

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA  
MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO – CHILE**



**“Evaluación Tecno-Económica de la Operación Dual  
Diésel-Hidrógeno en Motores Marinos: Viabilidad y  
Análisis de Conversión”**

**AUTOR: Cristóbal Andrés Tureo Schäfer**

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

**PROFESOR GUÍA: Dr. Ing. Roberto Leiva-Illanes**

**PROFESOR CORREFERENTE: Dr. Ing. Germán Amador Díaz.**

**Octubre – 2025**



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

Título del trabajo: "EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA DE LA OPERACIÓN DUAL DIÉSEL-HIDRÓGENO EN MOTORES MARINOS: VIABILIDAD Y ANÁLISIS DE CONVERSIÓN"

Nombre del candidato(a): CRISTÓBAL ANDRÉS TUREO SCHÄFER

Carrera / Grado: INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Campus: SANTIAGO SAN JOAQUÍN Departamento: INGENIERÍA MECÁNICA

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, ROBERTO LEIVA ILLANES, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

---

---

---

### 4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 28/10/2025

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/10/2025

Firma:

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mis padres, quienes me apoyaron desde el inicio de mi carrera y fueron el principal apoyo emocional que tuve en todo momento. A mi padre por estar siempre presente cuando lo necesité y siempre confió en mi incluso cuando yo mismo dudaba de mis capacidades y habilidades, siendo mi principal modelo a seguir a través de su tremendo ejemplo de vida, y que con esfuerzo, dedicación y resiliencia todo se puede lograr. A mi madre quien a pesar de la distancia siempre me manda ánimos y me instó a seguir adelante, aprovechando cada oportunidad que se me presente con entusiasmo y sin miedo al fracaso, ya que en la vida uno siempre se arrepiente más de las cosas que no hace que las que hizo.

A mi Abuelo Otto y mi padrastro Mauricio, ejemplos de ingenieros quienes me propusieron la idea inicial de desarrollar un proyecto relacionado con el Hidrógeno y lograron despertar mi interés en esta tecnología, al igual que a mis colegas de práctica que me instaron a adaptar un sistema a una embarcación, naciendo así la idea del proyecto final.

A mis profesores, en particular a todos aquellos que se enfocaron más en incentivar el aprendizaje y despertar el interés científico en los alumnos más que en una nota. Logrando mostrarme lo encantador que puede ser cada una de las áreas de la ingeniería mecánica y la belleza del mundo científico. En especial agradecer a los profesores Roberto Leiva y Germán Amador, por su orientación a lo largo del desarrollo del proyecto revisando los procedimientos, compartiendo sus observaciones y tener a disposición todos los equipos que fueron necesarios durante la experimentación. También al profesor Daniel Galleguillos y a todo el personal de la universidad que de alguna u otra forma participó en el trabajo.

A Catalina, mi polola, y toda su familia por acogerme como uno más, gracias por la paciencia, el apoyo y el cariño entregado durante todo este período.

A mis amigos, con quienes compartimos tantas alegrías, tristezas, desvelos y celebraciones. por todos los momentos vividos, por los que egresaron y egresarán.

*“Cada cierto tiempo, cuando mi mente está en el peor estado de ánimo posible  
pienso...*

*No soy nada más que alguien mediocre... pero... si soy mediocre...*

*¿Realmente tengo tiempo para quedarme mirando al suelo?”*

*“Lo más patético no es perder, ¡Sino, que te asuste intentarlo!”*

## **DEDICATORIA**

En memoria de Cristián Vera Valle  
Compañero Ing. Civil Eléctrico, Amigo y Colega de práctica Q.E.P.D.

## RESUMEN

El presente informe evalúa el uso de gas Hidrógeno como aditivo en un motor diésel marino de una lancha de transporte liviano, con el objetivo de determinar si la conversión a combustible dual diésel-hidrógeno es factible técnicamente en materia de dimensiones, peso, autonomía y eficiencia, y estimar los posibles costos asociados que implicaría su realización con los potenciales beneficios que podría tener.

Para ello se realizaron ensayos en laboratorio en condiciones estacionarias en banco de freno dinamométrico, siguiendo la metodología establecida por la norma ISO 8178-4 ciclos E2 a velocidad constante de 2400 RPM, sometiendo el motor a 4 ciclos de carga (100%, 75%, 50% y 25%), con 3 diferentes niveles de inyección directa de hidrógeno (10%, 20% y 30%) en el colector de admisión de aire del motor, dónde se midieron parámetros clave como la potencia, consumo, eficiencia y emisiones de gases contaminantes como CO<sub>2</sub>, CO, HC y NO<sub>x</sub>. Adicionalmente, se realizó una evaluación económica calculando el costo nivelado de la energía mecánica y realizando un flujo de caja para calcular el VAN y TIR, a partir de registros bibliográficos siguiendo la proyección de los precios del diésel e hidrógeno para el año 2030, que permita evaluar los potenciales ahorros que implique realizar la conversión en materia del costo asociado al consumo de combustible.

Los resultados de los ensayos en laboratorio evidencian que la adición de hidrógeno puede disminuir hasta un 22% el consumo específico de combustible para el caso de máxima carga (100%) y el máximo porcentaje de sustitución (30%) y un 31% las emisiones de CO<sub>2</sub>, manteniendo temperaturas de combustión razonables que no afectan a la operación del motor ni a los componentes internos, por lo que sería técnicamente viable siempre y cuando la embarcación cuente con espacio suficiente para los tanques de almacenamiento. Sin embargo, también se presentó un aumento en las emisiones de NO<sub>x</sub> de hasta un 11% a cargas altas y mayor sustitución de H<sub>2</sub>, y una leve disminución en la eficiencia térmica de la combustión de hasta un 11% para baja carga.

Mientras que, los resultados del análisis económico proyectan que realizar la conversión no sería rentable económicamente hasta, por lo menos, 2 años más, si es que se cumplen las proyecciones en los precios de los combustibles, teniendo como punto de quiebre cuando su relación es 1 a 2 (es decir, precio del diésel de 1 USD/kg y el del hidrógeno de 2 USD/kg). Siendo su rentabilidad directamente dependiente del consumo total anual de la lancha, costos de inversión inicial y costos de operación.

Por último, se realizó un análisis de sensibilidad que evidencia que la mayor susceptibilidad de las rentabilidades del proyecto corresponde al aumento del costo de combustible Diésel, siendo más rentable en todos los casos a medida que este aumenta.

# ABSTRACT

This research evaluates the use of Hydrogen gas as an additive in a marine diesel engine of a light transport boat. The objective is to determine whether conversion to a dual diesel-hydrogen fuel system is technically feasible in terms of dimensions, weight, range, and efficiency, and to estimate the potential associated costs of implementation against the potential benefits it could yield.

To this end, laboratory tests were conducted under stationary conditions on a dynamometer brake bench, following the methodology established by the ISO 8178-4 standard, E2 cycles, at a constant speed of 2400 RPM. The engine was subjected to 4 load cycles (100%, 75%, 50%, and 25%) with 3 different levels of direct hydrogen injection (10%, 20%, and 30%) into the engine's air intake manifold. Key parameters such as power, fuel consumption, efficiency, and emissions of polluting gases like CO<sub>2</sub>, CO, HC, and NO<sub>x</sub> were measured. Additionally, an economic evaluation was performed by calculating the leveled cost of mechanical energy and conducting a cash flow analysis to determine the Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR). This was based on bibliographic records and the projected prices of diesel and hydrogen for the year 2030, allowing for an assessment of the potential savings in fuel consumption costs associated with the conversion.

The laboratory test results demonstrate that hydrogen addition can reduce specific fuel consumption by up to 22% for the case of maximum load (100%) and maximum substitution percentage (30%), and reduce CO<sub>2</sub> emissions by up to 31%, while maintaining reasonable combustion temperatures that do not affect engine operation or internal components. Therefore, the conversion would be technically viable provided the vessel has sufficient space for the storage tanks. However, an increase in NO<sub>x</sub> emissions of up to 11% was also observed at high loads and higher H<sub>2</sub> substitution, along with a slight decrease in thermal efficiency of up to 4% at low load.

Meanwhile, the results of the economic analysis project that performing the conversion would not be economically profitable for at least another 2 years, assuming fuel price projections hold true. The break-even point occurs when their price ratio is 1 to 2 (i.e., a diesel price of 1 USD/kg and a hydrogen price of 2 USD/kg). Its profitability is directly dependent on the boat's total annual fuel consumption, initial investment costs, and operating costs.

Finally, a sensitivity analysis was conducted, revealing that project profitability is most susceptible to an increase in Diesel fuel cost, becoming more profitable in all cases as the price of diesel rises.

# **GLOSARIO**

## **Abreviaturas**

MCI: Motor de Combustión interna

CI: Compression Ignition (Ignición por compresión)

SI: Spark Ignition (Ignición por chispa)

GNC: Gas natural comprimido

GH2C: Gas hidrógeno comprimido

GNL: Gas natural licuado

GEI: Gases de efecto invernadero

RPM: Revoluciones por minuto

LHV: Low Heat Value (Poder Calorífico Inferior)

LCOME: Levelized Cost of Mechanical Energy (Costo nivelado de energía mecánica)

SFC: Specific Fuel Consumption (Consumo específico de combustible)

DIRECTEMAR: Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante

USD: Dólar Estadounidense

CLP: Peso Chileno

TIR: Tasa Interna de Retorno

VAN: Valor Actual Neto

## **Nomenclatura de Fórmulas Químicas**

CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono

CO: Monóxido de carbono

O<sub>2</sub>: Oxígeno

NO<sub>x</sub>: Óxidos de Nitrógeno

HHO: Oxi-Hidrógeno

H<sub>2</sub>: Hidrógeno

H<sub>2</sub>V: Hidrógeno Verde

NH<sub>3</sub>: Amoníaco

HC: Hidrocarburos no Combustionados

MP: Material Particulado

# ÍNDICE

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	III
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VII
GLOSARIO .....	VIII
ÍNDICE .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIII
<b>1. Introducción y Objetivos .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto.....	1
1.1.1 Elección del Combustible.....	3
1.2 Objetivos General y Específicos.....	5
<b>2. Marco teórico .....</b>	<b>7</b>
2.1 Propiedades de los Combustibles .....	7
2.1.1 Hidrógeno.....	7
2.1.2 Diésel.....	8
2.2 Parámetros Característicos a Medir en un Ensayo .....	9
2.2.1 Potencia al Freno.....	10
2.2.2 Consumo Específico de Combustible (SFC).....	10
2.2.3 Ahorro Efectivo de Diesel .....	10
2.2.4 Energía Entregada por el Hidrógeno.....	11
2.2.5 Eficiencia Térmica de la Combustión .....	12
2.3 Indicadores Económicos.....	12
2.3.1 Ahorro Monetario de Combustible.....	12
2.3.2 Costo Nivelado de Energía Mecánica (LCOME).....	13
2.3.3 VAN y TIR .....	13
2.4 Marco Legal del uso de Hidrógeno y Ciclos de Navegación.....	14

<b>3. Estado del Arte .....</b>	<b>19</b>
<b>4. Metodología .....</b>	<b>24</b>
4.1 Configuración del Banco de Pruebas e Instrumentación .....	24
4.1.1 Motor Para Pruebas.....	24
4.1.2 Freno Dinamométrico.....	26
4.1.3 Instrumentación .....	29
4.1.4 Sistema de inyección de hidrógeno .....	30
4.2 Procedimiento Experimental .....	31
4.2.1 Operación Línea Base (100% Diésel).....	31
4.2.2 Detención de Operación Línea Base (100% Diésel).....	32
4.2.3 Operación con Inyección de Hidrógeno .....	32
4.2.4 Detención de Operación con Inyección de Hidrógeno .....	33
4.2.5 Parada de Emergencia.....	34
4.2.6 ISO 8178-4 Ciclos Tipo E2 .....	34
4.2.7 Adquisición de Datos.....	35
4.3 Consideraciones Adicionales .....	39
4.3.1 Condiciones de Borde de la Embarcación de Referencia.....	39
4.3.2 Medidas de Seguridad de la Instalación a Bordo.....	41
<b>5. Resultados y Análisis .....</b>	<b>45</b>
5.1 Resultados de Ensayos en Laboratorio .....	45
5.1.1 Análisis de Resultados de Ensayos en Laboratorio .....	51
5.2 Evaluación Económica .....	53
5.2.1 LCOME Para los 3 Casos.....	55
5.2.2 Resultados Flujo de Caja .....	55
5.2.1 Análisis de Resultados de Evaluación Económica .....	56
5.3 Análisis de Sensibilidad de los Resultados .....	58
<b>6. Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>63</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>68</b>

**Anexos ..... 73**

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa NH <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , GNC, HHO y Diésel .....	3
Tabla 2. Propiedades del Hidrógeno.....	7
Tabla 3. Propiedades del Diésel .....	9
Tabla 4. Especificaciones Perkins Prima M80T .....	24
Tabla 5. Especificaciones Freno Dinamométrico .....	26
Tabla 6. Ciclos de carga E2 establecidos por la ISO 8178-4.....	35
Tabla 7. Características, Riesgos y Control Relacionados al Hidrógeno .....	42
Tabla 8. Mediciones Consumo Específico de Combustible.....	45
Tabla 9. Mediciones de Ahorro efectivo de Diésel.....	45
Tabla 10. Mediciones CO <sub>2</sub> .....	46
Tabla 11. Mediciones NO <sub>x</sub> .....	46
Tabla 12. Mediciones O <sub>2</sub> .....	47
Tabla 13. Mediciones Opacidad.....	47
Tabla 14. Mediciones de Temperaturas .....	48
Tabla 15. Capacidades Lancha de Referencia .....	49
Tabla 16. Especificaciones Tanques de H <sub>2</sub> .....	49
Tabla 17. Mediciones de Eficiencia Energética .....	51
Tabla 18. Ahorro Monetario Para Cada Caso .....	54
Tabla 19. CAPEX y OPEX del proyecto .....	54
Tabla 20. Comparación LCOME de los sistemas de H <sub>2</sub> .....	55
Tabla 21. Resumen Flujo de Caja del Proyecto .....	56
Tabla 22. Sensibilidad Consumo de Combustible .....	58
Tabla 23. Sensibilidad Precio de Combustible Diésel.....	59
Tabla 24. Sensibilidad Precio de Combustible H <sub>2</sub> .....	60
Tabla 25. Sensibilidad CAPEX.....	61
Tabla 26. Sensibilidad OPEX .....	61
Tabla 27. Datos Medidos Para la Operación Línea Base .....	73
Tabla 28. Datos Medidos Para la Operación con 10% de Adición de Hidrógeno .....	74
Tabla 29. Datos Medidos Para la Operación con 20% de Adición de Hidrógeno .....	74
Tabla 30. Datos Medidos Para la Operación con 30% de Adición de Hidrógeno .....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1. Gráfico de Proyección del Costo Nivelado de H<sub>2</sub>V en Chile (USD/kg).....</b>	<b>2</b>
<b>Figura 2. Gráfico de Evolución del Precio del Diésel en Chile (CLP/L) .....</b>	<b>3</b>
<b>Figura 3. Mapa de Proyectos de Hidrógeno en Chile .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 4. Costo de Producción del Hidrógeno Verde GNL Quintero .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 5. Motor Perkins Prisma M80T .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 6. Motor Instalado con Freno Dinamométrico .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 7. Configuración Experimental .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 8. Especificaciones Beneteau Antares 6.80.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 9. Imagen de Referencia Cilindro FORVIA .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 10. Planos de lancha con estanques de H<sub>2</sub> instalados.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 11. Gráfico proporción H<sub>2</sub>-Aire v/s %H<sub>2</sub> y Knock Index v/s % H<sub>2</sub> .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 12. Flujo de Caja 30% de Sustitución.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 13. Flujo de Caja 20% de Sustitución.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 14. Flujo de Caja 10% de Sustitución.....</b>	<b>77</b>

---

# 1. Introducción y Objetivos

---

## 1.1 Contexto

El uso de hidrógeno y otros aditivos en motores diésel ha capturado la atención de la industria y la investigación en los últimos años debido a su potencial para mejorar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes. En el contexto actual, los motores diésel enfrentan desafíos significativos por su alto nivel de emisiones de gases de efecto invernadero y las regulaciones ambientales cada vez más estrictas, lo que han impulsado la búsqueda de tecnologías y combustibles alternativos que permitan una operación más limpia, lográndose avances considerables en industrias del sector de transporte, automovilístico, energético y productivo. Sin embargo, su utilización en el sector marítimo no ha presentado avances considerables en el último año, por lo que el presente estudio busca aportar al desarrollo de estas tecnologías en dicho sector.

En la industria existen 2 tipos de motores de combustión interna (MCI): los de encendido por chispa (SI) e ignición por compresión (CI), los motores tipo SI utilizan una bujía para iniciar la combustión de la gasolina introducida en la cámara de combustión. Por otro lado, los motores de CI funcionan realizando la autoignición del diésel a partir de una alta relación de compresión en la cámara de combustión. Las principales ventajas de los motores CI por sobre los SI son su mayor eficiencia térmica, mayor torque y mayor potencia para un mismo desplazamiento, lo que lo vuelve ideal en operaciones de alta carga como los servicios marítimos. Sin embargo, estos motores emiten una mayor cantidad de gases NOx y MP en comparación a los motores de SI debido a la naturaleza de la combustión. Una forma de reducir la emisión de gases es a partir del uso de combustibles alternativos.

En este escenario, el hidrógeno verde y sus derivados se han propuesto como una solución viable. Su incorporación en pequeñas cantidades en los motores de combustión interna de encendido por compresión de ciclo diésel puede mejorar la combustión al aumentar la reactividad de la mezcla aire-combustible, lo que genera una combustión más completa y reduce las emisiones nocivas. Además, el hidrógeno tiene la ventaja de no generar emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante su combustión, lo que contribuye a mitigar el impacto ambiental de estos motores.

Esto tiene relevancia tanto en el impacto ambiental por la reducción de emisiones de gases y partículas contaminantes, cómo también desde la perspectiva económica por el ahorro correspondiente a la disminución de consumo de combustible diésel y la reciente tendencia a la baja del precio del hidrógeno a nivel país como se muestra en la Fig.1. donde la Agencia Internacional de Energía (IEA) [1] proyectó el costo nivelado del hidrógeno para las 3 zonas de Chile (Centro, Norte y Magallanes) y su potencial disminución gracias a los proyectos en desarrollo según la estrategia nacional del hidrógeno verde [2]:

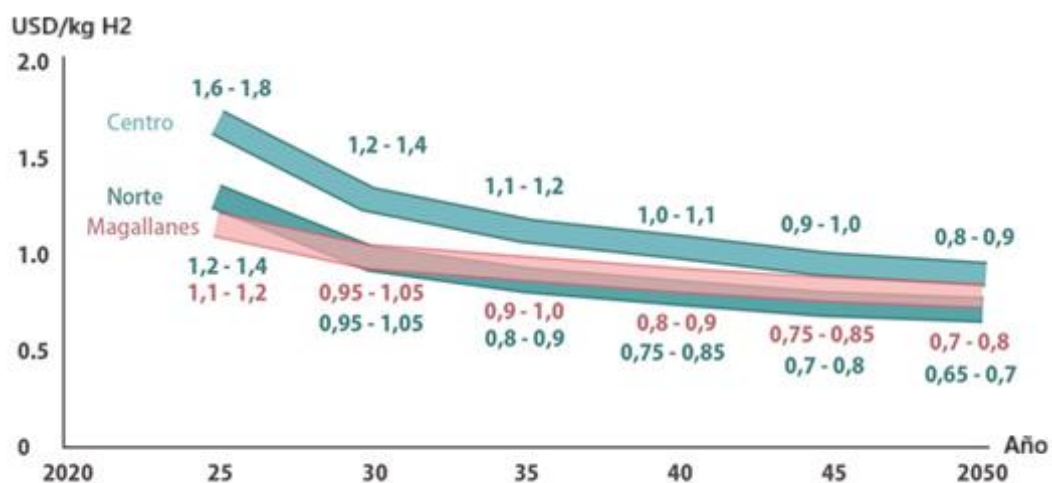
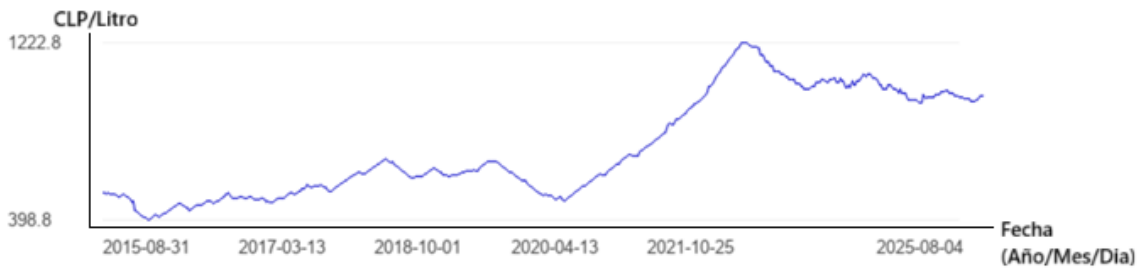


Figura 1. Gráfico de Proyección del Costo Nivelado de H2V en Chile (USD/kg)[1]

Adicionalmente, durante la pandemia del COVID-19, Chile experimentó una alarmante crecida en el precio del diésel de hasta un 64% en solo 3 años según el registro de la Comisión Nacional de la Energía (CNE) [3]. El cual, si bien se estabilizó en el último tiempo, su valor no ha bajado de los 900 CLP por litro, lo que denota la dependencia que se tiene a nivel país de las importaciones de este tipo de combustible fósil, que pueden llegar a afectar gravemente a la economía si se vuelve a replicar una crecida cómo durante la pandemia.



