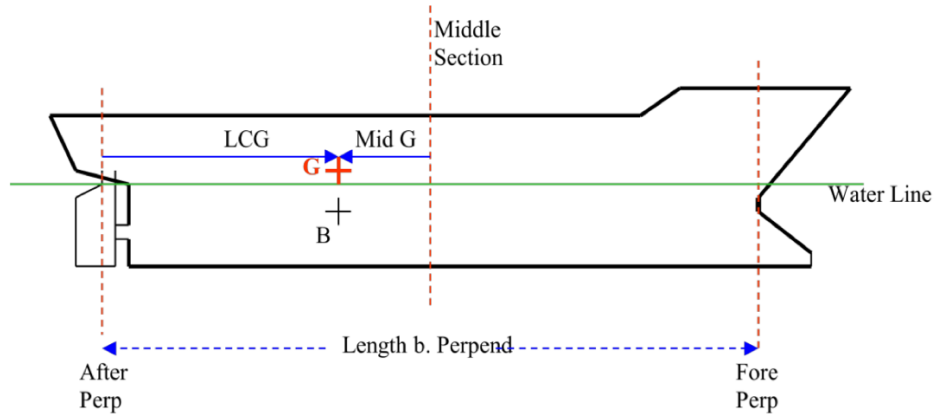
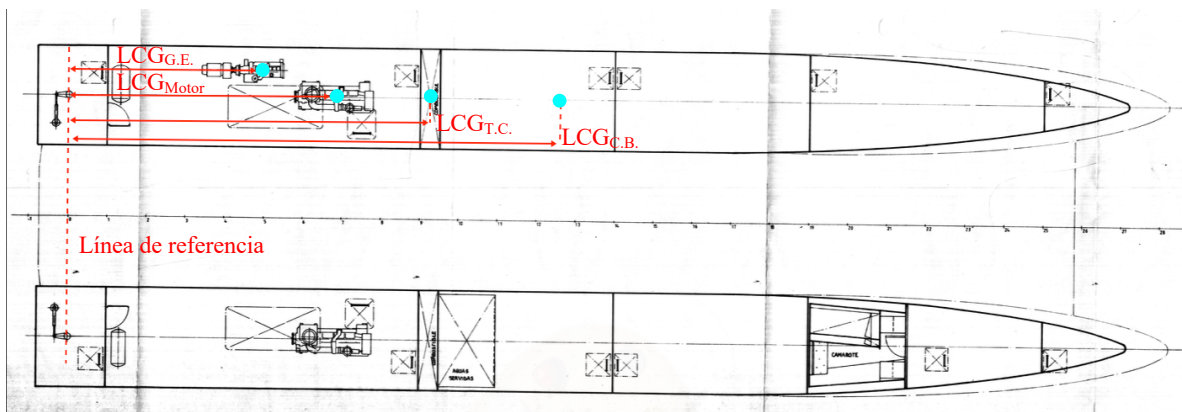


Figura 45: Ubicación del centro de gravedad (G) y boyantes (B) de una embarcación. [75]

Una vez conocida la ubicación del LCB del catamarán, se realiza un diagrama del cuerpo libre para calcular el momento que genera cada equipo tomando como referencia la perpendicular en popa y determinar la ubicación de los nuevos componentes manteniendo el centro de boyantes en la misma ubicación. A continuación, se muestra la vista de planta del catamarán indicando la posición de los equipos a extraer y el CB (centro de boyantes)



donde LCG representa la distancia entre el punto de referencia y el centro de gravedad de los componentes, por lo que, $LCG_{G.E.}$ es el del grupo electrógeno, LCG_{motor} , del motor, $LCG_{T.C.}$, del tanque de combustible y $LCG_{C.B.}$, del centro de boyantes.

Finalmente, al realizar el diagrama del cuerpo libre en el catamarán, se obtiene que para mantener el CB actual, la distribución de los componentes de la configuración a adaptar debe ser la siguiente:

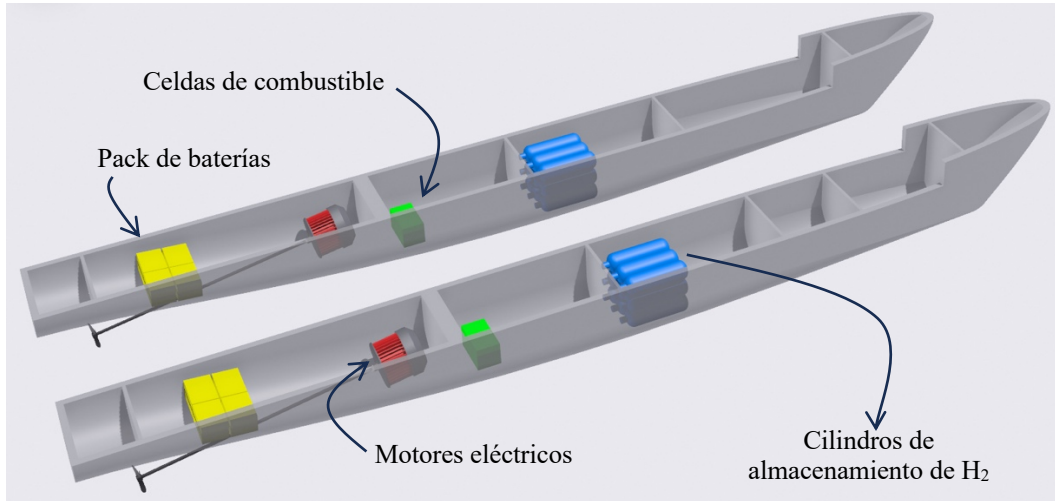


Figura 46: Representación gráfica de la disposición de los componentes en los cascos de la embarcación.