**Figura 2. Gráfico de Evolución del Precio del Diésel en Chile (CLP/L)[3]**

Por este motivo, se destaca la urgencia como país de desarrollar tecnologías asociadas a la producción, almacenamiento, transporte y utilización de combustibles alternativos, en este caso particular, para el sector de transporte marítimo del país.

### 1.1.1 Elección del Combustible

Para el desarrollo del proyecto, se proponen los 3 combustibles alternativos principales que más han crecido en el último tiempo, que son: Amoníaco (NH<sub>3</sub>), Gas hidrógeno comprimido (GH<sub>2</sub>C), Gas natural comprimido (GNC) y Oxi-Hidrógeno (HHO) cuya comparación se presenta en la Tabla 1:

**Tabla 1. Comparativa NH<sub>2</sub>, GH<sub>2</sub>C, GNC, HHO y Diésel [4], [5], [6], [7]**

Parámetro	NH <sub>3</sub>	GH <sub>2</sub> C	GNC	HHO	Diésel
Densidad energética (Base másica) (MJ/kg)	18,6	120	~50-55	~10-12	45,6
Densidad energética (Base volumétrica) (MJ/L)	~12-13 a 200 [bar]	~1-2 a 200 [bar]	~20-25 a 200 [bar]	~0,043-1 a 200 [bar]	~35-38 Líquido
Eficiencia de combustión	Media	Alta	Media-alta	Media-baja (pérdidas energéticas en la producción)	Alta
Emisiones de CO <sub>2</sub>	0	0	Bajas	0	Alta

<b>Emisiones de NOx</b>	Altas (requiere tratamiento para mitigarlas)	Bajas (pero requiere control de combustión)	Medias	Bajas	Alta
<b>Disponibilidad y almacenamiento</b>	Difícil (Requiere altas presiones)	Difícil (Requiere altas presiones)	Fácil (Menores presiones requeridas)	Fácil (Producido in situ)	Fácil de almacenar (a temperatura ambiente)
<b>Seguridad</b>	Tóxico y corrosivo, riesgo de fugas peligrosas	Explosivo e inflamable, necesita medidas extremas de seguridad	Inflamable, riesgo moderado	Inflamable pero más seguro al producirse in situ	Inflamable, riesgo moderado
<b>Costo de Producción</b>	Medio-alto (requiere alta inversión inicial)	Medio-Alto (Infraestructura costosa con tendencia a la baja)	Medio (en infraestructura existente)	Medio (requiere electricidad para su generación)	Bajo (en infraestructura existente)
<b>Aplicaciones Principales</b>	Potencial como combustible marítimo y transporte pesado	Transporte, almacenamiento o energético, combustión en motores	Vehículos ligeros, industria	Generadores pequeños, complementos en motores eléctricos	transporte, maquinaria.
<b>Impacto Ambiental</b>	Bajo si se produce de fuentes renovables	Muy bajo si se produce con fuentes renovables	Medio (Bajas emisiones de CO2, NOx y MP)	Muy bajo, pero depende de la fuente eléctrica	Alto (altas emisiones de CO2, NOx y MP)
<b>Coste Operativo</b>	Moderado (especialmente si se controlan las emisiones de NOx)	Alto a medio (debido a la infraestructura de almacenamiento)	Bajo-medio	Bajo a medio (electricidad requerida para generar HHO)	Bajo-medio
<b>Uso en Motores Existentes</b>	Requiere modificaciones y sistemas adicionales	No requiere modificaciones si se usa como aditivo en bajas cantidades	Adaptaciones menores	Requiere modificaciones (Instalación de Banco de Baterías)	Motores estándar, sin modificaciones

A partir de la tabla comparativa, el uso del gas comprimido de hidrógeno (GH<sub>2</sub>C) es el que despierta mayor interés para el desarrollo del proyecto, ya que tiene una densidad energética en base másica mayor al amoníaco, HHO y GNC. Al ser el

peso una variable crucial para la factibilidad técnica es importante poder almacenar la mayor cantidad de energía al menor peso posible.

Si bien el amoníaco y HHO se ven como opciones prometedoras, hay escasos registros de su aplicabilidad en embarcaciones menores, además, recientes estudios y aplicaciones del uso de Hidrógeno como aditivo en motores diésel han revelado reducciones significativas en el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> y HC (Más incluso que las del GNC), que lo convierte en una opción prometedora para mejorar el rendimiento de los motores de lanchas y reducir su impacto ambiental, aun así, es necesario tener en consideración ciertos parámetros y no descarta la posibilidad de uso de las otras alternativas a futuro.

## 1.2 Objetivos General y específicos

El **objetivo general** del proyecto es **evaluar la viabilidad técnica y económica de operar un motor marino de encendido por compresión, adaptado para funcionar con combustible dual diésel-hidrógeno**. Mediante ensayos en condiciones estacionarias que permitan evidenciar sus efectos en parámetros como el rendimiento, autonomía, consumo y nivel de emisiones que permita identificar y cuantificar cuanto es el ahorro y efecto real que puede tener teniendo en cuenta las restricciones físicas de la embarcación.

Los **objetivos específicos** son:

- **Realizar una revisión del estado del arte** sobre la operación dual diésel-hidrogeno en motores de combustión interna de encendido por compresión, identificando tecnologías, configuraciones, beneficios técnicos y limitaciones reportadas en la literatura científica y técnica.
- **Realizar ensayos dinamométricos** conforme a la norma ISO 8178-4 Ciclo E2 para evaluar el desempeño de un motor de encendido por compresión con distintas proporciones de mezcla diésel-hidrógeno y comparar los resultados con el caso base de diésel puro.

- **Analizar técnica y económicamente** los resultados obtenidos, considerando parámetros como la eficiencia energética, nivel de emisiones, consumo específico de combustible y costos asociados a la conversión y operación dual.

---

## 2. Marco teórico

---

### 2.1 Propiedades de los Combustibles

#### 2.1.1 Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico más ligero y abundante en el universo, representado por el símbolo H y con un número atómico de 1. En condiciones normales, es un gas incoloro, inodoro e insípido, altamente inflamable. Industrialmente, el hidrógeno se produce principalmente de tres maneras, clasificadas según su impacto ambiental:

1. Hidrógeno Gris: Se obtiene a partir de combustibles fósiles, principalmente mediante el reformado de gas natural. Este proceso libera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera, contribuyendo al efecto invernadero.
2. Hidrógeno Azul: Similar al hidrógeno gris, pero incorpora tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS) para atrapar y almacenar el CO<sub>2</sub> producido, reduciendo así las emisiones netas de gases de efecto invernadero.
3. Hidrógeno Verde: Producido mediante la electrólisis del agua, utilizando electricidad generada a partir de fuentes renovables como la solar o eólica. Este método no emite CO<sub>2</sub>, lo que lo convierte en la opción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

En cuanto a sus propiedades, el hidrógeno tiene una densidad energética alta por unidad de masa (33,3 kWh/kg), lo que lo convierte en un combustible eficiente. Sin embargo, su baja densidad volumétrica a condiciones ambientales (0,09 kg/m<sup>3</sup>) implica desafíos en almacenamiento y transporte. Además, es altamente reactivo y puede formar mezclas explosivas con el aire, lo que requiere medidas de seguridad rigurosas en su manejo. De forma general, las propiedades del hidrógeno se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 2. Propiedades del Hidrógeno** [4], [5], [6], [7]

Propiedad	Valor
Densidad en condiciones normales (kg/m <sup>3</sup> )	0,09
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	120

Temperatura de autoencendido (K)	833
Necesidad de aire (kg/kg)	34
Límites de encendido en aire (%)	4-77
Energía mínima de ignición (mJ)	0,02
Velocidad de llama en aire (cm/s)	265-325
Poder calorífico de mezcla estequiométrica (MJ/Nm <sup>3</sup> )	3,21

Actualmente al año 2025, en Chile, el costo de producción del hidrógeno verde oscila entre 3,0 y 7,5 (USD/kg), valor muy por sobre lo que se mostró en la Fig.1 debido a factores como el precio de la electricidad, la inflación y particularmente al elevado costo de almacenamiento y transporte. Sin embargo, se proyecta que para el año 2030, Chile podría vender hidrógeno verde a un costo de menos de 1,5 (USD/kg) en el escenario más optimista [8], posicionándose como uno de los productores más competitivos a nivel mundial.

Estas proyecciones se basan en la abundancia de recursos renovables en el país y en las estrategias nacionales que buscan impulsar la producción y exportación de gas Hidrógeno, como el plan de acción de hidrógeno verde 2023-2030 [9], que considera líneas de trabajo con hitos de corto y mediano plazo y los responsables claros que permitirán el despliegue de la industria del hidrógeno verde y sus derivados en el país.

### 2.1.2 Diésel

El Diésel es un combustible derivado del petróleo crudo, obtenido mediante un proceso de refinación que separa los distintos componentes del crudo según sus puntos de ebullición. Es ampliamente utilizado en motores de combustión interna, especialmente en vehículos de alta carga, maquinaria agrícola e industrial, debido a su alta densidad energética y eficiencia en comparación a otros combustibles como la gasolina.

En cuanto a propiedades, el diésel tiene en promedio una densidad energética 3 veces menor que la del hidrógeno por unidad de masa (12 kWh/kg), lo que lo convierte en un combustible menos eficiente. Sin embargo, tiene una mayor densidad volumétrica (820-950 kg/m<sup>3</sup>), lo que lo vuelve más fácil y menos costoso de almacenar y transportar. Otras propiedades del diésel son las siguientes:

**Tabla 3. Propiedades del Diésel [5], [7]**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad en condiciones normales (kg/m <sup>3</sup> )	850
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	42831
Temperatura de autoencendido (K)	473
Necesidad de aire (kg/kg)	14,5
Límites de encendido en aire (%)	0,6-6,5

En Chile, la dependencia de las importaciones de diésel es significativa, alcanzando un 84% en 2023 [10], lo que expone al país a las fluctuaciones del mercado internacional. A abril de 2025, el precio promedio del diésel en Chile varía según la región, con valores que oscilan entre \$944,1 en la Región Metropolitana y \$1084,5 en la Región de Aysén [11].

Proyectar el incremento exacto del precio por kilogramo del diésel en Chile hacia 2030 es complejo debido a que están sujetas a múltiples variables, incluyendo las tendencias del mercado global del petróleo, las políticas energéticas nacionales y las iniciativas para diversificar la matriz energética hacia fuentes más sostenibles. Sin embargo, un estudio de Deloitte sugiere que, debido a la nueva fiscalidad energética europea que se implementará a partir de 2026, el precio de los combustibles fósiles podría aumentar hasta un 70% para 2030 [12], lo que vuelve aún más interesante la transición hacia el hidrógeno u otros combustibles alternativos.

Este incremento se atribuye principalmente a la inclusión del transporte en el sistema de comercio de emisiones (ETS) de la Unión Europea, lo que elevará las tasas impositivas sobre el diésel. Es importante destacar que estas proyecciones pueden variar según la región y están sujetas a cambios basados en factores económicos, políticos y tecnológicos. Además, la transición hacia fuentes de energía más limpias y las políticas ambientales podrían influir significativamente en el precio del diésel en los próximos años. Pero para efectos investigativos, se asumirá que el precio aumentará en aproximadamente un 20% al año durante los próximos 5 años.

## **2.2 Parámetros Característicos a Medir en un Ensayo**

### 2.2.1 Potencia al Freno

El freno dinamométrico no mide directamente el torque del motor, sino la fuerza (en kgf) aplicada en el brazo del dinamómetro, de forma que al multiplicar la lectura del dinamómetro por la longitud del brazo se obtiene el torque del motor, y así, se relaciona el torque con la potencia de freno mediante la ecuación:

$$P_e = \frac{T * 2\pi * N}{60000} (kW) \quad (1)$$

En donde:

T: Torque medido en el freno dinamométrico (*Nm*).

N: Velocidad de giro expresada en revoluciones por minuto (*1/min*).

### 2.2.2 Consumo Específico de Combustible (SFC)

El consumo específico de combustible es un parámetro que mide la eficiencia con la que un motor utiliza el combustible para generar potencia o trabajo. Se expresa como la cantidad de combustible consumido por unidad de potencia producida en un tiempo determinado. En motores de combustión interna, el SFC indica cuánto combustible (en masa o volumen) se requiere para producir una unidad de energía (como kilovatios o caballos de fuerza) durante una hora.

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P_e} \left( \frac{g}{kWh} \right) \quad (2)$$

En donde:

$\dot{m}_f$ : Corresponde al consumo horario de combustible en gramos (*g/h*)

$P_e$ : Potencia efectiva al freno (*kW*).

### 2.2.3 Ahorro Efectivo de Diesel

El ahorro efectivo de diésel corresponde al porcentaje de la diferencia entre el flujo másico de combustible en el caso base y el caso dual. Este parámetro sirve para evidenciar cuanto fue la disminución del consumo específico de combustible diésel para cada caso:

$$\% \Delta_{diesel} = \frac{\dot{m}_{Diesel,100\%} - \dot{m}_{Diesel,dual}}{\dot{m}_{Diesel,100\%}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

En donde:

$\dot{m}_{Diesel,100\%}$ : Consumo horario de combustible en operación 100% diésel en base másica (kg/h)

$\dot{m}_{Diesel,dual}$ : Consumo horario de combustible diésel en operación dual en base másica (kg/h)

## 2.2.4 Energía Entregada por el Hidrógeno

La energía entregada de hidrógeno se determina según la proporción del aporte energético que debe suplir, del total de energía que se debe suministrar para un modo de funcionamiento dado utilizando 100% diésel según la Ec. (4), es decir:

$$\% E_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2} * LHV_{H_2}}{\dot{m}_{Diesel,100\%} * LHV_{Diesel}} \times 100 (\%) \quad (4)$$

En donde:

$\dot{m}_{Diesel,100\%}$ : Consumo horario de combustible en operación 100% diésel en base másica (kg/h)

$\dot{m}_{H_2}$ : Consumo horario de hidrógeno en operación dual en base másica (kg/h)

$LHV_{H_2}$ : Poder calorífico inferior del hidrógeno (MJ/kg)

$LHV_{Diesel}$ : Poder calorífico inferior del diésel (MJ/kg)

Es importante destacar que el caudal de hidrógeno se fija para suministrar una cantidad parcial de energía en un modo de funcionamiento específico dado, basado en las medidas de operación a 100% diésel. Por lo que, una vez determinado el caudal de hidrógeno deseado, se debe reajustar la cantidad de suministro de diésel hasta obtener la misma potencia que tendría al operar únicamente con este combustible, si bien el % de energía entregada por el hidrógeno es un valor constante, este no define un valor específico de la cantidad de flujo másico de diésel que se puede sustituir por hidrógeno, por lo que este valor se debe determinar experimentalmente.

## 2.2.5 Eficiencia Térmica de la Combustión

La eficiencia térmica de la combustión se define cómo la potencia mecánica efectiva de salida generada en función de la potencia térmica entregada por la mezcla de combustible, y representa el porcentaje de energía útil del proceso de combustión y se calcula a partir de la Ec. (5):

$$\eta_t = \frac{P_e}{\dot{m}_{Diesel,dual} * LHV_{Diesel} + \dot{m}_{H_2} * LHV_{H_2}} (\%) \quad (5)$$

En donde:

$P_e$ : Potencia efectiva al freno [ $kW$ ].

$\dot{m}_{Diesel,dual}$ : Consumo horario de combustible diésel en operación dual en base másica (kg/h)

$\dot{m}_{H_2}$ : Consumo horario de hidrógeno en operación dual en base másica (kg/h)

$LHV_{Diesel}$ : Poder calorífico inferior del diésel (MJ/kg)

$LHV_{H_2}$ : Poder calorífico inferior del hidrógeno (MJ/kg)

## 2.3 Indicadores Económicos

### 2.3.1 Ahorro Monetario de Combustible

Se entenderá como ahorro monetario a la diferencia porcentual entre los gastos relacionados al consumo de combustible 100% diésel y el que tendría si operara con combustible dual para un mismo año siguiendo la Ec. (6). De forma que este valor representa los potenciales ahorros o pérdidas económicas (en caso de que el ahorro resulte un valor negativo) relacionadas a la conversión, y así identificar el momento óptimo para realizar la conversión y que esta implique ahorros significativos:

$$\% \Delta \$ = 1 - \frac{(\dot{m}_{Diesel,Dual} * \$Diesel_{Año(x)} + \dot{m}_{H_2} * \$H_2_{Año(x)})}{\dot{m}_{Diesel,100\%} * \$Diesel_{Año(x)}} (\%) \quad (6)$$

En donde:

$\dot{m}_{Diesel,100\%}$ : Consumo horario de combustible en operación 100% diésel en base másica (kg/h)

$\dot{m}_{Diesel,dual}$ : Consumo horario de combustible diésel en operación dual en base másica (kg/h)

$\dot{m}_{H_2}$ : Consumo horario de hidrógeno en operación dual en base másica (kg/h)

$\$Diesel_{Año(x)}$ : Precio del diésel al año X (USD/kg)

$\$H_2_{Año(x)}$ : Precio del hidrógeno al año X (USD/kg)

### 2.3.2 Costo Nivelado de Energía Mecánica (LCOME)

El LCOME representa el costo promedio por unidad de energía mecánica generada (generalmente en USD/MWh o €/kWh) durante la vida útil de un proyecto, considerando todos los costos (inversión inicial, operación, mantenimiento, combustible, etc.). Permite comparar los diferentes casos de operación de sustitución del H2 en igualdad de condiciones con el caso de línea base en operación diésel.

$$LCOME = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \left( \frac{USD}{MWh} \right) \quad (7)$$

En donde:

$CAPEX$ : Costos de inversión del sistema de hidrógeno (USD)

$OPEX_t$ : Costos operacionales del sistema de hidrógeno en un período t (USD)

r: Tasa de descuento (-)

$E_t$ : Energía producida durante el período t (MWh/Año)

### 2.3.3 VAN y TIR

Son indicadores económicos que permiten evaluar la viabilidad económica y el riesgo asociado a un proyecto. El VAN es el valor presente de todos los flujos de caja futuros (ingresos y egresos) de un proyecto, descontados a una tasa de rendimiento requerida (costo de capital) y permite evaluar los potenciales ingresos económicos de un proyecto, se calcula a partir de:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I_0 \text{ (USD)} \quad (8)$$

En donde:

r: Tasa de descuento (-)

$FC_t$ : Flujo de caja para un año t (USD)

$I_0$ : Costos de inversión inicial del sistema de hidrógeno (USD)

La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero y representa la rentabilidad relativa de un proyecto, y se calcula por iteración o herramientas computacionales como Excel.

## **2.4 Marco Legal del uso de Hidrógeno en Embarcaciones y Ciclos de Navegación**

Los niveles de emisiones y consumo de combustible dependen de varios parámetros, incluidos factores relacionados con la propia embarcación (Hidrodinámica, tamaño, tonelaje, tipo de combustible o existencia de filtros de partículas) y factores operacionales (velocidad, aceleración y selección de marcha). Sin embargo, para efectos de la investigación, se utilizarán los ciclos de navegación estándar a velocidad constante establecida por contrato, que en promedio los motores de las lanchas de transporte liviano operan a 2400 [rpm].

Además, el marco legal para el uso de hidrógeno en embarcaciones está en desarrollo y actualmente no existe una normativa específica emitida por la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR), principal ente regulador, que establezca criterios específicos a cumplir. Sin embargo, el país ha avanzado en la creación de regulaciones relacionadas con la seguridad en instalaciones de hidrógeno.

En junio de 2024, el Ministerio de Energía promulgó el Decreto N°13, que aprueba el "Reglamento de Seguridad de Instalaciones de Hidrógeno" y modifica el reglamento de instaladores de gas. Este Reglamento establece las condiciones de seguridad que deben cumplir las instalaciones que utilicen hidrógeno, aunque su enfoque principal no es el ámbito marítimo [13]. Además, en 2019, se presentó la

"Proposición de Estrategia Regulatoria del Hidrógeno para Chile", que recomienda la elaboración de un reglamento general para instalaciones de hidrógeno combustible en el corto plazo (2020-2024). Esta estrategia sugiere que el Ministerio de Energía lidere la creación de una normativa que abarque diversos sectores, incluyendo potencialmente el marítimo [14]. Particularmente, si bien no existe una regulación respecto del uso de hidrógeno en transporte marítimo como tal, algunos decretos supremos que hacen mención del uso de Hidrógeno en la legislación chilena actual y podrían aplicar para el caso de estudio son los siguientes:

- NCh382. Of2004. “Sustancias peligrosas – Clasificación general”.
  - Esta norma establece una clasificación general de las sustancias peligrosas en Clase y División. Presenta dos listas de las sustancias peligrosas ordenadas de diferente forma especificando número de las naciones unidas, nombre, riesgo secundario y número de guía GRE (primeras acciones en caso de emergencia).
  - Esta norma clasifica a las sustancias peligrosas de acuerdo con el riesgo más significativo que presentan en el transporte terrestre en territorio nacional, en su manipulación y almacenamiento asociados al transporte.
- NCh389. Of1998. “Sustancias peligrosas – Almacenamiento de sólidos, Líquidos y Gases Inflamables – Medidas Generales de Seguridad”.
  - Esta norma establece las medidas generales de seguridad, que deben adaptarse en el almacenamiento de sustancias inflamables que se encuentran es estado sólido, líquido o gaseoso.
  - Esta norma aplica a las sustancias inflamables de clases 2, 3 y 4 según NCh382.
- NCh 1377. Of1990. “Cilindros de gas para uso industrial. Identificación del contenido”.
  - Esta norma establece un sistema de marcas para identificar el gas comprimido de uso industrial, contenido en cilindros; establece también las marcas para identificar las clases de riesgos y la forma en que deben presentarse las principales precauciones de seguridad.

- NCh2245. Of1993. “Hoja de datos de seguridad de productos químicos. Contenido y disposición de los temas”.
  - Esta norma establece la forma para presentar la información que debe aparecer en una hoja de datos de seguridad (HDS).
  - Establece la forma para presentar la información que debe aparecer en la HDS, específicamente define: La distribución general de la HDS; Los títulos de 16 secciones; La numeración y secuencia de las secciones; y Los ítems necesarios a proporcionar en una HDS y las condiciones de su aplicabilidad o utilización.
  
- NCh 2120/2. Of1992. “Sustancias peligrosas - Parte 2: Clase 2 – Gases.
  - Esta norma establece un listado de los gases clasificados como sustancia peligrosa en la Clase 2, de acuerdo con NCh382.
  - Esta norma establece la clase o división, riesgo secundario, grupo embalaje/envase, disposiciones especiales y número de guía GRE (primeras acciones en caso de emergencia).
  - Se clasifica el hidrógeno dentro de la división 2.1: Gases inflamables, debido a que cumple con ambos criterios exigidos. También se incluye su número de identificación de Naciones Unidas, siendo este 1049
  
- DSN°40 Modificación de 1995. “Reglamento sobre prevención de riesgos profesionales”.
  - En este reglamento se especifican algunas obligaciones a las empresas en cuanto a materia de prevención de riesgos, se establece la obligatoriedad de establecer un reglamento interno con al menos cuatro capítulos principales: Disposiciones generales, obligaciones, prohibiciones y sanciones.
  - En el capítulo obligaciones se deben incluir normas generales, tales como responsabilidades de los niveles ejecutivos intermedios, los elementos de seguridad para cada faena, las disposiciones concernientes a materias de seguridad en general.

- En el capítulo sobre obligaciones, debe especificarse toda obligación que deben cumplir los trabajadores en vías de resguardar su seguridad y la de todo el personal de la empresa.
  - En el capítulo sobre prohibiciones se enunciará expresamente toda conducta que no está permitida y las posibles multas a las que se arriesga el personal por el no cumplimiento de ello. Se deben especificar además todos los riesgos asociados a cada faena que los trabajadores deberán desarrollar, explicando los riesgos y las medidas que se deben tomar para controlarlos.
  - Se deben informar especialmente a los trabajadores acerca de los elementos, productos y sustancias que deben utilizar en los procesos de producción o en su trabajo, sobre la identificación de estos, sobre los límites de exposición permisibles de esos productos, acerca de los peligros para la salud y sobre las medidas de control y prevención que deben adoptar para evitar tales riesgos.
- DSN°78 Modificación de 2016. “Reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas”.
    - Este reglamento establece las condiciones de seguridad de las instalaciones de almacenamiento de sustancias declaradas como peligrosas en NCh382. Se excluyen del ámbito de aplicación de este reglamento entre otros, los combustibles líquidos y gaseosos, utilizados como recursos energéticos, regulados por los decretos N°160 y N°29 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción.
    - Establece los requerimientos para el establecimiento de bodegas comunes de sustancias peligrosas, y bodegas exclusivas de sustancias peligrosas, las cantidades admisibles según la clasificación de la sustancia y la compatibilidad de sustancias con bodegas comunes o exclusivas.

- Establece además los requerimientos para el almacenamiento de pequeñas cantidades.
  
- Establece normas para el almacenamiento de sólidos, líquidos y gases a granel. También incluye apartados para cilindros de gases a presión.

Dado que el uso de hidrógeno en embarcaciones es una tecnología emergente, es probable que futuras regulaciones específicas sean desarrolladas por la DIRECTEMAR o en conjunto con otras entidades gubernamentales. Por lo tanto, es recomendable mantenerse actualizado con las publicaciones oficiales de la DIRECTEMAR y el Ministerio de Energía para conocer las normativas vigentes y en desarrollo relacionadas con el uso de hidrógeno en el sector marítimo y solicitar los permisos correspondientes.

---

### 3. Estado del Arte

---

A través de diferentes investigaciones, se han evidenciado avances notables en cuanto al desempeño y la sostenibilidad del uso de Hidrógeno u otros combustibles alternativos como HHO, NH<sub>3</sub>, metanol, etc. en motores diésel en diversos sectores debido a su capacidad para mejorar el rendimiento del motor y reducir las emisiones contaminantes. Aunque, también, se han identificado ciertos retos asociados a su seguridad, producción, almacenamiento e incremento de algunos contaminantes específicos, como los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

Según la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, 2021)[15], más del 80% del comercio mundial se realiza mediante transporte marítimo. Sin embargo, la misma UNCTAD (2023) [16] reporta que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la industria naviera han aumentado un 20% en la última década. La Organización Marítima Internacional (OMI, 2023) [17] ha establecido metas para reducir las emisiones de GEI del sector naviero global, con el objetivo de lograr una reducción del 20% para 2030 y del 70% para 2040, en comparación con los niveles de emisiones registrados en 2008. El consumo de combustible y las emisiones de GEI del sector marítimo pueden reducirse mediante diversas medidas, como la optimización de la eficiencia energética, el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno o el e-metanol, y mejoras en el diseño de los buques a través del análisis de aspectos técnicos (Al-Enazi et al., 2021) [18]. No obstante, la transición hacia un transporte marítimo libre de combustibles fósiles enfrenta obstáculos considerables, ya que, actualmente, menos del 1% de la flota mundial no utiliza combustibles fósiles (DNV, 2024a) [19].

Los buques suelen tener una vida útil prolongada, entre 20 y 40 años, y la lenta adopción de tecnologías libres de combustibles fósiles en embarcaciones nuevas y existentes se debe principalmente a problemas en estudios de costos y disponibilidad de combustibles alternativos. A pesar de algunos avances, el 93,5% de los barcos en operación aún dependen de combustibles fósiles convencionales, y solo el 5,92% utiliza gas natural licuado (GNL) (DNV, 2024a) [19]. Si bien existe un gran potencial para producir hidrógeno mediante electrólisis usando energías renovables (como la eólica), actualmente el 96% del hidrógeno global se genera mediante procesos de reformado de combustibles fósiles (Van Hoecke et al., 2021)[20]. Esto se debe

principalmente al menor costo de producción a partir de gas natural (0,9–1,7 USD/kg), frente a la producción mediante energía eólica (aproximadamente 3,6–9,1 USD/kg) (Parkinson et al., 2019)[21]. Solo alrededor del 4% de la producción total de hidrógeno es "hidrógeno verde" (Ammar y Alshammari, 2018; VanHoecke et al., 2021) [22] [20]. En Europa, sectores industriales como la producción de amoníaco y metanol, así como el procesamiento de metales, se encuentran entre los principales consumidores de hidrógeno (Almaraz y Azzaro-Pantel, 2017) [23]. Los métodos más comunes para producir hidrógeno a partir de combustibles fósiles son el reformado de hidrocarburos y la pirólisis de hidrocarburos (Nikolaidis y Poullikkas, 2017; Sürer y Arat, 2022) [24]. Un ejemplo claro es el reformado con vapor de metano, que genera aproximadamente 9 kg de CO<sub>2</sub> por cada kg de H<sub>2</sub> producido (Sun y Elgowainy, 2019)[25], lo que equivale a la emisión de 270 g de CO<sub>2</sub> por kWh de energía de hidrógeno, en comparación con los 277 g de CO<sub>2</sub> emitidos por kWh de energía procedente del diésel (Jakhrani et al., 2012; Van Hoecke et al., 2021) [26] [20]. Cuando se utilizan fuentes renovables como la energía eólica para producir hidrógeno verde, el proceso se considera libre de emisiones, generando únicamente unos 13 g de CO por MJ de H<sub>2</sub> producido (Adolf et al., 2017)[27]. El hidrógeno se presenta como una solución prometedora para almacenar la energía generada por fuentes renovables como la eólica y la solar (IEA, 2017) [28].

En cuanto a estudios respecto de su viabilidad técnica en motores de encendido por compresión, se han desarrollado experimentos donde se inyectó H<sub>2</sub> directamente al colector de admisión de aire, algunos investigadores como Mohon et al. [29] estudiaron el rendimiento y las emisiones de un motor diésel de doble combustible sobrealimentado con hidrógeno. Con una inyección piloto de diésel fija, la relación de equivalencia se varió mediante la inducción de hidrógeno. El límite máximo de la relación de equivalencia (0,3) fue impuesto por el fenómeno de detonación, aunque fue posible alcanzar más del 90% de sustitución de energía diésel por hidrógeno. H. Wu y Z. Wu [30] investigaron las características de combustión y emisiones en un motor diésel de doble combustible con hidrógeno, utilizando recirculación de gases de escape (EGR). Se realizaron pruebas con 100% diésel, 10% y 20% de energía de hidrógeno, variando el EGR de 0% a 40%. Sin EGR, el uso de hidrógeno aumentó la presión máxima en el cilindro, mientras que con EGR se redujo en todos los casos. La eficiencia térmica de la combustión ( $\eta_t$ ) apenas se vio afectada, pero el humo se redujo significativamente con la adición de hidrógeno. En contraste, el uso de 100% diésel aumentó las emisiones de humo, CO y HC. El coeficiente de variación de la presión media indicada (IMEP) osciló entre 0.9% y 2.8%, lo que indicó estabilidad operativa en los modos de operación estudiados. Shirk et al. [31] investigaron la inyección de pequeñas cantidades de hidrógeno (hasta un 10% de energía total compartida) en un

motor diésel liviano. Los resultados mostraron una pequeña reducción de NOx y un efecto moderado en la eficiencia térmica de la combustión ( $\eta_t$ ). Gatts et al. [32] estudiaron las características de emisiones de un motor diésel de doble combustible con hidrógeno. Se analizaron los efectos de la adición de hidrógeno en las emisiones y la eficiencia de combustión del hidrógeno. Con una carga del motor del 10%, se logró sustituir el 68,2% del diésel con hidrógeno, alcanzando una eficiencia de combustión del 84%. Sin embargo, con inyecciones menores, esta eficiencia se redujo. Por último, Nicolás et al. [5] realizó ensayos con distintos % de sustitución en un motor marino Perkins mediante el método de los 12 modos, identificando una disminución de hasta un 40% en las emisiones de CO2 y un 25% del consumo de combustible diésel en altas cargas. Sin embargo, también evidenció una disminución de hasta un 20% de la eficiencia térmica de la combustión ( $\eta_t$ ) en bajas cargas y un aumento de las emisiones de NOx en cargas altas.

Respecto de su aplicabilidad en embarcaciones y estudios de factibilidad en distintas categorías para operar con hidrógeno gaseoso comprimido (CGH2), se han demostrado y desarrollado una amplia gama de aplicaciones piloto en sectores de recreación, transporte y defensa. Entre estas embarcaciones se encuentran buques de pasajeros, como el Hydroxy 3000 [33], Xperience NX [34], Hydroville [35], y Hydrogenesis [36]. También se han desarrollado yates y embarcaciones deportivas, como el Yacht No.1 [34], Cobalt 233 Zet [36] y Riviera 600 [37] además de barcasas de remolque, como el River Cell-Elektra [36]. Sin embargo, el requerimiento de espacio para almacenar hidrógeno a bordo sigue siendo un desafío, lo que limita su uso generalizado en el sector marítimo. No obstante, el Hidrógeno Comprimido se considera viable para embarcaciones de rutas cortas (Como lanchas de transporte liviano), ya que la mayor frecuencia de reabastecimiento en puerto reduce la necesidad de almacenamiento de hidrógeno a bordo [38] (Agencia Europea de Seguridad Marítima, 2023). Por otro lado, la falta de infraestructura y de instalaciones de producción de hidrógeno, junto con los altos costos de propiedad de las embarcaciones propulsadas por hidrógeno, son algunas de las razones que han frenado su adopción a mayor escala.

Por último, actualmente Chile cuenta con una pobre infraestructura de producción y distribución de hidrógeno verde, por lo que es difícil estimar cuanto saldrían los costos de suministro de combustible a las embarcaciones y qué mecanismo sería el más eficiente debido a fluctuaciones en el precio dependiendo de la distancia de la producción, elevando el costo del sistema de almacenamiento y transporte de los estanques. Sin embargo, se contempla que este escenario mejore y clarifique para el

año 2030 debido a los diversos proyectos que se están desarrollando a nivel nacional como se muestra en la Fig.3 [39]:

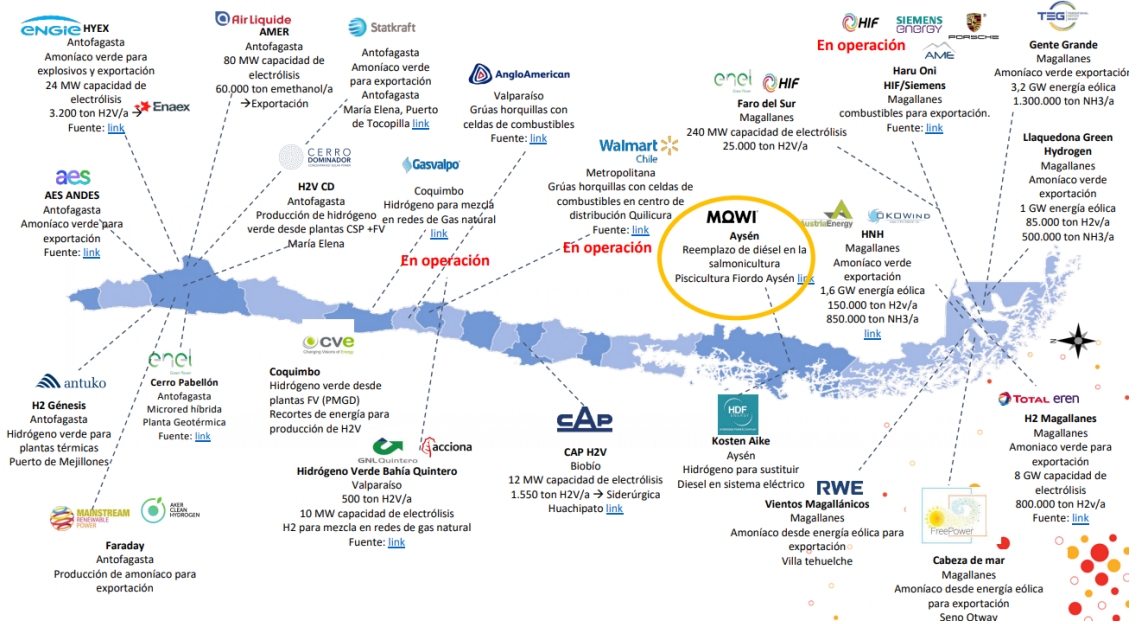
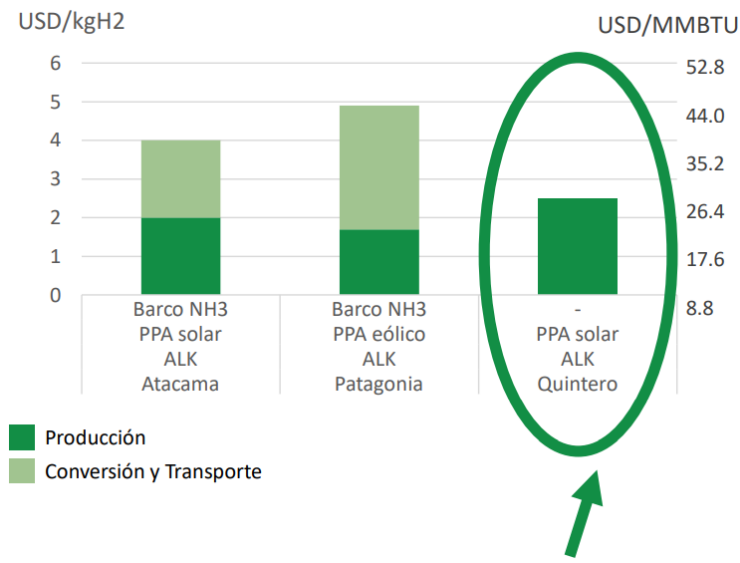


Figura 3. Mapa de Proyectos de Hidrógeno en Chile [39]

De esta forma, se proyecta una amplia gama de potenciales proveedores de H2 según la ubicación de las operaciones de la lancha, pero para efectos de la investigación, se supondrá que la lancha operará en el puerto de Quintero, en el cual actualmente se está llevando a cabo la construcción de una planta piloto de hidrógeno verde propiedad de GNL Quintero en conjunto con Acciona, la cual se estima que entre en funcionamiento a finales de 2025, con una producción inicial estimada de 500t de hidrógeno al año, pudiendo llegar a un máximo de 1600t [40]. Dicha planta reduciría considerablemente los costos logísticos y de transporte ya que se ubica en el mismo sector que la operación de la lancha y se estima que su costo de producción estimado será de 2,5 USD/kgH2, un precio considerablemente menor y más conveniente que el producido en zonas extremas como se muestra en la Fig.4 [41] y que lo posicionaría en el escenario optimista de la proyección realizada al inicio.



**Figura 4. Costo de Producción del Hidrógeno Verde GNL Quintero [41]**

En resumen, el sector marítimo es uno de los más atrasados en materia de desarrollo de tecnologías de utilización de hidrógeno, y si bien se han aplicado y desarrollado proyectos de hidrógeno en diversas embarcaciones, éstas no han presentado avances considerables más allá de proyectos piloto en comparación con otras industrias, debido principalmente a la falta de información sobre el costo asociado a la cadena de valor del hidrógeno. Además, se identifican brechas críticas respecto del análisis de costo-efectividad en la modificación de una embarcación comercial con motor de encendido por compresión, cómo también limitadas investigaciones que profundicen los costos asociados que tendría realizar dicha conversión. Por lo que, un proyecto que estudie su factibilidad tecno-económica teniendo en cuenta la situación actual del costo de producción del hidrógeno verde en Chile, considerando proyectos futuros y los potenciales ahorros en costos de combustible que pueda implicar realizar tal modificación, puede sentar las bases para seguir desarrollando estas tecnologías en la industria nacional, particularmente en el sector de servicios marítimos.