7.3. Aumento porcentual de peso y volumen

Previo al análisis del incremento en volumen y peso asociado a la adaptación de la alternativa seleccionada en comparación con la configuración actual, se presenta un gráfico resumen que permite visualizar y comparar los datos de peso y volumen asociado a la alternativa diésel actual con respecto a la alternativa de celdas de combustible.

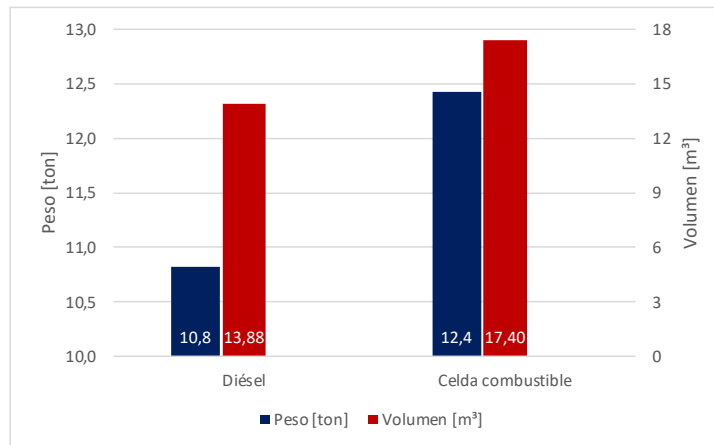


Figura 47: Comparativa de peso y volumen entre la configuración diésel actual vs la alternativa de celdas de combustible.

Ahora, al utilizar la ecuación 10 y 11, se determina el aumento porcentual en peso y volumen en la adaptación de la alternativa seleccionada.

$$W_{\%} = \frac{(W_{adaptación} - W_{diésel})}{W_{diésel}} * 100 \quad (10)$$

$$V_{\%} = \frac{(V_{adaptación} - V_{diésel})}{V_{diésel}} * 100 \quad (11)$$

Donde $W_{adaptación}$ es el peso total de la alternativa de celda combustible y $W_{diésel}$, el peso asociado a los componentes de la configuración diésel. Al resolver ambas ecuaciones, se tiene que el aumento porcentual en el peso ($W_{\%}$) es de 15% y en volumen ($V_{\%}$), 25%.

7.4. Flujo energético de la adaptación

El flujo energético en el sistema híbrido comienza con los tanques de almacenamiento de hidrógeno, que contienen el combustible para las celdas de combustible. Estas celdas transforman la energía química del hidrógeno en energía eléctrica, la cual es aprovechada por los motores eléctricos para generar energía cinética, impulsando así el sistema de propulsión. En cada motor eléctrico se le acopla la caja reductora actual, con la intención de reducir la velocidad de giro del motor eléctrico a las rpm necesarias en la hélice.

Simultáneamente, las baterías descargan energía para proporcionar la potencia requerida y mantener el régimen operacional actual. Durante momentos de baja demanda de potencia, como en el zarpe, las baterías suministran la energía necesaria para llevar a cabo estas maniobras. Además, el consumo eléctrico general, que incluye calefacción, iluminación, accionamiento de grúas y otros equipos eléctricos necesarios durante un turno operativo, es suplido por las baterías. La **Figura 47** representa la configuración final de los componentes principales de la adaptación y su flujo energético, representado por las flechas negras.

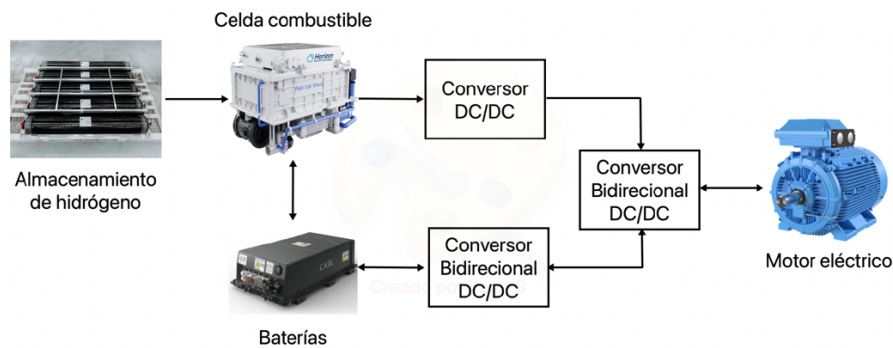


Figura 48: Configuración de la adaptación.

7.5. Recomendaciones de disposición de los componentes

A continuación, se dan recomendaciones para la disposición de los componentes dentro del espacio disponible en los cascos de la embarcación al retirar los componentes asociados al motor de combustión interna:

Motor

Se recomienda posicionar el motor eléctrico en la misma ubicación que el motor de combustión interna anterior, asegurando que el eje del nuevo motor se conecte a la caja

reductora actual, la cual está conectada al eje de propulsión ya presente en la embarcación. Esta opción es la más práctica, ya que implica el menor número de modificaciones, simplificando así el montaje y la operación posterior de la adaptación.