---

## 4. Metodología

---

### 4.1 Configuración del Banco de Pruebas e Instrumentación

#### 4.1.1 Motor Para Pruebas

Por motivos de seguridad, facilidad de intervención y evitar variabilidades en la medición de los parámetros, se realizaron las pruebas y modificaciones a un motor marino en condiciones estacionarias en laboratorio. Donde se utilizó un motor de transporte liviano modelo Perkins Prisma M80T con las características que se muestra en la Tabla 4 [42], el cual se conectó a un banco dinamométrico que sometió al motor a cargas continuas a velocidad constante de 2400 RPM, simulando los ciclos que tendría en operaciones portuarias in situ. Esto evita que factores externos como ciclos de velocidades variables producto del manejo de la tripulación afecten a la medición, y se exponga a personal embarcado a los riesgos inherentes asociados a la experimentación con combustibles.

Tabla 4. Especificaciones Perkins Prima M80T [42]

<b>Marca</b>	<b>Perkins</b>
<b>Año</b>	1994
<b>Modelo</b>	Prisma M80T
<b>Ciclo</b>	4 tiempos
<b>Número de Cilindros</b>	4
<b>Diámetro de cilindro</b>	84,5 (mm)
<b>Carrera</b>	88,9 (mm)
<b>Cilindrada</b>	1994 (cm <sup>3</sup> )
<b>Relación de compresión</b>	17,2:1
<b>Aspiración</b>	Turboalimentado

<b>Sistema de combustión</b>	Inyección Directa
<b>Sistema de inyección</b>	Bomba rotativa Bosch VE con parada eléctrica y mecánica, avance eléctrico de partida en frío, control de aceleración y venteo automático.
<b>Potencia Máxima</b>	58 (kW) a 4500 RPM.
<b>Torque máximo</b>	145 (Nm) a 2350 RPM.
<b>Peso</b>	230 (kg).



**Figura 5. Motor Perkins Prima M80T**

las principales modificaciones que se le realizaron fueron la instalación del sistema de inyección de hidrógeno en el colector de aire antes del turbo, válvulas reguladoras de caudal en el sistema de inyección de hidrógeno y combustible diésel, instalación de sensores de temperatura en partes clave del motor y el acoplamiento del eje al freno dinamométrico donde se le realizarán las pruebas y se someterá a los ciclos de cargas estandarizados. Debido a que ya se han realizado experimentaciones anteriores en el mismo motor, pero sometiéndolo a ciclos de carga distintos a los que se realizaron en esta ocasión, la instalación y disposición de la mayoría de los

componentes necesarios para la conversión seguirán dicha referencia [5] y se especificarán a mayor detalle más adelante.

Cabe destacar que, para las condiciones de borde de la operación, se seleccionó una lancha de referencia que utiliza el mismo motor, de forma que los resultados e intervenciones que se le realizaron durante la experimentación después puedan ser extrapolables a dicha embarcación. De este modo no sería necesario sacar de servicio a una “lancha piloto” durante un tiempo excesivo mientras se realizan los estudios de prefactibilidad, con las pérdidas económicas que esto pudiera implicar para una empresa.

#### 4.1.2 Freno Dinamométrico

Se instaló un dinamómetro hidráulico acoplado directamente al cigüeñal del motor para aplicar los ciclos de carga. Para esta clase de ensayos el único aparato requerido es un instrumento para determinar la velocidad de giro del motor y el freno dinamométrico que permita conocer el torque del motor en el cigüeñal. El torque es el producto de la fuerza aplicada en el brazo del dinamómetro multiplicada por la distancia desde su punto de aplicación hasta el centro del eje siguiendo la Ec. (1), y esta se ajusta mediante un mecanismo de palanca. La lectura de los valores de torque se realizó a través del indicador analógico del dinamómetro. Una descripción detallada de las especificaciones del freno dinamométrico se muestra en la Tabla 5. Mientras que la Fig. 6 muestra cómo queda acoplado el conjunto motor-dinamómetro.

Tabla 5. Especificaciones Freno Dinamométrico [5]

<b>Marca</b>	<b>Schenck.</b>
<b>Año</b>	1959
<b>Modelo</b>	U2-20.
<b>Tipo</b>	Freno hidráulico Froude
<b>Rango</b>	40 (kgf).
<b>Resolución</b>	0,1 (kgf).
<b>Potencia Máxima</b>	200 (PS).
<b>Velocidad Máxima</b>	5,000 (RPM)



**Figura 6. Motor Instalado con Freno Dinamométrico**

El combustible utilizado de referencia fue diésel comercial de bajo contenido de azufre para uso en transporte, donde se midió volumétricamente el consumo con una probeta, para luego obtener el flujo másico en función de su densidad. El hidrógeno fue suministrado desde tanques cilíndricos de alta presión (200 bar) con una pureza del 99,5%. Se adaptó una válvula reguladora de presión para mantener la presión del gas entre 1,0 bar y 3,5 bar, dependiendo de la cantidad requerida de hidrógeno. Se utilizará un controlador de flujo másico para regular la cantidad de hidrógeno inyectado en el motor. Mientras que el caudal requerido de hidrógeno para cada condición operacional se obtiene a partir de la Ec. (4) de energía entregada por el hidrógeno ( $\%E_{H_2}$ ) al despejar la variable “ $\dot{m}_{H_2}$ ”.

Por motivos de seguridad, múltiples arresta llamas y válvulas de retención fueron adaptados en el sistema de inyección de hidrógeno para controlar el retroceso de la llama. La primera válvula se colocó inmediatamente después del regulador de presión, y la segunda, aguas arriba del turbocompresor. Además, Se adaptaron manualmente tres válvulas de cierre en la línea de suministro para interrumpir el flujo en caso de emergencia.

Cómo se mencionó en el apartado anterior, al motor se le instaló un conjunto de termocuplas conectadas a un sistema de adquisición de datos por computadora para visualizar las mediciones de las temperaturas del aceite, gases de escape, aire de admisión, refrigerante y agua de enfriamiento en cada prueba del motor. El consumo de combustible diésel se medirá con una balanza digital, registrando el volumen fijo de combustible que consumió en un tiempo establecido.

La fracción molar de oxígeno en los gases de escape, así como las concentraciones de CO<sub>2</sub> y NO, serán analizadas con un analizador de gases, mientras que la opacidad de los gases de escape se midió con un opacímetro. El consumo de aire se determinó mediante un rotámetro, y la presión de sobrealimentación se midió con un manómetro de columna de mercurio.

La disposición de todos los equipos en la configuración experimental se detalla en la Fig.7, las especificaciones de los instrumentos de medición se detallan a continuación:

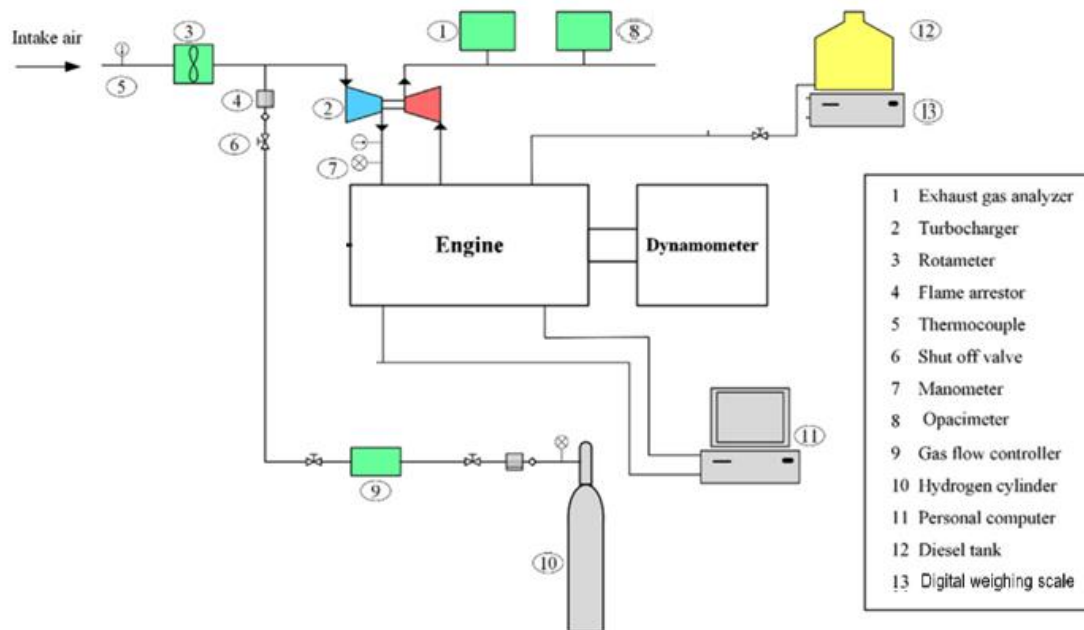


Figura 7. Configuración Experimental [5]

### 4.1.3 Instrumentación

- Tacómetro
  - Marca: H & B
  - Rango: 0 – 6,000 RPM
  - Resolución: 50 RPM.
- Cronómetro
  - Marca: Casio.
  - Resolución: 1/100 (s).
  - Tipo: Digital.
- Balanza Digital
  - Marca: SNOWREX
  - Modelo: NHV-30
  - Capacidad: 30 kg
  - Resolución: 0,001 kg
- Analizador de gases.
  - Marca: Bosch.
  - Modelo: BEA 250-EU.

- Rango: 0 – 9999 ppm HC; 0 – 10 (% vol.) de CO; 0,5 – 9999 Lambda; 0 – 18 (% vol.) de CO<sub>2</sub>; 0 – 22 (% vol.) de O<sub>2</sub>.
- Sensores de oxígeno: Typ R 17-A; Typ A7- 11.5.
- Opacómetro.
  - Marca: TEXA.
  - Modelo: OPABOX AUTOPOWER
  - Rango: Opacidad: 0 – 9,99 (1/m); Opacidad relativa: 0 – 9,9 %.
- Sistema de adquisición de datos.
  - Marca: Omega.
  - Modelo: OMB-DAQ-55
  - Puertos: 10 entradas análogas, 16 entradas digitales I/O, conexión de salida USB.
- Manómetros de columna (Mercurio y agua).
  - Rango: 840 (mm).
  - Resolución: 1 (mm).
- Rotámetro.
  - Marca: Aerzen.
  - Modelo: D74.
  - Caudal mínimo: 32 (m<sup>3</sup> /h).
  - Caudal máximo: 650 (m<sup>3</sup> /h).
  - Presión máxima: 10,0 (bar)
  - Resolución: 0,1 (m<sup>3</sup>)
  - Rango: 0 – 9999999,9 (m<sup>3</sup>)
- Densímetro.
  - Marca: Hill Scientific Inc.
  - Tipo: Bulbo sumergible.
  - Rango: 0,800 – 0,900 (g/cm<sup>3</sup>)
  - Resolución: 0,010 (g/cm<sup>3</sup>)

#### **4.1.4 Sistema de inyección de hidrógeno**

- Regulador de presión
  - Marca: Harris
  - Modelo: HP701-125.
  - Gas: Hidrógeno
  - Diafragma: Acero Inoxidable 302.
  - Presión máxima de entrada: 3000 (psi).

- Presión de salida: 125 (psi).
- Válvulas de corte
  - Marca: Swagelok.
  - Modelo: 316 923625001.
  - Presión máxima: 206 (bar) a 37 (°C)
- Controlador de flujo másico.
  - Marca: Aalborg.
  - Modelo: GFC57
  - Rango: 0 – 100 (l/min) de aire.
  - Resolución:  $\pm 3$  (l/min) en rango 40 – 100 (l/min);  $\pm 6$  (l/min) en rango 0 – 40 (l/min)
- Arresta-llama.
  - Marca: Gas Control Equipment (GCE).
  - Modelo: FS500-BC.
  - Presión máxima de entrada: 10 (bar).

## 4.2 Procedimiento Experimental

De forma general y para cumplir con los objetivos e hipótesis planteados inicialmente, una vez realizado el reconocimiento de los equipos a estudiar (motor, freno, instrumentos de medición), detalladas las características técnicas del motor diésel (potencia, tipo de inyección, régimen de carga) y del freno dinamométrico (rango, resolución, potencia máxima), identificados los parámetros clave de evaluación (torque, consumo, emisiones, eficiencia) y fijado el uso de diésel puro como condición base de referencia. Se elaboró un “Checklist” para estandarizar y explicitar cada una de las tareas a realizar en el momento en que se desarrollan pruebas tomando como referencia experimentaciones similares anteriores [5], de forma de resguardar siempre la integridad y seguridad del personal que esté realizando los ensayos, los equipos utilizados y la formalidad experimental.

### 4.2.1 Operación Línea Base (100% Diésel)

- 1) Luces de cabina y puesto de control encendidas
- 2) Analizador de gases y opacímetro en funcionamiento.
- 3) Dispositivos de medición están conectados y funcionando (termocuplas y manómetros).

- 4) Verificar niveles de lubricante y refrigerante.
- 5) Conectar Batería al sistema de arranque del motor.
- 6) Abrir válvula de alimentación de agua del freno.
- 7) Ajustar caudal de agua de refrigeración.
- 8) Abrir válvula de alimentación de combustible diésel.
- 9) Inspección visual conjunto freno-motor, verificar que no hay elementos ajenos o sueltos; línea de inyección diésel no presenta fugas visibles
- 10) Tapar Extractor de aire en operación y ducto de cabina contigua.
- 11) Extintores al interior y exterior de la cabina se encuentran operativos.
- 12) Puesta en Marcha del motor.
- 13) El motor opera de manera normal (Temperaturas y presiones de control, sonido del motor, etc.) y ha alcanzado la temperatura normal de operación.
- 14) Realizar segunda inspección visual y auditiva con el motor en operación (Sistema de alimentación de combustible, vibraciones, flujos de refrigeración, etc.).

#### **4.2.2 Detención de Operación Línea Base (100% Diésel)**

- 1) Temperatura de gases de escape bajo 200 °C.
- 2) Temperatura de aceite estable y bajo 100 °C.
- 3) Detención del Motor.
- 4) Cerrar válvula de alimentación diésel.
- 5) Cerrar válvula de alimentación del freno.
- 6) Cerrar válvula de agua de refrigeración.
- 7) Desconectar batería.
- 8) Inspección visual del conjunto freno-motor, no existen elementos sueltos o averiados.
- 9) Verificación de fugas en sistema de alimentación de combustible, aguas de refrigeración o lubricación del motor.
- 10) Controlar y eliminar cualquier derrame producido.
- 11) Identificar y reparar todas las fugas existentes.
- 12) Apagar extractor de aire.
- 13) Apagar instrumentos de medición.
- 14) Luces de cabina y halógenos apagados.

#### **4.2.3 Operación con Inyección de Hidrógeno**

- 1) Encender luces de cabina y puesto de control.
- 2) Analizador de gases y opacímetro en funcionamiento.
- 3) Controlador de flujo de hidrógeno conectado y en operación.
- 4) Dispositivos de medición están conectados y funcionando (termocuplas y manómetros).
- 5) Verificar niveles de lubricante y refrigerante.
- 6) Conectar batería al sistema de arranque del motor.
- 7) Abrir válvula de alimentación de agua del freno.
- 8) Ajustar caudal de agua de refrigeración.
- 9) Abrir válvula de alimentación de combustible diésel.
- 10) Línea de inyección de hidrógeno no tiene fugas.
- 11) Inspección visual conjunto freno-motor, no hay elementos ajenos o sueltos; línea de inyección diésel no presenta fugas visibles.
- 12) Extractor de aire en operación y ducto de cabina contigua tapado.
- 13) Extintores al interior y exterior de la cabina se encuentran operativos.
- 14) Puesta en Marcha del Motor.
- 15) El motor opera de manera normal (Temperaturas y presiones de control, sonido del motor, etc.) y ha alcanzado la temperatura normal de operación
- 16) Han transcurrido 5 minutos desde que se encendió el controlador de flujo de hidrógeno.
- 17) Probar operación del sistema de inyección de hidrógeno con baja o nula carga.
- 18) Realizar segunda inspección visual y auditiva con el motor en operación (Sistema de alimentación de diésel, sistema de alimentación de hidrógeno, vibraciones, flujos de refrigeración, etc.).

#### **4.2.4 Detención de Operación con Inyección de Hidrógeno**

- 1) Cerrar válvula de cilindro de hidrógeno y despresurizar línea de alimentación.
- 2) Temperatura de gases de escape bajo 200 °C.
- 3) Temperatura de aceite estable y bajo 100 °C.
- 4) Detención del Motor.
- 5) Cerrar Válvula de alimentación.
- 6) Cerrar Válvula de alimentación del freno.
- 7) Cerrar Válvula de agua de refrigeración.
- 8) Batería desconectada.
- 9) Inspección visual conjunto freno-motor, no existen elementos sueltos o averiados.

- 10) Verificación de fugas en sistema de alimentación de combustibles, aguas de refrigeración o lubricación del motor.
- 11) Controlar y eliminar cualquier derrame producido.
- 12) Identificar y reparar todas las fugas existentes en caso de detectar.
- 13) Apagar extractor de aire.
- 14) Apagar instrumentos de medición.
- 15) Luces de cabina y halógenos apagados.

#### **4.2.5 Parada de Emergencia**

- 1) Cortar alimentación de hidrógeno al sistema de inyección. Se puede realizar mediante controlador de flujo o válvulas de corte rápido instaladas en línea de suministro.
- 2) Detener motor de forma rápida y segura mediante botón de detención ubicado en tablero, en caso de falla eléctrica, se cuenta también con un sistema mecánico de detención que puede ser accionado igualmente desde afuera de la cabina.
- 3) Cortar alimentación de combustible diésel.
- 4) Avisar a personal de laboratorio.
- 5) En caso de incendio detener extractor de aire de la cabina.
- 6) Atacar fuego con extintores de polvo químico seco.
- 7) No arriesgar la integridad física con acciones temerarias.
- 8) Evacuar la zona siniestrada.
- 9) En caso de ser necesario, evacuar el laboratorio por puerta de acceso.
- 10) Llamar al fono de emergencias en campus 4222.

#### **4.2.6 ISO 8178-4 Ciclos Tipo E2**

Luego, se definió el ciclo de pruebas a realizar, dónde la principal diferencia respecto a ensayos anteriores es que en este caso se seguirán los ciclos establecidos por la norma ISO 8178-4, que corresponde a la medición de emisiones de escape en motores no destinados a circular por carretera (en este caso un motor marino). Para finalmente, proceder con adquisición de datos, dónde se definió un listado explícito de los procedimientos, instrumentos utilizados y resultados esperados, estableciendo la inyección de hidrógeno como variable independiente, configurando el sistema de almacenamiento y suministro, y verificando su estanqueidad para evitar fugas.

Luego, se definió el ciclo de pruebas a realizar, dónde la principal diferencia respecto a ensayos anteriores es que en este caso se seguirán los ciclos establecidos por la norma ISO 8178-4 [43], la cual incluye una serie de ciclos de prueba dinamométrica de motores en estado estacionario (denominados como tipo C1, C2, D1, D2, G1, G2, G3, E1 y E2) diseñados para diferentes clases de motores y equipos. Cada uno de estos ciclos representa una secuencia de varios modos en estado estacionario con diferentes factores de ponderación dependiendo de la aplicación del motor y se utiliza para la certificación de emisiones y/o pruebas de homologación de tipo en numerosos países, como Estados Unidos, China, India, Japón y la Unión Europea.