Celda de combustible

Se sugiere situar el sistema de celda de combustible, junto con los cilindros de almacenamiento, en los compartimientos 2 y 6 con el fin de aprovechar el espacio disponible, ya que los cilindros de almacenamiento ocupan la mayor parte del volumen en la configuración. Además, esto permite distribuir de mejor manera las cargas. De este modo, el acceso a los equipos será más sencillo cuando se necesiten realizar mantenimientos y recarga de los cilindros.

Baterías

Para las baterías, se aconseja colocarlas en los compartimientos 1 y 5, los cuales están situados entre la sala de máquinas y los compartimientos 2 y 6. Esto permitirá distribuir las cargas de manera más equitativa, lo que evita un posible asiento en la embarcación.

Capítulo 8

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones generales

A lo largo del desarrollo de este proyecto, se pudo evidenciar que, actualmente, existen varias tecnologías que permiten reducir las emisiones contaminantes generadas por el sector marino, que tal como comenta la IEA, al 2022, era el medio de transporte más contaminante solo por detrás del transporte terrestre. Si bien, algunas de estas cuentan con amplio desarrollo y aplicabilidad como las 100% baterías y, las híbridas electro-diésel y diésel-hidrógeno, alternativas como los e-combustibles y las celdas de combustible a hidrógeno, que cuentan con poca aplicabilidad y se encuentra todavía en vías de desarrollo, son opciones muy atractivas debido a los beneficios medioambientales y energéticos que ofrecen.

Por otro lado, se demuestra que la implementación de cualquiera de las alternativas evaluadas, sin importar cuál sea la más apropiada, conlleva beneficios medioambientales al permitir la reducción o eliminación de las emisiones de CO₂ generadas actualmente por las embarcaciones. En el caso de la configuración 100% baterías, las emisiones de CO₂ se eliminan por completo al ser una tecnología 100% limpia. Lo mismo ocurre con las celdas de combustible, donde su único desecho es vapor de agua y calor. Un caso interesante son los e-combustibles que, si bien son hidrocarburos que no aumentan los niveles de CO₂ en el ambiente, no eliminan por completo otros gases contaminantes como el NO_x y CO de su proceso de combustión. A diferencia de las 3 alternativas comentadas anteriormente, las configuraciones híbridas mantienen ciertos niveles de emisiones de CO₂, en el caso de la electro-diésel dependerá del consumo de combustible, pero se estima que pueda disminuir en un 20% las emisiones de CO₂ aproximadamente y, por el lado del diésel-hidrógeno, según las pruebas realizadas, se estima que las emisiones de CO₂ se reducen hasta un 9.6%, convirtiéndola, posiblemente, en la alternativa más contaminante evaluada.

En el análisis del catamarán estudiado, se puede concluir que, técnicamente, es posible implementar cada una de las alternativas evaluadas, ya que, estas cuenta con la capacidad de cubrir con la demanda energética a la cual está sometido el catamarán. Además, se encontraron comercialmente la mayoría de equipos requeridos asociados a cada alternativa, lo cual permite realizar el dimensionamiento de cada uno y dar paso a su adaptación.

En el caso de la adaptación de los equipos, todas las alternativas evaluadas, excepto los e-combustibles, cuentan con un mayor peso y volumen en comparación con la configuración actual. En el caso del peso, la alternativa de 100% baterías, se nota un aumento del 49% aproximadamente, 15% en la alternativa de celdas de combustible, 40%

en el híbrido electro-diésel y 1% en el híbrido diésel-hidrógeno. Por el lado del volumen, el mayor aumento se nota en la configuración híbrida electro-diésel con un 43%, seguido de la alternativa de celdas de combustible con un 25% y un 1% en el híbrido diésel-hidrógeno. En el caso de la configuración 100% baterías ocurre algo interesante y es que el volumen disminuye en un 14% a pesar de requerir 52 packs de baterías.

Este aumento de peso que se genera en el catamarán es importante, ya que provoca un aumento en el desplazamiento, lo cual se asocia a una pérdida de potencia y de velocidad de navegación. En el caso del volumen, el catamarán cuenta con suficiente espacio disponible en los cascos como para albergar a la alternativa que más volumen ocupa.

8.2. Conclusiones específicas

En la evaluación de las alternativas estudiadas según su aporte en la reducción de emisiones de CO₂ y las ventajas y desventajas señaladas, se pudo determinar, mediante una comparativa, que la tecnología de celda combustible a hidrógeno, complementadas con baterías, es la opción más apropiada para sustituir a la configuración diésel actual.

Los componentes seleccionados para llevar a cabo la adaptación son: 2 celdas de combustible tipo PEM de la empresa Horizon con 200kW de potencia nominal, un sistema de almacenamiento de hidrógeno a presión de 700 bar comprendido por 18 cilindros de Hexagon Purus capaz de almacenar 256 kg de H₂, 16 packs de baterías de litio de la empresa CATL que acumulan 528 kWh y dos motores eléctricos de potencia nominal de 299 kW de la empresa ABB.

En el sistema de control propuesto para la entrega de flujos energéticos, la celda combustible opera durante las etapas de navegación y arribo, donde entrega, de manera constante, 200 kW de potencia que, aproximadamente, son un 75% de la potencia máxima requerida en un turno operacional, esto con la finalidad de que no opere a carga máxima. Las baterías cuentan con 2 funciones en este sistema. La primera es cubrir el consumo eléctrico que presenta la embarcación, es decir, entregar energía a los sistemas de iluminación, gobierno, calefacción, etc. La segunda es complementar la entrega de energía de la celda combustible, cuando esta llega a su capacidad máxima y cubrir con el requerimiento energético asociado a la etapa de zarpe de la embarcación.

Para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de hidrógeno, se considera fundamental que este sea capaz de acumular el hidrógeno necesario para permitir el funcionamiento ininterrumpido del catamarán durante dos turnos operacionales. Por consiguiente, se tuvieron en cuenta las posibles ineficiencias asociadas a la transformación de energía proveniente del hidrógeno en energía eléctrica, la cual alimenta los motores eléctricos. Estos motores, a su vez, son responsables de convertir la energía eléctrica en energía de rotación para generar el impulso necesario mediante las hélices que propulsan la embarcación.

La disposición de los componentes en los cascos del catamarán se llevó a cabo con especial atención a la estabilidad de la embarcación, evitando un posible asiento y

encausamiento. Esta distribución se diseña considerando la necesidad de mantener el centro de gravedad en su ubicación actual y los espacios disponibles en los cascos para una mejor accesibilidad a los equipos principales. En consecuencia, se optó por distribuir los equipos entre los compartimientos disponibles y las salas de máquinas. Según el estudio realizado, el aumento de peso en el catamarán es del 15%, mientras que el aumento de volumen es del 25%.

Por otro lado, el aumento del peso, debido a los equipos utilizados en la adaptación, genera que el desplazamiento de la embarcación sea mayor, lo cual se traduce en una pérdida de velocidad de 4,2% o un aumento de 10,4% en la potencia si se desea mantener el régimen operacional actual.

Finalmente, el análisis realizado para la adaptación de un sistema híbrido entre celdas de combustible a hidrógeno y baterías, está pensado en el largo plazo, ya que, actualmente, no hay mercado de hidrógeno verde. Sin embargo, se estima que para el 2040 se empezará la comercialización del hidrógeno verde en el país, dando paso a la posibilidad de llevar a cabo este estudio.

8.3. Recomendaciones

Dentro del alcance de la investigación, se abordó exhaustivamente la información disponible sobre cada una de las alternativas y se evaluaron las posibles ventajas y desventajas asociadas a su adaptación en una embarcación. Sin embargo, es importante señalar que algunas de estas tecnologías se encuentran en etapas de desarrollo, lo que implica que muchos de los datos utilizados son estimaciones aproximadas de sus capacidades actuales. No obstante, las proyecciones estimadas sugieren resultados positivos y factibles para su aplicación en la reconversión de la flota marina actual y el desarrollo de nuevas embarcaciones.

Por otro lado, el cálculo de la demanda energética se realizó en base a la información brindada por los capitanes de la embarcación y mediante una vista realizada. Sin embargo, para obtener un resultado más cercano a la realidad, se recomienda realizar mediciones más específicas durante un turno operacional de la embarcación. Esto permite conocer de mejor manera el perfil operacional que ayudará a tomar decisiones más certeras a la hora de la selección de los componentes.

Dado que se trata de un catamarán turístico, la seguridad de los pasajeros y la tripulación es un factor crucial en la elección de la alternativa más adecuada. Por lo tanto, es imperativo cumplir con los estándares de seguridad mínimos para proporcionar un servicio libre de riesgos. En este sentido, es necesario realizar estudios detallados sobre las normas de seguridad tanto a nivel internacional como en Chile, asociadas a la operación de cada una de las alternativas evaluadas. Además, se debe alinear con los protocolos de navegación que regulan emisiones generadas, especialmente considerando la ubicación en un parque nacional.

Este trabajo se basó en variables de potencia y energía. Sin embargo, no se realizaron análisis detallados de variables eléctricas, como la tensión y la corriente. Uno de los pasos a seguir en este programa consiste en llevar a cabo investigaciones en el área de la electrónica de potencia. El objetivo es poder controlar y gestionar la energía de manera eficiente y con el menor deterioro de los componentes, lo que contribuiría a aumentar su vida útil. Asimismo, el acceso a la red eléctrica para cargar las baterías es de suma importancia, por lo que, es necesario llevar a cabo un estudio del nivel de tensión que disponible en las zonas involucradas.

Aunque en esta investigación se concluya que la tecnología de celdas de combustible, como fuente de energía para el impulso de la embarcación, es la más apropiada para ser implementada y que ofrece avances prometedores en su desarrollo, es crucial dar continuidad a investigaciones y trabajos similares, ya que, al ser una adaptación evaluada en el largo plazo, posiblemente surjan nuevas opciones o un mayor desarrollo en las alternativas evaluadas, que las convierta en mejor opción que las celdas de combustible.

Finalmente, en caso de que la adaptación se desee realizar en el corto plazo, se propone la alternativa híbrida electro-diésel como la más apropiada para ser adaptada a la embarcación, ya que cuenta un alto nivel de desarrollo y aplicación en el sector marino. Además, se puede diseñar el sistema de tal forma que, una vez se empiece a comercializar el hidrógeno verde, se extraigan los grupos electrógenos y demás equipos de la configuración y se instalen las celdas de combustible con su sistema de almacenamiento, evitando tener que realizar mayores cálculos.