Particularmente en este caso, se seguirán los ciclos establecidos para el tipo E2, el cual evalúa el desempeño y el nivel de emisiones de los motores de propulsión en aplicaciones marinas en 4 diferentes porcentajes de carga, permitiendo obtener resultados representativos del funcionamiento real del motor en condiciones típicas de operación en embarcaciones con hélice de paso fijo y velocidad constante. Los 4 puntos de carga se especifican en la Tabla 6:

**Tabla 6. Ciclos de Carga Tipo E2 Establecidos por la ISO 8178-4 [43]**

<b>Modo</b>	<b>Velocidad (RPM)</b>	<b>Carga (%)</b>	<b>Pe (kW)</b>
<b>1</b>	2400	100	35,4
<b>2</b>	2400	75	26,3
<b>3</b>	2400	50	16,7
<b>4</b>	2400	25	8,8

#### **4.2.7 Adquisición de Datos**

Por último, una vez realizados los “Checklist” y definidos los modos de operación, se procedió con las pruebas en laboratorio para adquirir los datos necesarios para el análisis siguiendo la norma ISO 8178-4 ciclo E2, dónde se definió un listado explícito de los procedimientos, instrumentos utilizados y resultados esperados. Se realizaron pruebas controladas a los cuatro niveles de carga (25%, 50%, 75%, 100%), con 3 porcentajes de sustitución (10%, 20%, 30%) y con 25 minutos por cada ciclo, realizando de 5 a 10 repeticiones para asegurar la confiabilidad estadística de los

resultados. Registrando los datos cuando la operación sea estable y calculando los parámetros de performance como la potencia efectiva ( $P_e$ ), consumo específico (SFC), eficiencia energética ( $\eta_t$ ), ahorro de combustible ( $\% \Delta_{diesel}$ ) y energía entregada por el H<sub>2</sub> ( $\% E_{H_2}$ ). En particular, las pruebas que se realizaron en cada ciclo se detallan a continuación:

### **Prueba 1:** Evaluación de rendimiento y Consumo

- Objetivo: Determinar la potencia efectiva al freno y el efecto de la mezcla de combustible en el ahorro efectivo de combustible bajo diferentes ciclos definidos por los 4 modos.
- Instrumentación:
  - Banco dinamométrico para aplicar cargas específicas.
  - Medidores de torque y potencia.
  - Balanza digital para medir consumo de combustible.
  - Controlador de flujo másico de H<sub>2</sub>
  - Termopares para medir temperaturas en gases de escape, admisión y refrigeración
- Procedimiento:
  - Conectar el motor al banco dinamométrico.
  - Operar el motor en cada uno de los 4 modos definidos por la norma ISO 8178-4 Ciclo E2, ajustando carga según la tabla.
  - Calcular la Potencia efectiva al freno ( $P_e$ ) a partir de la Ec. (1).
  - Calcular el consumo específico de combustible ( $SFC$ ) a partir de la Ec. (2)
  - Analizar y calcular a partir de la Ec. (3) los cambios en el ahorro efectivo de diésel ( $\% \Delta_{diesel}$ ) con y sin aditivo.
- Hipótesis:
  - Reducción del consumo específico al integrar hidrógeno, especialmente en modos de carga media y alta debido a un mayor límite de encendido del hidrógeno.

### **Prueba 2:** Análisis de Emisiones

- Objetivo: Medir el impacto de la mezcla en las emisiones contaminantes en cada modo operativo.
- Instrumentación:
  - Analizador de gases (con capacidad para medir múltiples compuestos como CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y HC).
  - Detector de partículas (opcional para motores diésel que generen hollín).
- Procedimiento:
  - Utilizar un analizador de gases de escape para medir las concentraciones de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC y partículas en cada uno de los 4 modos.
  - Comparar emisiones promedio con y sin aditivo.
- Hipótesis:
  - Reducción de CO y HC, indicando combustión más completa.
  - Cambios en NO<sub>x</sub> debido a variaciones en la temperatura de combustión.

### **Prueba 3:** Prueba de Autonomía

- Objetivo: Evaluar la factibilidad de uso según el consumo y almacenamiento disponible en embarcación de referencia, las horas de autonomía requeridas y temperaturas de operación.
- Instrumentación:
  - Balanza digital para medir consumo de combustible.
  - Controlador de flujo másico de H<sub>2</sub>
  - Cronómetro
  - Termopares para monitorear la temperatura en componentes críticos.
  - Planos de Embarcación de referencia y estanques de H<sub>2</sub>
- Procedimiento:
  - Registrar que la operación no ocasione estrés térmico o mecánico excesivo que a largo plazo afecte su durabilidad

- Calcular las horas de autonomía de la embarcación con 100% diésel en función del flujo de combustible obtenido experimentalmente y la capacidad de almacenamiento de la lancha de referencia.
- Verificar en función del flujo de hidrógeno cuánto habría que almacenar para cumplir con las horas requeridas y si esta calza con la capacidad máxima de almacenamiento instalable en la embarcación.
- Hipótesis:
  - Cumplimiento de la mayoría de las horas de autonomía requeridas debido a la mayor densidad energética del hidrógeno, y comportamiento estable siempre que las proporciones de hidrógeno no excedan los límites seguros.

#### **Prueba 4:** Prueba de Eficiencia Energética

- Objetivo: Comparar la energía útil generada frente al consumo total en cada modo.
- Instrumentación:
  - Banco dinamométrico para aplicar cargas específicas.
  - Medidores de torque y potencia.
  - Balanza digital para medir consumo de combustible.
  - Controlador de flujo másico de H<sub>2</sub>
- Procedimiento:
  - Calcular el poder calorífico inferior del combustible (LHV ajustado para cada mezcla)
  - Calcular y comparar a partir de la Ec. (5) la eficiencia energética global ( $\eta_t$ ) entre las condiciones de diésel puro y mezclas con aditivos.  $\Delta$
- Hipótesis:
  - Sin variaciones considerables de eficiencia, siempre y cuando las concentraciones de hidrógeno se encuentren sobre el límite de encendido y bajo el límite de flamabilidad.

**Prueba 5:** Identificar riesgos y evaluación de seguridad del sistema de suministro de hidrógeno

- Objetivo: Identificar riesgos y evaluar la practicidad de implementar el sistema.
- Instrumentación:
  - Válvulas arresta llamas en el sistema de suministro de hidrógeno.
- Procedimiento:
  - Probar válvulas de alivio y sistemas de monitoreo.
  - Verificar la estabilidad del suministro de hidrógeno bajo las 4 condiciones de operación
- Pruebas específicas:
  - Evaluación de fugas, inflamabilidad y estabilidad del sistema frente a fallos
- Hipótesis:
  - Validación de un sistema seguro y eficiente en operación.

Esta propuesta garantiza un análisis profundo, respaldado por datos cuantitativos y experimentales basados en la norma ISO utilizada, y un número de repeticiones que marca una tendencia clara de los resultados. De esta forma se podrá validar la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de Hidrógeno como aditivo en motores diésel.

### **4.3 Consideraciones Adicionales**

Adicionalmente a los ensayos realizados en el laboratorio, se debe tener en consideración las condiciones de borde de una embarcación de referencia y los aspectos de seguridad conforme a los registros bibliográficos investigados inicialmente para un análisis completo de la factibilidad técnica y económica.

#### **4.3.1 Condiciones de Borde de la Embarcación de Referencia**

A pesar de que el hidrógeno posee una densidad energética mayor a la de los combustibles fósiles como el diésel, su adopción generalizada como combustible para el transporte, particularmente en el sector marino, se ha visto obstaculizado por su baja densidad volumétrica. Mientras el hidrógeno aporta aproximadamente 3 veces el contenido energético del diésel por unidad de masa, su contenido energético por unidad de volumen es mucho menor, siendo de 0,011 (MJ/L) para el hidrógeno y 36,3 MJ/L para el diésel a temperatura ambiente (20°C) y presión atmosférica (1 bar). Sin embargo, esto se puede solucionar al comprimirlo en tanques tipo 3 [44], los cuales pueden almacenar el gas hasta 350 [bar] y aumentando así su densidad energética hasta casi 3 (MJ/L), Por lo que la presión, dimensiones y peso de los tanques de hidrógeno son un aspecto a considerar al analizar los resultados de los ensayos en laboratorio.

Si bien no se estudiará el comportamiento del motor en operaciones in situ, para que la experimentación sea lo más fidedigna y replicable a futuro en una embarcación misma, para el análisis de los resultados se tuvo en consideración como condición de borde las restricciones físicas de una lancha de referencia. Dónde, por temas de similitud entre el motor en que se realizaron las pruebas y el instalado en la lancha, se utilizaron las características y dimensiones de una lancha modelo Antares 6.80 de la empresa Beneteau [45], cuyas especificaciones se presentan en la siguiente Figura:



# Antares 6.80

Inventario



## CARACTERÍSTICAS GENERALES

• Eslora total:	6,48 m	21'3"
• Eslora casco:	6,43 m	21'1"
• Manga total:	2,55 m	8'4"
• Manga casco:	2,50 m	8'2"
• Desplazamiento en rosca CE:	1 565 kg	3,449 lbs
• Desplazamiento en rosca sin motor:	1 370 kg	3,019 lbs
• Altura sobre flotación:	2,25 m	7'5"
• Calado mínimo/máximo:	0,45 - 0,60 m	1'6" - 1'12"
• Capacidad carburante:	136 l	36 US Gal
• Capacidad agua:	20 l	5 US Gal
• Potencia motor máxima:	111 Kw - 150 CV	150 HP

## ARQUITECTOS / DISEÑADORES

- Arquitecto Naval: BENETEAU POWER BOATS
- Arquitectura interior: SARRAZIN DESIGN

## CERTIFICACIÓN CE

- Categoría C - 7 personas
- Categoría D - 7 personas

Figura 8. Especificaciones Beneteau Antares 6.80 [45]

Si alguna de estas consideraciones no se cumple (espacio o peso excesivo), se descarta la posibilidad técnica de conversión por no satisfacer las condiciones físicas reales de operación a las que estará sometido el motor con combustible dual Diesel-Hidrógeno. Sin embargo, esto no descarta la posibilidad de la conversión parcial, ya que una de las principales ventajas del sistema es que, en caso de que se agote parcialmente el suministro de hidrógeno, ésta pueda seguir operando puramente con diésel y no quede varada.

### 4.3.2 Medidas de Seguridad de la Instalación a Bordo

En materia de seguridad, Todos los combustibles tienen asociado algún grado de peligro, por lo tanto, el uso seguro del combustible se centra en prevenir situaciones donde existan los tres factores de la combustión: fuente de ignición (chispa o calor),

oxidante (aire) y combustible. Considerando estos factores, la industria diseña los sistemas de combustible con controles de ingeniería apropiados y establece pautas para garantizar el manejo y uso seguro de un combustible. El hidrógeno es un combustible y por lo tanto es peligroso. Sin embargo, en comparación con los combustibles convencionales (gasolina, diésel, gas natural) puede ser tan seguro o incluso más que estos. La diferencia más importante entre el hidrógeno y la gasolina es que el hidrógeno es un gas y la gasolina es un líquido. El hidrógeno al ser el elemento más ligero de la tierra tiene una gran ventaja en cuanto a seguridad, ya que el combustible se volatiliza muy rápido en el aire y solo se puede encender muy brevemente. La gasolina, por otra parte, se evapora más lento y tiene una densidad mayor que el aire, lo que provoca que el vapor de gasolina a menudo permanezca en el suelo durante mucho tiempo, donde es más probable que se encienda.

El hidrógeno al ser 14 veces más ligero que el aire, hace que el límite inferior de encendido se exceda rápidamente y no permanezca una mezcla inflamable en caso de ser liberado al aire a temperatura ambiente. Por lo que, Tanto para los ensayos en laboratorio, cómo para la instalación de los estanques a bordo, en caso de escape de hidrógeno, éste debe ser diluido rápidamente por ventilación intensiva o succión, de esta forma es posible evitar la formación de una mezcla inflamable. En la Tabla 5 se describen las características inherentes del hidrógeno [46] destacando el peligro potencial y las medidas de control que se deben tomar para cada caso:

**Tabla 7: Características, Riesgos y Control Relacionados al Hidrógeno [46]**

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>PELIGRO POTENCIAL</b>	<b>MEDIDAS DE CONTROL</b>
<b>INCOLORO, INODORO, INSÍPIDO</b>	Imposible de detectar fugas a simple vista	Sensores de detección
<b>BAJA VISCOSIDAD, ÁTOMO MUY PEQUEÑO (PUEDE SER ABSORBIDO EN MATERIALES)</b>	Posibilidad de Fuga, debilitamiento de ciertos materiales que podrían resultar en fallas estructurales	Sistema de detección de fugas, ventilación y selección adecuada de materiales
<b>BAJA DENSIDAD ENERGÉTICA VOLUMÉTRICA</b>	Alta presión de almacenamiento	Diseño adecuado de contenedores de almacenamiento, dispositivos de alivio de presión
<b>NO RESPIRABLE (CARENTE DE OXÍGENO)</b>	Peligro de acumulación en espacios confinados	Sistema de detección de fugas, Ventilación

	(como cualquier gas sin oxígeno)	
<b>AMPLIO RANGO DE INFLAMABILIDAD</b>	Se puede encender en un amplio rango de concentración, por lo tanto, las fugas de cualquier magnitud son de cuidado	Sistema de detección de fugas, Ventilación
<b>BAJA ENERGÍA MÍNIMA DE IGNICIÓN</b>	Una pequeña chispa lo puede encender (como cualquier combustible)	Ventilación, tomas de tierra, aislación de toda posible fuente de ignición
<b>BAJA TEMPERATURA DE LICUEFACCIÓN</b>	Quemadura criogénica y daño Pulmonar	Sistema de detección de fugas, equipos de protección personal
<b>RÁPIDO CAMBIO DE FASE DE LÍQUIDO A GAS</b>	Explosiones de Presión	Dispositivos de alivios de presión, sistema de detección de fugas

También, se recomienda seguir la norma NFPA 2 (National Fire Protection Association) que establece las medidas de seguridad fundamentales para la producción, instalación, almacenamiento, uso y manejo del hidrógeno, tanto en su forma gaseosa comprimida (GH2C) como líquida criogénica (LH2). Aunque este código aborda principalmente instalaciones terrestres, sus principios pueden ser aplicados como referencia en entornos marítimos. Para el uso de hidrógeno en embarcaciones marítimas, se deben considerar las siguientes medidas de seguridad [47]:

1. Evaluación de Riesgos y Distancias de Seguridad: Realizar un análisis exhaustivo de riesgos para determinar las distancias de seguridad adecuadas entre equipos y áreas de almacenamiento, evitando efectos dominó y garantizando la protección contra fuentes de ignición. La NFPA 2 proporciona tablas de referencia para distancias de seguridad que pueden ser consultadas y adaptadas al contexto marítimo.
2. Protección contra Incendios y Explosiones: Implementar sistemas de detección y extinción de incendios adecuados para hidrógeno, considerando su alta inflamabilidad y baja energía mínima de ignición. Es recomendable instalar sistemas de ventilación eficientes para prevenir la acumulación de hidrógeno en espacios confinados.

3. **Materiales y Diseño de Sistemas:** Utilizar materiales compatibles con hidrógeno para tuberías y recipientes, evitando la fragilización por hidrógeno. El diseño debe facilitar el mantenimiento y la inspección regular de los sistemas de almacenamiento y distribución.
  
4. **Formación y Procedimientos Operativos:** Capacitar al personal en el manejo seguro del hidrógeno, incluyendo procedimientos de emergencia y mantenimiento preventivo. Establecer protocolos claros para operaciones rutinarias y respuesta a incidentes.
  
5. **Cumplimiento Normativo y Coordinación:** Además de la NFPA 2, es fundamental cumplir con las regulaciones marítimas locales e internacionales aplicables al uso de hidrógeno en embarcaciones (DIRECTEMAR). La coordinación con autoridades marítimas y organismos de certificación garantizará el cumplimiento de los estándares de seguridad requeridos.

Dado que la aplicación de hidrógeno en el sector marítimo es un área en desarrollo, tal como se mencionó en el marco normativo, para análisis futuros se recomienda consultar con las fuentes legales actualizadas y colaborar con las autoridades marítimas para asegurar una implementación segura y conforme a las posibles normativas futuras, acatando siempre a las observaciones que estos hagan.

---

## 5. Resultados y Análisis

---

### 5.1 Resultados de Ensayos en Laboratorio

A partir de los ensayos realizados en laboratorio, se registraron y analizaron los siguientes resultados:

1. Rendimiento y Consumo:

- Consumo Específico de Combustible: Se observa una notoria disminución del consumo específico de combustible para todos los casos, lo que evidencia una mejora del consumo de combustible diésel respecto de la potencia entregada:

**Tabla 8. Mediciones Consumo Específico de Combustible**

<b>MODO</b>	<b>SFC 0% [G/KWH]</b>	<b>SFC 10% [G/KWH]</b>	<b>SFC 20% [G/KWH]</b>	<b>SFC 30% [G/KWH]</b>
<b>1</b>	215,153	195,359	176,641	163,732
<b>2</b>	217,337	198,728	181,593	171,658
<b>3</b>	234,846	218,173	199,343	188,136
<b>4</b>	289,021	280,005	256,421	247,501

- Ahorro efectivo de combustible: Dado que el % de sustitución energética de Hidrógeno no es equivalente al ahorro de combustible (es decir, un 30% de hidrógeno no necesariamente disminuye un 30% el consumo específico de diésel), El ahorro efectivo de combustible únicamente se puede conocer de forma experimental, dónde los resultados evidencian un mayor ahorro efectivo a un mayor porcentaje de carga.

**Tabla 9. Mediciones de Ahorro efectivo de Diésel**

<b>MODO</b>	<b>%Δ_DIESEL 10% [-]</b>	<b>%Δ_DIESEL 20% [-]</b>	<b>%Δ_DIESEL 30% [-]</b>
<b>1</b>	8,81%	17,35%	24,20%

<b>2</b>	7,79%	15,74%	20,03%
<b>3</b>	7,37%	13,54%	18,33%
<b>4</b>	4,67%	11,54%	16,07%

## 2. Emisiones:

- Concentración de CO2: Independientemente de la carga, se observa una reducción sostenida de las emisiones de dióxido de carbono a medida que se aumenta el reemplazo de diésel. Obteniendo la mayor reducción para el modo 1 con 30% de sustitución, donde se obtuvo una disminución relativa del 31% de las emisiones de CO2 con el caso base:

**Tabla 10. Mediciones CO2**

<b>MODO</b>	<b>CO2 0% (%)</b>	<b>CO2 10% (%)</b>	<b>CO2 20% (%)</b>	<b>CO2 30% (%)</b>
<b>1</b>	7,088	5,358	5,097	4,892
<b>2</b>	5,629	5,018	4,790	4,374
<b>3</b>	4,281	4,276	4,068	3,736
<b>4</b>	2,774	2,659	2,487	2,294

- Concentración de NOx: Las mediciones de este parámetro en el caso de plena carga muestran la tendencia de aumentar junto con el nivel de reemplazo, entendiéndose ésta a partir de la posible mayor temperatura desarrollada en el frente de llama por la combustión de hidrogeno. Para el caso del modo 4 se observa que la adición de hidrógeno reduce considerablemente las emisiones de NO, alcanzando cerca de un 47% de reducción en el caso de máximo reemplazo. Mientras que, para el modo 3, las emisiones se reducen levemente hasta un 2% con un 20% de sustitución, para luego aumentar hasta un 4% para el caso de máxima sustitución. Esto podría evidenciar un punto de quiebre cercano a estas condiciones en las cuales se produce un aumento de las emisiones de NOx que puede ser motivo de estudios para posibles análisis futuros:

**Tabla 11. Mediciones NOx**

MODO	NO 0% (PPMVOL)	NO 10% (PPMVOL)	NO 20% (PPMVOL)	NO 30% (PPMVOL)
1	719,2	735,4	749,7	798,3
2	659,1	668,2	683,8	719,6
3	492,8	491	483,6	511
4	256,8	176,3	159,6	135,4

- Concentración de O<sub>2</sub>: La concentración de oxígeno en los gases de escape se mantuvo similar a la observada en la operación de línea base con aumentos leves a mayores niveles de carga. Esto se explica debido a que la combustión de hidrógeno modifica drásticamente la humedad de los gases producto y estas mediciones son realizadas en base seca, por lo que, al haber un aumento sostenido de la razón de equivalencia con la adición de hidrógeno.

**Tabla 12. Mediciones O<sub>2</sub>**

MODO	O <sub>2</sub> 0% (%)	O <sub>2</sub> 10% (%)	O <sub>2</sub> 20% (%)	O <sub>2</sub> 30% (%)
1	11,436	12,893	12,639	12,511
2	13,563	14,502	14,526	14,496
3	15,469	14,634	14,758	14,914
4	17,298	17,268	17,30	17,30

- Opacidad: Las mediciones obtenidas de la opacidad presentaron una variabilidad que no permite concluir a partir del valor de estos. La tendencia general es a disminuir a medida que se aumenta la adición de hidrógeno, con la hipótesis de que el efecto en el caso de baja carga presenta mayor variabilidad debido a que el valor es lo suficientemente bajo para entrar en el umbral de error de medición del equipo utilizado, mientras que, a media y plena carga, se aprecia un efecto más real del fenómeno, ya que los valores se encuentran dentro del rango medible.