9. Referencias Bibliográficas

1. Organización Marítima Internacional. (2019). *OMI 2020: el límite de azufre en el combustible entra en vigor el 1 de enero*. <https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/Paginas/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>
2. IEA (2022). Transport. IEA. Paris. <https://www.iea.org/reports/transport>. License: CC BY 4.0
3. Bravo, C., Buschell, I. (5 de junio de 2019). *El transporte marítimo contamina miles de veces más que el terrestre*. El diario. https://www.eldiario.es/opinion/tribuna-abierta/transporte-maritimo-contamina-miles-terrestre_129_1517031.html
4. IEA (2022), Global EV Data Explorer, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>
5. Gutiérrez, D. (14 de septiembre de 2022). *Momento histórico: Volvo empieza a fabricar en serie camiones eléctricos de 44 toneladas*. Híbridos y eléctricos. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/volvo-inicia-produccion-serie-camiones-electricos-44-toneladas/20220914123418062355.html>
6. Wu, P. Bucknall, R. (2016). *Marine propulsion using battery power*. Department of Mechanical Engineering, University College London, London WC1E 7JE, UK. Recuperado de: <https://conferences.ncl.ac.uk/media/sites/conferencewebsites/scc2016/1.4.2.pdf>
7. Pérez, A. (15 de enero de 2022). *El primer catamarán de lujo totalmente eléctrico y con paneles solares ya ha sido botado*. Híbridos y eléctricos. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/navegacion-sostenible/sunreef-80-eco-primer-catamaran-lujo-totalmente-electrico-paneles-solares-ha-sido-botado/20220114105652053378.html>
8. The Fjord. Our Boats. Norway. <https://www.thefjords.no/our-boats/>
9. ABB Group. (2016). Spectacular ferry runs silently on batteries along UNESCO listed Fjord. Recuperado de: <https://new.abb.com/marine/marine-references/vision-of-the-fjords>.
10. Ship Technology. (abril 2018). *Fjords receives all-electric ferry Future of the Fjords*. Recuperado de: <https://www.ship-technology.com/news/fjords-receives-electric-ferry-future-fjords/?cf-view>

11. Braid Maritime. (Agosto 2020). *Vessel review: Legacy of the Fjords – Second all-electric newbuild joins the Fjords’s sightseeing fleet*. Recuperado de: <https://www.bairdmaritime.com/work-boat-world/passenger-vessel-world/maritime-tourism/vessel-review-legacy-of-the-fjords-second-all-electric-newbuild-joins-the-fjords-sightseeing-fleet/>
12. Yriarte, D. (27 de octubre 2020). *Las Cataratas del Niágara estrenan ferris turísticos eléctricos propulsados por ABB. Híbridos y eléctricos*. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/navegacion-sostenible/cataratas-niagara-estrenan-ferris-turisticos-electricos-propulsados-abb/20201025223615039316.html>
13. Ministerio de Energía. (2022). *Estrategia nacional de electromovilidad*. <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/3773>
14. Ministerio de Energía. (2023). *Hoja de ruta para el avance de la electromovilidad en Chile: Acciones concretas al 2026 para masificar el uso de esta tecnología*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/hoja_de_ruta_para_el_avance_de_la_electromovilidad_en_chile_acciones_concretas_al_2026.pdf
15. Taborelli, M. (Julio 2023). *Chile cierra su primer semestre del 2023 con 158 nuevos cargadores públicos y 189 privados*. Portalmovilidad. <https://portalmovilidad.com/chile-cargadores-publicos-privados-2023/#:~:text=En%20el%20acumulado%20histórico%2C%20las,11%20MW%20de%20potencia%20instalada.>
16. IEA (2022), *Global Hydrogen Review 2022*, IEA, Paris. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>
17. Ruffo, G. (31 de marzo de 2022). *Nikola Releases Interesting Technical Details of the Tre FCEV*. Autoevolution. <https://www.autoevolution.com/news/nikola-releases-interesting-technical-details-of-the-tre-fcev-185304.html>
18. Tapia, M. (21 de mayo de 2022). *Punta Arenas: la capital del hidrógeno verde*. La Tercera. <https://www.latercera.com/pulso/noticia/punta-arenas-la-capital-del-hidrogeno-verde/S6KB6EMOXRF4ZN25IZDOSRLAOA/>
19. García, G. (3 de agosto de 2022). *27 camiones de pila de combustible de hidrógeno de Hyundai circularán por Alemania*. Híbridos y eléctricos. https://www.hibridosyelectricos.com/camiones/27-camiones-pila-combustible-hidrogeno-hyundai-alemania_61022_102.html