**Tabla 13. Mediciones Opacidad**

MODO	OPACIDAD 0% (M <sup>-1</sup> )	OPACIDAD 10% (M <sup>-1</sup> )	OPACIDAD 20% (M <sup>-1</sup> )	OPACIDAD 30% (M <sup>-1</sup> )
1	1	0,8	0,63	0,55
2	0,24	0,24	0,22	0,2
3	0,13	0,1	0,08	0,08

3. Seguridad y Autonomía:

- Seguridad: A partir de los gráficos presentes en el anexo 5, ensayos hechos con anterioridad en el mismo motor [5] evidenciaron que se provocan “Contrafuegos” (Backfires) en la línea de hidrógeno para una sustitución energética sobre el 40% en los ciclos de carga de los Modos 1 y 2. Sin embargo, al trabajar con una sustitución de máximo un 30% no se debieran provocar dichos inconvenientes. Además, se registraron las temperaturas del aire de admisión, refrigerante, agua a la salida del intercambiador de calor, gases de escape y aceite. Dónde no se evidenciaron mayores aumentos de temperatura que pudiese afectar a la operación o dañar los componentes internos del motor:

**Tabla 14. Mediciones de Temperaturas**

MODO	CASO	T° REFRIG (°C)	T° AG. SAL (°C)	T° GAS ESC (°C)	T° AIR AD (°C)	T° ACEITE (°C)
1	Base	83,24	28,32	363,69	79,99	106,88
1	10%	85,96	28,21	369,81	78,98	105,66
1	20%	85,51	28,31	370,2	79,83	106,38
1	30%	85,98	28,28	370,55	79,5	106,17
2	Base	75,03	25,76	278,12	63,15	96,68
2	10%	78,22	26,68	281,4	64,14	97,66
2	20%	78,3	26,72	287,84	64,2	97,9
2	30%	78,34	26,74	285,98	64,16	97,98
3	Base	67,61	23,66	207,57	51,03	90,08
3	10%	70,36	23,64	212,5	50,22	91,4
3	20%	70,22	23,54	217,54	49,76	91,44
3	30%	70,08	23,74	222,42	50,16	91,14
4	Base	63,27	21,88	146,98	42,35	84,26
4	10%	65,17	21,26	146,95	39,88	83,53
4	20%	65,52	21,46	146,95	40,99	83,61
4	30%	65,24	21,28	145,12	39,44	83,2

- Autonomía: Se calculó cuantas horas de autonomía tendría la lancha según la capacidad de los estanques de combustible diésel y el consumo obtenido experimentalmente para la máxima condición de

carga. A partir de esto, se calcula cuanto hidrógeno debe almacenar según el máximo caudal calculado (30% de H<sub>2</sub>) para satisfacer las mismas horas de autonomía:

**Tabla 15. Capacidades Lancha de referencia**

<b>Lancha</b>	<b>Capacidad de Diésel (L)</b>	<b>Horas de autonomía</b>	<b>Capacidad de H<sub>2</sub> (L)</b>
<b>Beneteau Antares 6.80</b>	136	20,25	510,0937672

- Estanques de H<sub>2</sub>: Conforme a lo calculado anteriormente, se necesitan 510 (L) de H<sub>2</sub> a 350 (bar) (12 kg de H<sub>2</sub> aprox.) para satisfacer las 20,25 horas de autonomía que tendría la lancha operando únicamente con diésel, para lo cual se propone el uso de los siguientes estanques de referencia FORVIA [44] (2 estanques a 350 [bar] de 210 litros):

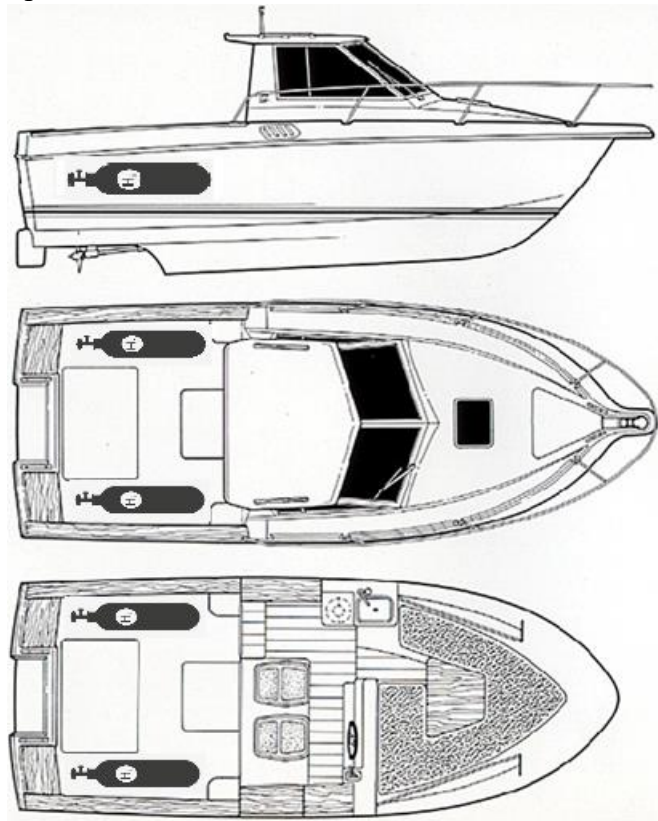
**Tabla 16. Especificaciones Cilindro de H<sub>2</sub> [44]**

<b>Marca</b>	<b>FORVIA</b>
<b>Tipo de Depósito</b>	3
<b>Tipo de Montaje del Depósito</b>	Strap
<b>Presión Nominal Operativa</b>	350 (bar)
<b>Volumen de Agua Equivalente</b>	210 (L)
<b>Diámetro</b>	407 (mm)
<b>Largo</b>	2096 (mm)
<b>Almacenamiento Máximo de H<sub>2</sub></b>	5 (kg)
<b>Válvula sobre Depósito Incluida</b>	Si
<b>Conforme con</b>	GB/T 35544 (R134 planned)



**Figura 9. Imagen de Referencia Cilindro FORVIA [44]**

- Disposición de los estanques en la embarcación: la lancha de referencia tiene 6,48 (m) de eslora y 2,5 (m) de manga [48], por lo que dispone de espacio suficiente para la instalación de los estanques de H<sub>2</sub> en la cubierta inferior de la zona posterior de la embarcación (Coloquialmente conocido como “popa”) tal como se muestra en el siguiente plano:



**Figura 10. Planos de lancha con estanques de H<sub>2</sub> instalados [48]**

#### 4. Eficiencia Energética:

- Eficiencia energética de la Combustión: La eficiencia térmica se vio afectada negativamente por la adición de hidrógeno. En todos los casos se aprecian disminuciones de esta al aumentar la cantidad de hidrógeno inyectado, siendo el más crítico en carga baja (Modo 4) donde la eficiencia térmica tuvo una disminución relativa del 14%. Este resultado podría indicar que la adición de pequeñas cantidades provoca que la concentración molar del hidrógeno se encuentre bajo el límite de encendido, lo que se traduce en la incapacidad de combustión de la mezcla adecuadamente, emitiéndose hidrógeno sin quemar en los gases de escape. En el caso de plena y media carga, las concentraciones de hidrógeno están en la mayoría de los casos sobre el límite de encendido y bajo el de inflamabilidad, facilitando una correcta combustión de la mezcla y teniendo una reducción relativa de la eficiencia cercano a un 2%.

**Tabla 17. Mediciones de Eficiencia Energética**

<b>MODO</b>	<b><math>\eta</math> 0% [-]</b>	<b><math>\eta</math> 10% [-]</b>	<b><math>\eta</math> 20% [-]</b>	<b><math>\eta</math> 30% [-]</b>
<b>1</b>	38,73%	38,01%	37,55%	36,66%
<b>2</b>	38,34%	37,83%	37,09%	35,30%
<b>3</b>	35,48%	34,47%	33,95%	32,39%
<b>4</b>	28,83%	26,94%	26,51%	24,80%

### 5.1.1 Análisis de Resultados de Ensayos en Laboratorio

De los resultados obtenidos en laboratorio se destacan las siguientes observaciones:

- Se identifica una disminución en el consumo específico de combustible para todos los casos, aumentando a mayor porcentaje de sustitución de H<sub>2</sub> y teniendo un mayor ahorro relativo para altas cargas (Modos 1 y 2).
- A nivel de emisiones, se evidencia una clara tendencia clara de disminución de CO<sub>2</sub> de hasta un 31% y Opacidad de un 45% en máxima carga y mayor porcentaje de H<sub>2</sub>. Pero un leve aumento de NO<sub>x</sub> a altas cargas, donde se obtuvo un aumento relativo de casi un 11%. No se evidencian diferencias significativas en las emisiones de O<sub>2</sub>

- La adición de hidrógeno hasta un 30% no provoca aumentos considerables en la temperatura de gases de escape ni contrafuegos en la línea de hidrógeno, por lo que no debería representar ningún riesgo para la operación normal del motor ni afectar a sus componentes internos.
- Se necesitan 2 estanques de 210 (L) a 350 (bar) para cubrir la mayor cantidad de horas de autonomía de la embarcación sin sobrepasar las restricciones físicas de la embarcación. Sin embargo, esto no descarta la posibilidad de utilización de menos estanques (o estanques de menor capacidad) en caso de haber mayor posibilidad de reabastecimiento a costa de menos horas de autonomía de hidrógeno.
- Se identifican leves disminuciones de la eficiencia térmica ( $\eta_t$ ) en todos los casos, siendo el caso más crítico en el modo 4 (25% de carga) con una disminución relativa de hasta un 11% en comparación con el caso base.
- Los resultados obtenidos siguen las mismas tendencias que los casos de referencia estudiados ([5], [30], [32], [31]) en materia de emisiones, rendimiento eficiencia y consumo, con la particular diferencia en el ahorro efectivo de combustible ( $\% \Delta_{diesel}$ ) ya que este parámetro varía para cada motor dependiendo de su potencia. Por lo que para cada caso particular es de suma importancia realizar ensayos que permitan conocer este valor, ya que será relevante para el análisis económico.
- Si bien en este caso el hidrógeno se inyecta antes de la etapa de sobrealimentación, esto se hizo por recomendación de los encargados del laboratorio donde se realizaron las pruebas, pero no descarta la posibilidad de inyectar el hidrógeno después de la etapa de sobrealimentación o realizar una inyección directa en la cámara de combustión.
- Una de las principales ventajas de un sistema dual Diesel-Hidrógeno en comparación a una conversión a 100% de hidrógeno o fuel-cell es que, aparte de implicar una intervención mínima, en caso de que la autonomía del hidrógeno no sea suficiente la lancha pueda operar con solo diésel convencional como lo venía haciendo hasta ahora.

- El proveedor de la lancha de referencia no entrega un peso límite para la embarcación, por lo que esta variable quedaría pendiente por confirmar. En caso de sobrepasar el límite, se recomienda encarecidamente instalar estanques de menor capacidad con menor peso
- Las válvulas reguladoras de caudal de hidrógeno y diésel instalados en la lancha deberán ser automáticos, de forma que la intervención del operador y el equipo embarcado sea mínima y no requieran de alguna capacitación previa en materia del funcionamiento general de la conducción de la lancha, sino más bien relacionadas con una cultura de seguridad.

## 5.2 Evaluación Económica

Para analizar económicamente el proyecto, se realizó tanto un flujo de caja para los diferentes porcentajes de sustitución, como un cálculo del LCOME. Considerando como costo de compra del hidrógeno el compartido por GNL Quintero [41], ya que podría ser un potencial proveedor de combustible si se realizara las operaciones de la embarcación en dicha zona, además de las proyecciones de los precios según la IEA [28]. También, se tendrán en cuenta ciertas consideraciones para que haga sentido económico realizar la conversión, las cuales son:

- Para cada porcentaje de sustitución se asignará un costo de inversión y operación acorde a las modificaciones a realizar (A mayor porcentaje de sustitución, mayor será el gasto asociado).
- El motor opera en la carga máxima obtenida mediante el freno dinamométrico obtenido experimentalmente = 35,4 (kW).
- Horizonte máximo de estudio = 10 años desde modificación (Vida útil de estanques según SII [49]).
- Consumo de combustible al año de la lancha  $Q_{comb} = 60000 \left( \frac{L}{Año} \right)$ .
- Precios del diésel e hidrogeno se considerarán en USD/kg y se mantendrán estables a partir del 5° año.

- Se utilizarán los resultados obtenidos experimentalmente para el ahorro efectivo de combustible diésel para cada porcentaje.
- En los años en que los ahorros monetarios son negativos, se optará por no usar el sistema de hidrógeno para no incurrir en gastos mayores a los del mantenimiento del sistema.
- Se considerará una tasa de descuento del 10%.

Para evaluar los potenciales beneficios económicos, se considerará como “Ingresos” el ahorro monetario ( $\Delta$ \$) obtenido mediante la Ec.(7), el cual representa la diferencia entre los gastos en combustible convencional (Diésel) y el que tendría con combustible dual (Diésel–Hidrógeno) para un mismo año. Utilizando como precios de referencia y proyección los indicados inicialmente por las referencias bibliográficas ([1], [41]) dónde el ahorro porcentual producto de la conversión para cada caso proyectado a 10 años se resume en la Tabla 18:

**Tabla 18. Ahorro Monetario Para Cada Caso**

<b>AÑO</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5+</b>
<b>PRECIO DIÉSEL (USD/KG)</b>	1,0	1,2	1,4	1,6	1,6	1,6
<b>PRECIO DEL H2 (USD/KG)</b>	3	2,8	2,5	2	1,5	1
<b>% DE SUSTITUCIÓN</b>						
<b>30%</b>	-8,23%	-1,03%	4,89%	12,04%	14,06%	17,44%
<b>20%</b>	-4,32%	0,48%	4,43%	9,19%	10,54%	12,80%
<b>10%</b>	-2,00%	0,40%	2,37%	4,76%	5,43%	6,56%

Luego, se considerarán los costos de inversión y operaciones estimados del sistema asociados a cada porcentaje de sustitución, cuyo desglose se presenta en la Tabla 19, Cabe destacar que los precios fueron compartidos mediante cotizaciones hechas por proveedores privados de carácter confidencial, por lo que dichos precios pueden variar para cada caso:

**Tabla 19. CAPEX y OPEX del Proyecto**

<b>% DE SUSTITUCIÓN:</b>	<b>30%</b>	<b>20%</b>	<b>10%</b>
<b>CAPEX (USD)</b>			
<b>CAPACITACIÓN DE PERSONAL</b>	\$1500	\$1500	\$1500

<b>TANQUES DE H2</b>	\$12000	\$8000	\$4000
<b>RETROFIT E INSTALACIÓN</b>	\$3000	\$2000	\$1500
<b>TOTAL CAPEX</b>	<b>\$16500</b>	<b>\$11500</b>	<b>\$7000</b>
<b>OPEX (USD/AÑO)</b>			
<b>MANTENIMIENTO ANUAL</b>	\$2000	\$1500	\$1000
<b>OTROS</b>	\$1000	\$800	\$500
<b>TOTAL OPEX ANUAL</b>	<b>\$3000</b>	<b>\$2300</b>	<b>\$1500</b>

### 5.2.1 LCOME para los 3 casos

El cálculo del LCOME se realizó dividiendo el costo total actualizado (suma del CAPEX inicial, el valor presente de todos los OPEX anuales y los gastos en combustible durante el período de estudio) entre la energía total generada, y la tasa de descuento durante la vida útil del proyecto para cada escenario (30%, 20%, 10% y base). Donde se calculó el costo total de funcionamiento de los 4 casos para generar la misma cantidad de energía mecánica anual de 237,14 (MWh/año).

Tabla 20. Comparación LCOME de los Sistemas de H2

Escenario	CAPEX Anual	OPEX fijo (USD/10 años)	Gasto en Combustible (USD/10 Años)	OPEX Total Anual (USD)	LCOME (USD/MWh)	Ahorro respecto caso base
<b>Diésel Puro</b>	\$0	0	836400	\$83640	\$353	0%
<b>10%</b>	\$7000	15000	535342	\$55034	\$237	32,8%
<b>20%</b>	\$11500	23000	511479	\$53448	\$233	33,9%
<b>30%</b>	\$16500	30000	496536	\$52654	\$233	33,8%

### 5.2.2 Resultados Flujo de Caja

El LCOME no tiene en consideración ciertos parámetros importantes como la depreciación, la amortización o el valor residual asociados a la conversión de un sistema a combustible dual. Por lo mismo, es importante realizar este análisis para conocer el VAN y TIR de un proyecto de este estilo, cómo también para conocer los flujos anuales detallados y ver los potenciales beneficios económicos con los riesgos

asociados, El flujo de caja completo para cada escenario se adjunta en los Anexos considerando como inversión inicial ( $I_0$ ) el CAPEX del proyecto, cuyo resumen general de los parámetros obtenidos para cada caso de estudio se presenta en la siguiente Tabla:

**Tabla 21. Resumen Flujo de Caja del Proyecto**

Modificación Lancha Antares 6.80 (USD)			
% de Sustitución	Inversión	VAN	TIR
30%	\$16.500	\$6.025	14%
20%	\$11.500	\$5.739	15%
10%	\$7.000	\$103	10%

### 5.2.1 Análisis de Resultados de Evaluación Económica

De los resultados obtenidos en la evaluación Económica se destaca lo siguiente:

- El análisis económico evidencia que un 30% de sustitución presenta las mejores ganancias, pero a un mayor riesgo al requerir una mayor inversión inicial. Mientras que el 20% presenta el mejor retorno sobre la inversión inicial, pero menores ganancias finales. Por último, el caso del 10% de sustitución no presentó ningún potencial ahorro ni pérdidas económicas considerables, sin embargo, podría resultar interesante para una empresa que quisiera disminuir su huella de carbono a bajo riesgo, ya que los costos de inversión son mucho menores a los otros 2 casos.
- El costo nivelado de la energía es más bajo para todos los casos de sustitución con hidrógeno en comparación al diésel, teniendo una disminución relativa cercano a un 33% para todos los casos. Lo cual destaca que no hay una mayor diferencia en el costo nivelado de la energía para los 3 casos de sustitución, y que las verdaderas rentabilidades de un sistema de este estilo se evidencian al considerar la depreciación, amortización y valor residual del sistema de inyección de hidrógeno.
- No es recomendable escalar el proyecto más allá de un piloto durante, al menos, los próximos 2 años, hasta que se evidencien diferenciales positivos en el ahorro de combustible que justifiquen la modificación, es decir, cuando  $\Delta\$ > 0$ .

Siendo este el factor determinante para realizar la conversión, ya que un diferencial positivo indica que utilizar la mezcla de combustible conlleva a ahorros monetarios en comparación a la operación con el consumo 100% de diésel (ya que no tendría sentido tener instalado un sistema de hidrógeno que no se utilice). Esto ocurre cuando la relación entre los precios de diésel e hidrógeno es 1 a 2 (por ejemplo, cuando el diésel esté a 1 \$USD/kg y el hidrógeno esté a 2 \$USD/kg).

- La rentabilidad del proyecto es directamente dependiente de la cantidad de combustible que consuma la lancha, por lo que no se justifica económicamente realizar la conversión en una lancha de poco uso o poco consumo.
- La metodología realizada en el análisis económico puede ser replicada para cualquier lancha con un motor de distinta potencia y distinto consumo de combustible variando los CAPEX, OPEX según sea el caso, Sin embargo, es obligatorio conocer previamente cuánto es el ahorro efectivo de combustible diésel del motor al inyectarle hidrógeno mediante ensayos en laboratorio, ya que este valor puede variar
- Se requiere un análisis más exhaustivo respecto de la cantidad de estanques de hidrógeno que se pueden instalar en la embarcación y el costo asociado, ya que su volumen y autonomía dependen exclusivamente de la presión de almacenamiento del estanque y la disponibilidad de hidrógeno de proveedores cercanos. Se debe analizar si es más rentable instalar tanques de menor presión a menor costo, pero con menor autonomía, o tanques más caros con mayor presión, pero con una mayor autonomía.
- La reducción de emisiones podría contribuir al cumplimiento de normativas ambientales cada vez más estrictas de forma fácil y rápida para una empresa, lo cual puede ser un incentivo adicional para su instalación, como también optar a líneas de financiamiento relacionados con descarbonización.
- Al ser un proyecto de investigación y desarrollo sin precedentes, una empresa podría optar a medios de financiamiento que reduzcan considerablemente los costos de inversión para la modificación de una lancha piloto. Lo cual volvería más interesante y factible realizar la conversión en el presente.

- A la hora de realizar la conversión en la lancha, no se deben considerar costos asociados a los equipos de medición durante la experimentación como el banco dinamométrico, analizador de gases, opacímetro, entre otros.