20. Energy Observer. *About us: Our Vessel.* <https://www.energy-observer.org/about/vessel#the-cea-liten-fuel-cell-system>
21. Energy Observer. *The Odyssey.* <https://www.energy-observer.org/odyssey>
22. All American Marine. (2023). *Vessels, Hydrogen Fuel Cell Passenger Ferry for SWITCH Maritime.* <https://www.allamericanmarine.com/vessels-gallery/sea-change-hydrogen/>
23. Ministerio de Energía & Gobierno de Chile. (Noviembre, 2020). *Estrategia nacional del hidrógeno verde.* https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
24. HIF Global. *Haru Oni.* <https://www.hifglobal.com/haru-oni>
25. Efuels Alliance. *FAQ.* <https://www.efuel-alliance.eu/faq>
26. Griefahn, M. (12 de septiembre de 2022). *4 reasons why I believe eFuels are the future.* Recuperado de: <https://www.linkedin.com/pulse/4-reasons-why-i-believe-efuels-future-monika-griefahn/?trackingId=Trh45VOgTviOXbb7FqD3fQ%3D%3D>
27. Lindstad, E., Lagemann, B., Riailand, A., Gamlem., G. and Valland, A. (diciembre 2021). *Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels.* Transportation Research Part D. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103075>
28. HIF Global. *About us.* <https://www.hifglobal.com/about-us>
29. HIF Global. *HIF USA.* <https://www.hifglobal.com/es/hif-usa>
30. HIF Global. *HIF Asia Pacific.* <https://www.hifglobal.com/es/hif-australia>
31. Infinium. *Our Story.* <https://www.infiniumco.com/ourstory>
32. Infinium. (20 de septiembre de 2022). *Infinium to provide ultra-low carbon electrofuels for use in Amazon trucking fleet starting in 2023.* PRNewswire. <https://www.prnewswire.com/news-releases/infinium-to-provide-ultra-low-carbon-electrofuels-for-use-in-amazon-trucking-fleet-starting-in-2023-301627741.html>
33. H2LAC. (28 de diciembre de 2022). *Chile produce sus primeros litros de combustible sintético en la región de Magallanes.* <https://h2lac.org/noticias/chile-produce-sus-primeros-litros-de-combustible-sintetico-en-la-region-de-magallanes/>

34. Coopal Power. Cummins NTA855-M400 especificaciones. <https://www.coopalpower.com/cummins-nta855-m400.html>
35. Twin Disc. (mayo 1980). *Service manual model MG-514C Marine transmission*. Recuperado de: <https://www.dieselpartsdirect.com/documents/twin-disc/mg-514-c-service-manual.pdf>
36. Luyere. Grupo generador J44 especificaciones. Recuperado de: <https://lureye.cl/producto/grupo-generador-j44-2/>
37. Cooplapower. Cummins Marine Diesel Generator. Descripción modelo CDMG50-A. Recuperado de: <https://www.coopalpower.com/cummins-marine-generator.html>
38. Ferrovial. *¿Qué es una batería?*. Recuperado de: <https://www.ferrovial.com/es/stem/bateria/#:~:text=¿Qué%20es%20una%20bater%C3%ADa%3F,por%20medio%20de%20fuentes%20el%C3%A9ctricas.>
39. RACE. (2 de septiembre de 2022). *¿Cómo son las baterías de los coches eléctricos?*. Recuperado de: <https://www.race.es/como-son-baterias-coches-electricos#:~:text=Las%20primeras%20bater%C3%ADas%20fueron%20las,son%20las%20de%20ión%20Litio.&text=ha%20sido%20la%20más%20utilizada,de%206%20y%2012%20voltios.&text=100%20km.>
40. Peña Ordoñez, C. (Mayo 2011). *Estudio de baterías para vehículos eléctricos*. Tesis de titulación universitaria, Universidad Carlos III de Madrid. Repositorio institucional de la Universidad Carlos III de Madrid: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/11805>
41. Plaza, D. (Mayo 2022). *Estos son los tipos de motores para coches eléctricos que encontrarás en el mercado*. Motores.es. <https://www.motor.es/coches-electricos/tipos-motores-coches-electricos-202287375.html>
42. Ministerio de Energía. *Motores para vehículos eléctricos*. Plataforma de electromovilidad. Recuperado de: <https://energia.gob.cl/electromovilidad/recursos-e-informacion-tecnica/motores>
43. Tomar, U. (17 de mayo de 2023). *Understanding the use different types of motors in EV: AC vs. DC*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-use-different-types-motors-electric-vehicles-tomar/#:~:text=While%20AC%20motors%20offer%20higher,suit%20different%20electric%20vehicle%20needs.>

44. Plaza, D. (2022). *¿Qué es el inversor de un coche eléctrico y por qué es tan importante?*. Motor.es. <https://www.motor.es/que-es/inversor-coche-electrico>.
45. Palacio Garcés, V. (2014). *Convertidores DC-DC para aprovechamiento de frenado regenerativo en un sistema de tracción alimentados con corriente directa*. Tesis de titulación universitaria, Universidad Pontificia Bolivariana. Repositorio Institucional de la Universidad Pontificia Bolivariana. https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1904/Tesis_Victor_Alfonso_Palacio_Garces.pdf?sequence=1#:~:text=Existen%20tres%20topolog%C3%AAs%20básicas%20o,reductor%2D%20elevador%20Buck%2DBoost.
46. Ortúzar Dworsky, M. (2002). *Diseño y construcción de conversor DC-DC para control de ultra-capacitores en vehículo eléctrico*. Tesis de titulación universitaria, Pontificia Universidad Católica de Chile. Repositorio Institucional Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://silo.tips/download/diseo-y-construccion-de-conversor-dc-dc-para-control-de-ultracapacitores-en-vehi>
47. Acuña Garrido, F. y Ventura Muñoz, Y. (abril 2001). *Celda combustible: una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación de potencia y su impacto en el desarrollo sostenible de Colombia en el siglo xxi*. Revista Científica Ingeniería y Desarrollo Universidad del Norte.
48. Alvarado Flores, J., Ávalos Rodríguez, M. y Rutiaga Quiñones, J. (julio 2011). *Celdas de combustible como elementos potenciadores para un desarrollo energético sustentable*. Repositorio Institucional de UNAM. <https://ru.iiec.unam.mx/4707/1/1-052-Alvarado-Avalos-Rutiaga.pdf>
49. Ministerio de Energía. *Hidrógeno verde: Tecnologías de un FCEV*. Plataforma de electromovilidad. Recuperado de: <https://energia.gob.cl/electromovilidad/hidrogeno-verde/tecnologias-en-un-fcev>
50. Energy, U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable, «U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, » En línea. Disponible: <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.
51. Gómez, J.A.; Santos, D.M.F. (agosto 2023). *The status of On-Board hydrogen storage fuel cell electric vehicles*. Designs**2023**,7,97. <https://doi.org/10.3390/designs7040097>.

52. Pérez, L. (febrero 2022). *Métodos de almacenamiento del hidrógeno*. SynerHy. Artículo Técnico. Disponible: <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>
53. Galán, G., Martín, M. y Grossmann, I. (febrero 2023). *Systematic comparison of natural an engineering methods of capturing CO2 from the air and its utilization*. *Sustainable Production and Consumption* 37 (2023) 78–95. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.02.011>.
54. IEA (International Energy Agency). (s.f). Direct air capture. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture#tracking>
55. Soto Alegre, O. (2020). *Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada*. Tesis de titulación universitaria, Universidad de Chile. Repositorio Academico Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/176192/Análisis-conceptual-constructivo-y-experimental-de-un-electrolizador-con-diferentes-electrodos.pdf>
56. Efuel-today. (marzo 2023). *The production process of e-fuels*. <https://efuel-today.com/en/production-process-of-e-fuels/>.
57. Roa Villalón, A. (2022). *Proceso de captura y almacenamiento de CO₂*. Tesis de titulación universitaria, Universidad Técnica Federico Santa María. Repositorio Digital USM. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/55161/205506276UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
58. Araujo-Ferrer, S.C., De Almeida, A., Zabala, A. y Granados, A. (febrero 2013). *Uso de catalizadores en los procesos Fischer-Tropsch*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 12, No.2 (2013) 257-269. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v12n2/v12n2a6.pdf>
59. Carvalho, F., Muller-Casseres, E., Poggio, M. Nogueira, T., Fonte, C., Ken Wei, H., Portugal-Pereira, J., Rochedo, P., Szklo, A. y Schaeffer, R. (2021). *Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil*. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129385>
60. Berkehal Inal, O., Charpentier, J. y Deniz, C. (2021). *Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111965>.

61. DynaCERT. How it Works. [How HydraGEN™ Technology Works Brochure](#)
62. CATL. *Entrega con éxito del crucero híbrido diésel-eléctrico “DA WAN QUYIHAO” equipado con el sistema de alimentación por baterías CATL.* Aplicación híbrida en cruceros de lujo. Recuperado de: <https://www.catl.com/es/othercase/489.html>.
63. CATL. Comercial Applications Solution. https://www.catl.com/es/uploads/1/file/public/202209/20220916214141_gr6eyva66j.pdf.
64. Corvus. Corvus Dolphin Energy NxtGen ESS. Technical Specification. <https://corvusenergy.com/products/energy-storage-solutions/corvus-dolphin-energy/>
65. Horizon. VL III series Liquid-Cooled System Fuel Cell Specification. <https://www.horizonfuelcell.com/>副本-副本-v1-ii
66. Ballard. Fuel Cell Power for Heavy Duty Applications FCmove-XD. https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcmove-xd.pdf?sfvrsn=6510de80_4.
67. Hexagon Purus. *Hydrogen type 4 cylinder information.* Catálogo de cilindros de almacenamiento. Recuperado de: https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/hexagonpurus-website/HydrogenType4_Datasheet_onlytables.pdf.
68. DNV. (2023). *Maritime Forecast to 2050.* Energy Transition Outlook 2023, Pag 12. Recuperado de: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2023/download-the-report.html>
69. Alibaba. *350KW with Cummins K19-DM 3 phase 50HZ/60HZ 400V Marine Diesel generator 350 KW.* Alibaba. Recuperado de: https://www.alibaba.com/product-detail/350KW-With-Cummins-K19-DM-3_11000007773986.html?spm=a2700.7724857.0.0.113d2232UEBTnI&s=p
70. IEA. (2023). *The role of E-fuels in decarbonizing transport.* IEA. Page 22-23. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-e-fuels-in-decarbonising-transport>
71. DICTUC. (diciembre 2022). *Litio producido en Chile posee la menor huella de carbono en el mundo.* Recuperado de: <https://www.dictuc.cl/medios/litio-producido-en-chile-posee-la-menor-huella-de-carbono-del-mundo/>

72. IEA (2023), Global Hydrogen Review 2023, IEA, Paris. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
73. IRENA (2021). *Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf?la=en&hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6
74. Castañé, C. (2018). *Estudio y diseño de una hélice para el yate Viudes 45*. Tesis de grado universitario, Facultat de Nàutica de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/119369/136766_TFG.pdf
75. Guerrero, B. (2011). *Equilibrio de los cuerpos flotantes*. Humboldt Marine Training. Recuperado de: https://wiki-ead.b-cdn.net/images/d/d1/02_Equilibrio.pdf