### 5.3 Análisis de Sensibilidad de los Resultados

Cómo último análisis, cabe destacar que los resultados obtenidos se plantean en un escenario específico en el que se logren los objetivos de la estrategia nacional del hidrógeno verde ([2], [14], [50]), aumenten los precios del diésel según las tendencias [3], no disminuya el consumo de combustible anual y se cumplan los costos previstos para los CAPEX y OPEX. Sin embargo, el proyecto es directamente dependiente de estas variables que podrían afectar negativamente las rentabilidades, por lo que resulta interesante tener en consideración que tan susceptibles son los valores a posibles fluctuaciones en estas 5 variables (teniendo en cuenta las mismas consideraciones iniciales).

- **Consumo de Combustible de la Lancha:** Cómo se mencionó anteriormente, los potenciales beneficios económicos del proyecto son directamente proporcionales a la cantidad de combustible que consume la lancha, en la Tabla 22. se presenta la variación de los VAN y TIR en función del consumo de combustible al año para los 3 niveles de sustitución, que evidencia la disminución paulatina de las ganancias en función de un menor consumo, del mismo modo, si una lancha consume más combustible, resulta aún más interesante realizar la conversión ya que presenta mejores ganancias.

**Tabla 22. Sensibilidad Consumo de Combustible**

Consumo de Combustible (L/Año)	% de Sustitución								
	10%			20%			30%		
	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOME	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOME	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOME
80000	19%	\$6.005	33,6%	24%	\$17.151	35,1%	22%	\$21.165	35,5%
75000	17%	\$4.530	33,5%	22%	\$14.298	34,86%	20%	\$17.380	35,20%
70000	15%	\$3.054	33,3%	20%	\$11.445	34,57%	18%	\$13.595	34,81%
65000	12%	\$1.579	33,1%	18%	\$8.592	34,24%	16%	\$9.810	34,36%
<b>60000</b>	<b>10%</b>	<b>\$103</b>	<b>32,8%</b>	<b>15%</b>	<b>\$5.739</b>	<b>33,9%</b>	<b>14%</b>	<b>\$6.025</b>	<b>33,8%</b>
55000	8%	-\$1.372	32,6%	13%	\$2.885	33,41%	12%	\$2.239	33,22%
50000	5%	-\$2.847	32,2%	10%	\$32	32,86%	9%	-\$1.546	32,48%
45000	2%	-\$4.323	31,8%	7%	-\$2.821	32,20%	6%	-\$5.331	31,57%
40000	-2%	-\$5.798	31,3%	4%	-\$5.674	31,37%	3%	-\$9.116	30,44%

35000	-5%	-\$7.274	30,6%	0%	-\$8.527	30,30%	-1%	-\$12.901	28,98%
-------	-----	----------	-------	----	----------	--------	-----	-----------	--------

De la tabla se aprecia que el caso del 10% de sustitución es el que se ve más afectado por este factor, ya que presenta valores negativos del VAN cuando el consumo de combustible está por debajo de los 55000 (L/año), siendo el caso que requiere un mayor consumo anual de combustible para que la inversión inicial resulte rentable. Al ser el consumo de combustible una variable que puede ser medible y controlada por una empresa es de suma importancia contar con este valor para realizar un estudio particular. Cabe destacar que no se evidencia un efecto considerable de esta variable en los ahorros de LCOME, esto se debe a que una disminución del consumo de combustible (menor OPEX) es directamente proporcional a una disminución en la cantidad de energía entregada por el sistema, por lo que se amortigua dicho valor y no provoca cambios considerables, salvo para el caso del 30% de sustitución ya que al tener CAPEX mayores es mucho más susceptible.

- **Variación del Precio del Diésel:** Anteriormente se consideró un aumento del precio del diésel de hasta un 60% en comparación al caso actual. En la siguiente tabla se aprecia como afectarían dichas fluctuaciones a los indicadores económicos del proyecto (Asumiendo la misma disminución del precio del H2):

**Tabla 23. Sensibilidad Precio de Combustible Diésel**

Aumento de Precio del Diésel (USD/kg)	% de Sustitución								
	10%			20%			30%		
	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOM E	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOM E	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOM E
Hasta 2	16%	\$4.456	42,2%	21%	\$14.287	43,7%	20%	\$17.982	43,4%
Hasta 1,8	14%	\$2.534	38,2%	19%	\$10.511	39,8%	18%	\$12.700	39,36%
<b>Hasta 1,6</b>	<b>10%</b>	<b>\$103</b>	<b>32,8%</b>	<b>15%</b>	<b>\$5.739</b>	<b>33,9%</b>	<b>14%</b>	<b>\$6.025</b>	<b>33,8%</b>
Hasta 1,4	5%	-\$2.885	25,4%	10%	-\$129	26,8%	8%	-\$2.183	26,08%
Hasta 1,2	-3%	-\$6.486	14,7%	2%	-\$7.202	15,8%	0%	-\$12.077	14,67%
Mantiene en 1	-13%	-\$10.204	-1,7%	-8%	-\$14.247	-1,0%	-10%	-\$20.986	-3,23%

Para todos los casos de sustitución se ve un efecto considerable tanto en el VAN como en el TIR que dejan de ser rentables para proyecciones de precios menores a 1,6 (USD/kg), siendo el caso más crítico el de 30% de sustitución que puede llegar a generar pérdidas monetarias de hasta \$20.986 (USD). Sin embargo, así como presenta alto riesgo, también se pueden obtener ganancias considerables, y al ser Chile un país tan propenso a las fluctuaciones en los

precios internacionales de los combustibles no es de extrañar que en un futuro los precios pudiesen llegar a aumentar incluso más de lo esperado. Cabe destacar que este parámetro es también el que más afecta a los valores de ahorros de LCOME, principalmente debido a que en el cálculo del LCOME para el caso base no se consideró ningún tipo de CAPEX ni OPEX además del consumo de combustible, siendo el parámetro principal que produce su aumento o disminución relativa.

- **Variación del Precio del Hidrógeno:** Del mismo modo que para los precios del Diésel, se consideró que los precios de H2 disminuyen hasta 1 (USD/kg) siempre y cuando se disponga de un proveedor en la zona que minimice los costos de producción, conversión y transporte del Hidrógeno. Proyectando en la siguiente tabla cómo afectaría al sistema las posibles variaciones en el costo de compra de este combustible:

**Tabla 24. Sensibilidad Precio de Combustible H2**

Disminución de Precio del H2 (USD/kg)	% de Sustitución								
	10%			20%			30%		
	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOME	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOME	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOME
Hasta 0,5	16%	\$4.180	33,5%	22%	\$13.892	35,7%	21%	\$17.783	35,9%
Hasta 0,8	15%	\$2.793	33,2%	20%	\$11.118	35,2%	19%	\$13.621	35,06%
<b>Hasta 1</b>	<b>10%</b>	<b>\$103</b>	<b>32,8%</b>	<b>15%</b>	<b>\$5.739</b>	<b>33,9%</b>	<b>14%</b>	<b>\$6.025</b>	<b>33,8%</b>
Hasta 1,5	7%	-\$1.863	32,4%	12%	\$1.806	33,6%	10%	\$126	32,60%
Hasta 1,8	3%	-\$3.354	32,1%	9%	-\$1.176	33,0%	6%	-\$4.347	31,74%
Hasta 2,5	-8%	-\$7.632	31,4%	-4%	-\$9.732	31,3%	-9%	-\$17.181	29,43%

En este escenario nuevamente el primer caso que se ve afectado sería el de 10% de sustitución, ya que presentaría los primeros retornos negativos si los costos de compra no disminuyen hasta 1 USD/kg de H2, dónde el caso más riesgoso nuevamente sería el de 30% de sustitución, ya que, si bien presenta rentabilidades hasta 1,5 USD/kg, si baja de este valor es el que presenta el VAN más bajo de todos. A diferencia de los precios del diésel, las fluctuaciones en los precios del hidrógeno no afectarían mucho en los ahorros de LCOME debido a que, para todos los porcentajes de sustitución, el motor sigue consumiendo mayoritariamente diésel.

- **Variación de los CAPEX y OPEX:** Los CAPEX y OPEX consideraron precios de referencia de proveedores particulares que hacen cotizaciones privadas para cada caso (dependiendo de costo de transporte, impuestos, entre otros.) por lo que pueden variar ambos para cada caso, lo ideal es que conforme vayan mejorando las tecnologías de almacenamiento de Hidrógeno, los costos de inversión y mantención del sistema de inyección de H2 disminuyan, pero también es necesario ver que ocurre si dichos precios aumentan como se aprecian en las siguientes tablas:

**Tabla 25. Sensibilidad CAPEX**

Valor de CAPEX (USD)	% de Sustitución								
	10%			20%			30%		
	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOM E	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOM E	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOM E
+100%	2%	-\$5.767	31,5%	6%	-\$6.003	32,2%	4%	-\$11.588	30,6%
+80%	4%	-\$4.593	31,7%	7%	-\$3.655	32,6%	6%	-\$8.065	31,27%
+60%	5%	-\$3.419	32,0%	9%	-\$1.306	33,0%	7%	-\$4.543	31,91%
+40%	7%	-\$2.245	32,3%	11%	\$1.042	33,5%	9%	-\$1.020	32,55%
+20%	8%	-\$1.071	32,6%	13%	\$3.390	33,9%	12%	\$2.502	33,19%
<b>Base</b>	<b>10%</b>	<b>\$103</b>	<b>32,8%</b>	<b>15%</b>	<b>\$5.739</b>	<b>33,9%</b>	<b>14%</b>	<b>\$6.025</b>	<b>33,8%</b>
-20%	12%	\$1.278	33,1%	18%	\$8.087	34,8%	17%	\$9.547	34,48%
-30%	13%	\$1.865	33,2%	20%	\$9.261	35,1%	18%	\$11.308	34,80%
-50%	16%	\$3.039	33,5%	23%	\$11.609	35,5%	22%	\$14.831	35,44%

**Tabla 26. Sensibilidad OPEX**

Valor de OPEX (USD)	% de Sustitución								
	10%			20%			30%		
	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOME	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOME	TIR (%)	VAN (USD)	Ahorro LCOME
+100%	-4%	-\$8.275	31,0%	3%	-\$7.109	31,6%	3%	-\$10.733	30,2%
+80%	-1%	-\$6.600	31,4%	6%	-\$4.540	32,2%	5%	-\$7.382	30,97%
+60%	2%	-\$4.924	31,8%	8%	-\$1.970	32,7%	7%	-\$4.030	31,68%
+40%	5%	-\$3.248	32,1%	11%	\$600	33,3%	10%	-\$679	32,40%
+20%	7%	-\$1.572	32,5%	13%	\$3.169	33,8%	12%	\$2.673	33,12%

<b>Base</b>	<b>10%</b>	<b>\$103</b>	<b>32,8%</b>	<b>15%</b>	<b>\$5.739</b>	<b>33,9%</b>	<b>14%</b>	<b>\$6.025</b>	<b>33,84%</b>
-20%	13%	\$1.779	33,2%	18%	\$8.308	34,9%	16%	\$9.376	34,55%
-30%	14%	\$2.617	33,4%	19%	\$9.593	35,2%	17%	\$11.052	34,91%
-50%	17%	\$4.293	33,7%	21%	\$12.163	35,8%	20%	\$14.403	35,63%

Las tendencias para ambos parámetros son bastante similares, en las cuales, una vez más, el escenario del 10% presentaría las primeras pérdidas monetarias si aumentase un 20% del valor considerado inicialmente, y el 30% las mayores pérdidas si los CAPEX y OPEX aumentaran al doble del precio de referencia estipulado. Del mismo modo, las variaciones de ahorro del LCOME fueron mínimas debido a que los costos de CAPEX y OPEX asociados al sistema de inyección terminan siendo marginales en comparación a los costos asociados al consumo de combustible.

De este análisis se observa que todos los casos siguen las mismas tendencias ante las variabilidades de los parámetros estudiados, siendo el caso del 10% cuyas rentabilidades se verían afectadas primero ante una mínima variación negativa, pero sin representar pérdidas considerables en los peores casos posibles. A diferencia del caso del 30% que, si bien presenta las mejores ganancias y retornos en los mejores casos posibles, también presenta las peores pérdidas potenciales, lo cual lo vuelve una inversión riesgosa a costa de mayores ingresos. Mientras que el caso del 20% el que presenta un mejor balance en cuanto a riesgo-beneficio en comparación.

Por último, cabe destacar que el parámetro más sensible corresponde a la variación en el precio del diésel, y esto se debe principalmente a que, si bien los sistemas de inyección pueden tener un alto costo asociado, durante un horizonte de estudio de 10 años el mayor gasto y consumo sigue siendo el de combustible mayoritariamente diésel, siendo esto lo que provoca la mayor diferencia en el LCOME.

---

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

---

La investigación presentada en el informe propone la metodología necesaria para evaluar la factibilidad técnica y económica del uso de gas hidrógeno comprimido como combustible dual en motores diésel marinos de lanchas de transporte liviano, abordando aspectos técnicos asociados al consumo, rendimiento y emisiones contaminantes, como también aspectos económicos asociados a los costos de inversión y operación. Se destaca de los registros bibliográficos que la inclusión de hidrógeno puede contribuir a una disminución del consumo de combustible diésel, así como a una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> y HC. Además, los proyectos que se están desarrollando a nivel país vuelven esta tecnología bastante competitiva en comparación a los combustibles tradicionales si se lograsen los objetivos planteados en la estrategia nacional del hidrógeno verde.

Sin embargo, el análisis también expone desafíos relacionados con el aumento de las emisiones de NO<sub>x</sub> (asociado a las temperaturas más elevadas en la cámara de combustión), la reducción de la eficiencia térmica de la combustión para bajos niveles de carga y los riesgos inherentes al manejo del hidrógeno, como su alta inflamabilidad y potenciales fugas. Como también su baja aplicación en embarcaciones más allá de proyectos piloto, la falta de mayores análisis de costo-efectividad y las limitadas investigaciones que profundicen los costos asociados que tendría realizar la conversión. Lo que evidencia la necesidad de realizar estudios normados que permitan cuantificar con mayor precisión los efectos del H<sub>2</sub> en diferentes condiciones operativas, teniendo en consideración tanto las restricciones físicas de la propia embarcación, como aquellos costos asociados que impliquen realizar una modificación.

En este caso, la metodología propuesta, siguiendo la norma ISO 8178-4 Ciclos tipo E2, permitió evaluar con mayor detalle el comportamiento del sistema, ya que esta simula los ciclos a los que estaría sometido un motor marino en condiciones dinámicas en operaciones portuarias. Permitiendo obtener un cálculo acertado del ahorro efectivo de diésel ( $\% \Delta_{\text{diésel}}$ ) que no es posible conocer si no es de forma experimental (ya que es un valor exclusivo dependiendo de la potencia

del motor), siendo este valor crucial para realizar correctamente el análisis económico y calcular el ahorro monetario de combustible (% $\Delta$ \$). Lo cual destaca la importancia de emplear metodologías experimentales robustas que permitan obtener resultados representativos válidos.

Los resultados obtenidos experimentalmente cumplieron con casi todas las tendencias obtenidas e hipótesis hechas por experimentaciones anteriores. Las emisiones de CO<sub>2</sub> y opacidad se redujeron considerablemente en todos los casos, al igual que disminuyó el consumo específico de combustible, siendo máximo en ambos casos para el mayor porcentaje de sustitución (30%) y máxima carga (100%), alcanzando una disminución del 31% de CO<sub>2</sub>, 45% de opacidad y un 22% en el SFC. Sin embargo, del mismo modo que en las referencias bibliográficas estudiadas, se obtuvo una leve disminución de la eficiencia térmica ( $\eta_t$ ) de hasta un 11% relativo, siendo más crítico para bajos porcentajes de carga, y un aumento en las emisiones de NO<sub>x</sub> de hasta un 11% para altos porcentajes de carga.

Particularmente para las emisiones de NO<sub>x</sub>, el motor estudiado es de hace 30 años (1994), cuando no existían mayores regulaciones medioambientales en materia de emisiones, por lo que el motor no cuenta con un filtro catalizador de NO<sub>x</sub> como lo podría ser un NSR (catalizador de almacenamiento-reducción de NO<sub>x</sub>) o sistemas SCR (Reducción Catalítica Selectiva), los cuales sí tienen la mayoría de los motores modernos debido a la regulación de su uso según uso según el DSN°149 del año 2007, por lo que se cuenta con la tecnología necesaria para controlar dicho contaminante, y en caso de replicar los ensayos realizados en esta experiencia en un motor más moderno, se debe verificar si dichos filtros efectivamente logran controlar el contaminante o no, y en el peor de los casos, sería también recomendable utilizar algún tipo de acondicionador para el diésel y ver que efecto tendría en el nivel de emisiones (Cómo por ejemplo AdBlue).

Por otro lado, los resultados económicos evidencian que si bien en el corto plazo no resultaría rentable realizar la conversión (al menos durante los próximos 2 años o hasta que se evidencie un % $\Delta$ \$ positivo), si se llegan a cumplir los objetivos planteados en la estrategia nacional de hidrógeno verde y se logra acercar la producción de hidrógeno a los consumidores para disminuir los costos asociados a la conversión y transporte, en el mediano plazo sería una alternativa más que interesante para descarbonizar el sector marítimo del país. Ya que realizar la conversión a combustible dual puede llegar a representar un ahorro en el

LCOME de un 30% para todos los casos, reducir los gastos asociados al consumo de combustible hasta 6000 USD por embarcación en los casos de máxima sustitución (30%), y de paso, dejar la dependencia a la importación de combustibles fósiles, diversificar la matriz energética del país y reducir la huella de carbono organizacional de empresas del sector marino.

Sin embargo, el análisis de susceptibilidad demuestra que invertir en un proyecto de este estilo puede ser bastante riesgoso de sobrellevar, ya que los resultados económicos obtenidos varían dependiendo de parámetros como el consumo, precios de los combustibles, CAPEX y OPEX, siendo la variable más sensible el precio del diésel, provocando pérdidas económicas de hasta \$20.986 USD y un aumento del LCOME del 3% por embarcación en los casos de máxima sustitución si los precios se mantienen igual a los actuales. Estas variabilidades explicarían por qué los proyectos revisados en los registros bibliográficos no logran escalar más allá de los pilotos y existen pocos estudios relacionados al costo-efectividad del uso de combustible dual, pero conforme a lo estudiado durante el informe, esta situación se debería esclarecer en los próximos años.

En resumen, vistos los resultados generales obtenidos, se concluye que la hipótesis de que sí es técnicamente factible la operación dual diésel-hidrógeno en un motor marino para los 3 niveles de sustitución planteados, destacando que las mejores condiciones de operación se obtuvieron para el caso de plena carga y 30% de reemplazo. Con los desafíos técnicos estudiados que implicaría su posterior implementación en una embarcación piloto en materia de dimensiones, espacio, peso y medidas de seguridad, como también posibles regulaciones futuras a las que podrían ser sometidos los sistemas de inyección de hidrógeno. Pero no es económicamente viable realizar la conversión en el corto plazo debido al alto precio del hidrógeno y de los sistemas de almacenamiento disponibles en la actualidad, pudiendo resultar viable si se cumplen los objetivos y se llevan a cabo los proyectos que se están desarrollando en el país.

Por último, la proyección del proyecto consiste en la planificación y realización de las modificaciones en una lancha piloto *in situ* para comprobar los resultados obtenidos en el laboratorio y el análisis económico propuesto y evaluar la escalabilidad del proyecto más allá del piloto teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas. Se plantean como objetivos futuros la evaluación del uso de acondicionadores de diésel en el sistema que podrían ayudar aún más a

la disminución de gases contaminantes y consumo de combustible, la utilización de válvulas reguladoras de flujo automatizados para minimizar las intervenciones del personal a bordo, y la postulación a potenciales medios de financiamiento que reduzcan los costos de inversión.