10. Anexos

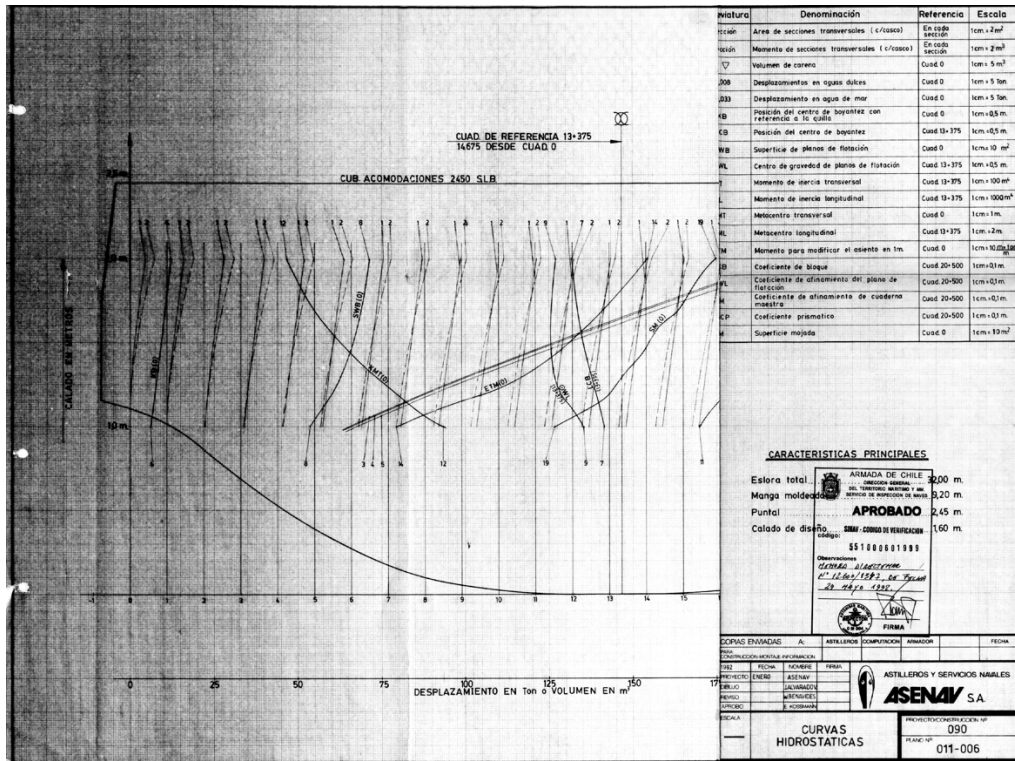
Componentes	Peso [kg]	Proporción de peso	Volumen [m ³]	Proporción de volumen
Motor diésel	2.860	26%	2,55	18%
Tanque de combustible	5.160 ¹¹	48%	6	43%
Generadores	1.752	16%	4,83	35%
Caja reductora	1.050	10%	0,5	4%
Total diésel	10.822		13,88	
Baterías	11.450	71%	9	76%
Caja reductora	1.050	7%	0,5	4%
Motores eléctricos	3.640	23%	2,4	20%
Total BEV	16.140		11,90	
Celda combustible	520	4%	1,4	8%
Almacenamiento de H ₂	3.694	30%	10,5	60%
Baterías	3.523	28%	2,6	15%
Caja reductora	1.050	8%	0,5	3%
Motores eléctricos	3.640	29%	2,4	14%
Total eléctrico FC	12.427		17,40	
Grupo electrógeno	4.200	28%	10,1	51%
Baterías	1.100	7%	0,85	4%
Tanque de combustible	5.160	34%	6	30%
Caja reductora	1.050	8%	0,5	3%
Motores eléctricos	3.640	24%	2,4	12%
Total electro-diésel	15.150		19,85	
Motor diésel	2.860	26%	2,55	18%
Tanque de combustible	5.160	47%	6	43%
HydraGEN	71	1%	0,15	1%
Caja reductora	1.050	10%	0,5	4%
Generador	1.752	16%	4,83	34%
Total diésel-H₂	10.893		14,03	

Anexo 1: Resumen de peso y volumen de las alternativas vs la configuración diésel actual.

Componentes	Peso kg	Proporción de peso	Volumen m ³	Proporción de volumen
Motor diésel	2.860	26%	2,55	18%
Tanque de combustible	5.160 ¹¹	48%	6	43%
Generadores	1.752	16%	4,83	35%
Caja reductora	1.050	10%	0,5	4%
Total diésel	10.822		13,88	
Celda combustible	519	4%	1,4	8%
Almacenamiento de H ₂	3.694	30%	10,5	60%
Baterías	3.523	28%	2,6	15%
Caja reductora	1.050	8%	0,5	3%
Motores eléctricos	3.640	29%	2,4	14%
Total eléctrico FC	12.426		17,40	

Anexo 2: Comparación de componentes diésel vs celdas de combustible a hidrógeno.

¹¹ Peso del tanque considerando que tiene los 6 m³ ocupados en su totalidad y que el diésel cuenta con una densidad de 860 kg/m³.



Anexo 3: Curvas hidrostáticas del catamarán estudiado.