Las principales recomendaciones y brechas por cubrir son:

- En el corto plazo, podría resultar interesante estudiar la influencia de otras formas alternativas de inyección de hidrógeno (etapa posterior a la sobrealimentación o inyección directa) para ver si estas afectarían el desempeño del motor o su nivel de emisiones.
- Evaluar la posibilidad de uso de acondicionadores al diésel o mecanismos de reducción de emisiones de NOx, como también la adición de otros tipos de gases combustibles como GNC o NH3
- Los resultados obtenidos en materia de ahorro efectivo de combustible son exclusivos de un motor con una misma potencia, por lo que se debe estudiar cada caso particular para saber cuánto sería el ahorro efectivo de combustible para motores de mayor potencia.
- Reevaluar en el futuro próximo la factibilidad económica una vez esclarecidas las tendencias de los precios de diésel e hidrógeno y consultar con los potenciales proveedores zonales el estado de sus proyectos de producción y venta de hidrógeno.
- Las modificaciones que se realicen, tanto en un motor como en una embarcación, podrían tener posibles impactos en seguros y pólizas, por lo que antes de realizar cualquier modificación se recomienda consultar con el proveedor.
- Del mismo modo que en el punto anterior, antes de realizar cualquier modificación en la lancha piloto es necesario emitir una solicitud de permisos a la DIRECTEMAR para que tenga constancia del proyecto y haga las observaciones que considere pertinente dentro del marco regulatorio.
- Se recomienda realizar una estimación de la duración del retrofit de la lancha piloto, para evaluar cuánto tiempo se tendría que sacar de

operaciones dicha embarcación por las modificaciones, teniendo en consideración que esto podría incurrir en gastos extras para una empresa al tener un activo fuera de servicio.

- Evaluar la escalabilidad más allá del piloto y la replicabilidad hacia el resto de la flota de lanchas.

---

## Referencias

---

- [1] Eduardo Beltrán, “Desafíos y Oportunidades de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.” Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://mirada.fen.uchile.cl/articulo/ver/desafios-y-oportunidades-de-la-estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde>
- [2] G. de C. Ministerio de Energía, “ESTRATEGIA NACIONAL DE HIDRÓGENO VERDE,” Nov. 2020, Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: [https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia\\_nacional\\_de\\_hidrogeno\\_verde\\_-\\_chile.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [3] Comisión Nacional de Energía (CNE), “Precios del diésel en Chile, 04-Ago-2025.” Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: [https://www.globalpetrolprices.com/Chile/diesel\\_prices/](https://www.globalpetrolprices.com/Chile/diesel_prices/)
- [4] M. M. Roy, E. Tomita, N. Kawahara, Y. Harada, and A. Sakane, “An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H<sub>2</sub>-diesel dual-fuel engine,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 844–853, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.009.
- [5] N. Castro, M. Toledo, and G. Amador, “An experimental investigation of the performance and emissions of a hydrogen-diesel dual fuel compression ignition internal combustion engine,” *Appl Therm Eng*, vol. 156, pp. 660–667, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.04.078.
- [6] G. Karim, “Hydrogen as a spark ignition engine fuel,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 5, pp. 569–577, May 2003, doi: 10.1016/S0360-3199(02)00150-7.
- [7] Bosch, “Manual de la técnica del automóvil. Barcelona,” Editorial Reverté.
- [8] ICEX España, “Hidrógeno Verde Chile,” 2024, Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: [https://www.icex.es/content/dam/es/icex/oficinas/105/documentos/2024/08/o-d--el-hidr%C3%B3geno-verde-en-chile%2C-2024/OD\\_EI%20Hidr%C3%B3geno%20Verde%20en%20Chile%202024.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.icex.es/content/dam/es/icex/oficinas/105/documentos/2024/08/o-d--el-hidr%C3%B3geno-verde-en-chile%2C-2024/OD_EI%20Hidr%C3%B3geno%20Verde%20en%20Chile%202024.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [9] Gobierno de Chile, “Plan de Acción de H<sub>2</sub>V Chile.” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.planhidrogenoverde.cl/>

- [10] Alvaro Basagoiti, “Impacto del Precio del Petroleo en Chile.” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: [https://fxglobe.com/es/impacto-del-precio-del-petroleo-en-chile/?utm\\_source=chatgpt.com](https://fxglobe.com/es/impacto-del-precio-del-petroleo-en-chile/?utm_source=chatgpt.com)
- [11] Gabriel Lira, “Precio Combustible Aysen.” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: [https://www.autofact.cl/blog/noticias/autofact/precio-bencina?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.autofact.cl/blog/noticias/autofact/precio-bencina?utm_source=chatgpt.com)
- [12] Mario Nogales, “Aumento Precio Combustible.” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: [https://noticias.coches.com/noticias-motor/precio-combustible-subira-70-de-aqui-a-2030/482055?utm\\_source=chatgpt.com](https://noticias.coches.com/noticias-motor/precio-combustible-subira-70-de-aqui-a-2030/482055?utm_source=chatgpt.com)
- [13] Ministerio de Energía de Chile, “Decreto 13 APRUEBA REGLAMENTO DE SEGURIDAD DE INSTALACIONES DE HIDRÓGENO E INTRODUCE MODIFICACIONES AL REGLAMENTO DE INSTALADORES DE GAS.” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1204465>
- [14] Rainer Schröer and Rodrigo Vásquez, “Proposición de Estrategia Regulatoria del Hidrógeno para Chile .” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: [https://energia.gob.cl/sites/default/files/proposicion\\_de\\_estrategia\\_regulatoria\\_del\\_hidrogeno\\_para\\_chile.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/proposicion_de_estrategia_regulatoria_del_hidrogeno_para_chile.pdf)
- [15] UNCTAD, “Review of maritime transport.” Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: [http://refhub.elsevier.com/S2352-4847\(24\)00726-1/sbref111?](http://refhub.elsevier.com/S2352-4847(24)00726-1/sbref111?)
- [16] UNCTAD, “Review of maritime transport.” Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: [http://refhub.elsevier.com/S2352-4847\(24\)00726-1/sbref112?](http://refhub.elsevier.com/S2352-4847(24)00726-1/sbref112?)
- [17] OMI, “ANNEX INTERIM GUIDELINES FOR THE SAFETY OF SHIPS USING FUEL CELL POWER INSTALLATIONS,” 2023.
- [18] A. Al-Enazi, E. C. Okonkwo, Y. Bicer, and T. Al-Ansari, “A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1962–1985, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.03.036.
- [19] DNV, “Energy Transition Outlook 2023, A Global and Regional Forecast to 2050,” 2024.
- [20] L. Van Hoecke, L. Laffineur, R. Campe, P. Perreault, S. W. Verbruggen, and S. Lenaerts, “Challenges in the use of hydrogen for maritime applications,” *Energy Environ Sci*, vol. 14, no. 2, pp. 815–843, 2021, doi: 10.1039/D0EE01545H.
- [21] B. Parkinson, P. Balcombe, J. F. Speirs, A. D. Hawkes, and K. Hellgardt, “Levelized cost of CO<sub>2</sub> mitigation from hydrogen production

- routes,” *Energy Environ Sci*, vol. 12, no. 1, pp. 19–40, 2019, doi: 10.1039/C8EE02079E.
- [22] N. R. Ammar and N. F. S. H. Alshammari, “Overview of the Green Hydrogen Applications in Marine Power Plants Onboard Ships,” *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, vol. 6, no. 01, Jan. 2018, doi: 10.14741/ijmcr.v6i01.10912.
- [23] S. De-León Almaraz and C. Azzaro-Pantel, “Design and Optimization of Hydrogen Supply Chains for a Sustainable Future,” in *Hydrogen Economy*, Elsevier, 2017, pp. 85–120. doi: 10.1016/B978-0-12-811132-1.00004-3.
- [24] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, “A comparative overview of hydrogen production processes,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 597–611, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.09.044.
- [25] “Sun, P., Elgowainy, A., 2019. Updates of Hydrogen Production from SMR Process in GREET © 2019.” Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: [https://publications.anl.gov/anlpubs/2019/10/156441.pdf#:~:text=The%20hydrogen%20production%20pathways%20using%20steam%20methane,a%20recent%20study%20by%20Sun%20et%20al.&text=The%20median%20CO2%20emissions%20normalized%20for%20SMR,H2%20\(using%20H2%20low%20heating%20value%20%5BLHV%5D\).](https://publications.anl.gov/anlpubs/2019/10/156441.pdf#:~:text=The%20hydrogen%20production%20pathways%20using%20steam%20methane,a%20recent%20study%20by%20Sun%20et%20al.&text=The%20median%20CO2%20emissions%20normalized%20for%20SMR,H2%20(using%20H2%20low%20heating%20value%20%5BLHV%5D).)
- [26] A. Q. Jakhrani, A.-K. Othman, A. R. H. Rigit, and S. R. Samo, “Estimation of carbon footprints from diesel generator emissions,” in *2012 International Conference on Green and Ubiquitous Technology*, IEEE, Jul. 2012, pp. 78–81. doi: 10.1109/GUT.2012.6344193.
- [27] “Adolf, J., Balzer, C.H., Louis, J., Schabla, U., Fishedick, M., Arnold, K., Pastowski, A., Schüwer, D., 2017. Shell Hydrogen Study Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2. Hamburg.” Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: [https://www.shell.de/medien/shell-publicationen/shell-hydrogen-study/\\_jcr\\_content/par/toptasks\\_e705.stream/149,7,968967778](https://www.shell.de/medien/shell-publicationen/shell-hydrogen-study/_jcr_content/par/toptasks_e705.stream/149,7,968967778).
- [28] IEA, “Hydrogen Technology Collaboration Program, 2017. Global Trends and Outlook for Hydrogen.” Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Seyfi\\_Sevik/post/Hydrogen\\_production\\_technologies\\_Which\\_are\\_the\\_current\\_numbers/attachment/5d036df0cfe4a7968daa97a1/AS%3A769631430119425%401560505840354/download/Global-Outlook-and-Trends-for-Hydrogen\\_Dec2017\\_WEB.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Seyfi_Sevik/post/Hydrogen_production_technologies_Which_are_the_current_numbers/attachment/5d036df0cfe4a7968daa97a1/AS%3A769631430119425%401560505840354/download/Global-Outlook-and-Trends-for-Hydrogen_Dec2017_WEB.pdf)

- [29] M. M. Roy, E. Tomita, N. Kawahara, Y. Harada, and A. Sakane, “An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H<sub>2</sub>-diesel dual-fuel engine,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 844–853, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2009.11.009.
- [30] H. W. Wu and Z. Y. Wu, “Investigation on combustion characteristics and emissions of diesel/hydrogen mixtures by using energy-share method in a diesel engine,” *Appl Therm Eng*, vol. 42, pp. 154–162, Sep. 2012, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2012.03.004.
- [31] M. G. Shirk, T. P. McGuire, G. L. Neal, and D. C. Haworth, “Investigation of a hydrogen-assisted combustion system for a light-duty diesel vehicle,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 23, pp. 7237–7244, Dec. 2008, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2008.07.128.
- [32] T. Gatts *et al.*, “An experimental investigation of H<sub>2</sub> emissions of a 2004 heavy-duty diesel engine supplemented with H<sub>2</sub>,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11349–11356, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2010.06.056.
- [33] F. Vogler and G. Sattler, “Hydrogen-fueled marine transportation,” *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy: Volume 4*, vol. 4, pp. 35–65, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-1-78242-364-5.00003-8.
- [34] MA Business, “First yacht with certified fuel cell propulsion,” *Fuel Cells Bulletin*, vol. 2003, no. 12, pp. 4–5, Dec. 2003, doi: 10.1016/S1464-2859(03)00015-4.
- [35] CMB, “Hydroville,” 2017, Accessed: Feb. 09, 2025. [Online]. Available: <https://cmb.tech/marine-brands>
- [36] J. Markowski and I. Pielecha, “The potential of fuel cells as a drive source of maritime transport,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 214, no. 1, p. 12019, Jan. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/214/1/012019.
- [37] Bosun’s Marine Peabody, “Yacht OnLine, Rivera 600.” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <http://www.yachtonline.it/events/hydrogen-for-frauscher-riviera-600>
- [38] EMSA, “Safety & Security.” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.emsa.europa.eu/>
- [39] A. María and R. Directora Ejecutiva, “Development of a green hydrogen industry a mission-oriented policy.”
- [40] Stephanie Cobo, “CAP desarrolla una planta piloto de hidrógeno verde en Talcahuano.” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available:

- <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2023/03/cap-desarrolla-planta-piloto-hidrogeno-verde-talcahuano>
- [41] Alfonso Salinas Martínez, “Proyecto Hidrógeno Verde Bahía de Quintero”, Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: [https://fch.cl/wp-content/uploads/2021/11/Showcase-Hidrogeno-Verde-Bahia-de-Quintero\\_GNL-Quintero.pdf](https://fch.cl/wp-content/uploads/2021/11/Showcase-Hidrogeno-Verde-Bahia-de-Quintero_GNL-Quintero.pdf)
- [42] Perkins Prima Vehicle Engines, “Model 80T User’s Handbook ,” 1993.
- [43] International Organization for Standardization, “ISO 8178 - Exhaust Emission Measurement”, Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.sustainable-ships.org/tools/2022/iso-8178>
- [44] FORVIA, “Hidrógeno Tipo 3 Cilindro 350 bar 210L,” 2025, Accessed: Aug. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.hyfindr.com/es/shop/productos/hidrogeno-tipo-3-cilindro-350-bar-210l>
- [45] BENETEAU, “Antares 6.80,” Jul. 2015.
- [46] Rainer Schröer and Rodrigo Vásquez, “Tecnologías del Hidrógeno y Perspectivas para Chile.” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: [https://energia.gob.cl/electromovilidad/img/Tecnolog%C3%ADas-del-hidr%C3%B3geno-y-perspectivas-para-Chile\\_2019.pdf](https://energia.gob.cl/electromovilidad/img/Tecnolog%C3%ADas-del-hidr%C3%B3geno-y-perspectivas-para-Chile_2019.pdf)
- [47] BEQUINOR, “Guía técnica: SEGURIDAD DEL HIDRÓGENO.” Accessed: Feb. 16, 2025. [Online]. Available: [https://industria.gob.es/Calidad-Industrial/seguridadindustrial/instalacionesindustriales/tecnologia-hidrogeno/BuenasPracticas/Guia-Seguridad-H2-BEQUINOR.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://industria.gob.es/Calidad-Industrial/seguridadindustrial/instalacionesindustriales/tecnologia-hidrogeno/BuenasPracticas/Guia-Seguridad-H2-BEQUINOR.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [48] BENETEAU, “ANTARES 6,80 BROCHURE”.
- [49] SII (Servicio de Impuestos Internos), “VIDA ÚTIL DE LOS BIENES FÍSICOS.” Accessed: Sep. 13, 2025. [Online]. Available: [https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla\\_vida\\_enero.htm](https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm)
- [50] Eduardo Beltrán, “Desafíos y Oportunidades de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde,” Jun. 2022, Accessed: Feb. 09, 2025. [Online]. Available: <https://mirada.fen.uchile.cl/articulo/ver/desafios-y-oportunidades-de-la-estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde>

# Anexos

## 1) Ensayos Línea Base:

**Tabla 27. Datos Medidos Para la Operación Línea Base**

T° refriger [°C]	T° ag. Sal [°C]	T° Gas esc [°C]	T° air ad [°C]	T° Aceite [°C]	CO (%Vol)	CO2 (%Vol)	O2 (%Vol)	NO (ppmv)	HC (ppmv ol)	Fuerza [Kgf]	RPM	Pe [kW]	m_comb (kg/min)
63,3	22	152,2	43	85,5	0,009	2,79	17,3	247	8	5	2400	8,81	0,042
63,2	22	148,1	42,5	84,3	0,016	2,83	17,24	260	13	5	2394	8,79	0,046
63,1	21,9	146,9	42,3	83,8	0,012	2,76	17,31	260	14	5	2388	8,77	0,041
63,1	21,8	146,1	42,1	83,7	0,009	2,78	17,29	257	9	5	2391	8,78	0,039
63,2	21,9	145,9	42,2	83,7	0,01	2,79	17,26	256	13	5	2399	8,81	0,042
63,2	21,9	146,3	42,4	84	0,014	2,78	17,28	258	14	5	2404	8,83	0,046
63,3	21,8	146,3	42,4	84,2	0,009	2,76	17,33	262	10	5	2400	8,81	0,045
63,4	21,8	145,9	42,2	84,4	0,013	2,78	17,3	252	12	5	2391	8,78	0,036
63,4	21,8	146,1	42,1	84,4	0,012	2,75	17,31	257	13	5	2392	8,78	0,044
67,9	23,9	210,1	51,6	92,2	0,002	4,17	15,62	481	0	9,5	2404	16,77	0,065
67,4	23,7	207,7	51	90,5	0,001	4,2	15,57	484	0	9,5	2410	16,81	0,067
67,3	23,6	206,8	51	89,9	0,001	4,21	15,55	483	0	9,5	2390	16,68	0,068
67,3	23,6	207,2	50,8	89,7	0,002	4,19	15,58	480	1	9,5	2393	16,70	0,064
67,5	23,6	207	50,9	89,7	0	4,23	15,54	491	2	9,5	2394	16,70	0,063
67,6	23,7	207,2	50,7	89,6	0	4,26	15,5	489	0	9,5	2388	16,66	0,068
67,5	23,6	206,5	51	89,5	0,001	4,31	15,43	495	0	9,5	2403	16,77	0,064
67,6	23,6	207,4	51	89,7	0	4,39	15,32	507	2	9,5	2409	16,81	0,063
67,9	23,6	208	50,8	89,9	0,001	4,42	15,29	506	1	9,5	2404	16,77	0,068
72,9	24,9	273,0	61,7	86,9	0,02	5,68	13,38	628	12	15	2404	26,31	0,095
74,4	25,5	273,6	62,8	94,3	0,01	5,64	13,48	680	8	15	2385	26,27	0,095
74,9	25,8	274,6	63,0	96,9	0,01	5,60	13,58	663	7	15	2410	26,37	0,094
75,1	25,8	275,2	63,3	97,8	0,01	5,61	13,58	676	3	15	2390	26,33	0,094
75,3	25,8	278,9	63,0	98,1	0,00	5,57	13,69	658	0	15	2395	26,21	0,096
75,2	25,8	280,0	63,5	98,4	0,00	5,59	13,65	653	1	15	2391	26,34	0,094
75,7	26,0	280,8	63,6	98,5	0,00	5,61	13,64	660	0	15	2386	25,93	0,094
76,0	26,3	279,1	64,2	99,0	0,00	5,69	13,52	678	2	15	2385	26,27	0,097
75,5	25,9	283,2	63,2	98,5	0,00	5,60	13,62	642	0	15	2393	26,19	0,098
79,8	27	350,8	79,6	90,1	0,095	7,47	10,7	855	15	20,6	2390	36,16	0,125
82,3	28	363,4	80,2	103	0,081	8	10,23	859	14	20,5	2379	35,82	0,127
83,1	28,4	364,7	79,9	107	0,068	7,53	10,77	782	9	20,5	2404	36,19	0,140

83,3	28,4	365,7	80,5	108,5	0,057	7,25	11,32	736	4	20,5	2370	35,68	0,121
83,5	28,4	366,9	79,7	109,3	0,054	6,93	11,76	687	0	20,3	2354	35,10	0,124
83,9	28,5	367,2	79,4	109,8	0,051	6,89	11,84	674	1	20,3	2348	35,01	0,126
84,1	28,7	365,5	79,9	109,9	0,055	6,73	11,8	648	10	20,1	2355	34,76	0,125
83,8	28,6	362,5	79,6	110,1	0,049	6,56	12,14	646	3	20,2	2358	34,98	0,128
84,2	28,6	364,8	80,7	110,2	0,044	6,81	11,81	662	1	20,2	2365	35,09	0,126

2) Ensayos con 10% de sustitución:

**Tabla 28. Datos Medidos Para la Operación con 10% de Adición de Hidrógeno**

T° refrigerante [°C]	T° agua sal [°C]	T° Gas escape [°C]	T° aire adm [°C]	T° Aceite [°C]	CO (%Vol)	CO2 (%Vol)	O2 (%Vol)	NO (ppmv)	HC (ppmv)	Fuerza [Kgf]	RPM	Pe [kW]	m_comb (kg/min)	m_H2 (L/min)
65,1	21,2	147,4	39,8	82,6	0,009	2,770	17,130	187	14	5	2395	8,795	0,043	16,96
65,1	21,3	147,3	39,7	83,1	0,011	2,720	17,190	180	11	5	2385	8,583	0,041	16,96
65,1	21,2	147,0	39,7	83,4	0,009	2,600	17,360	169	10	5	2380	8,740	0,039	16,96
65,0	21,2	146,8	39,7	83,4	0,001	2,570	17,410	167	4	5	2374	8,543	0,040	16,96
65,0	21,2	146,5	39,5	83,4	0,011	2,650	17,270	171	13	5	2360	8,666	0,038	16,96
65,2	21,3	146,9	39,8	83,6	0,008	2,680	17,240	177	8	5	2381	8,568	0,037	16,96
65,2	21,2	146,9	40,0	83,7	0,012	2,670	17,240	177	12	5	2379	8,736	0,041	16,96
65,3	21,3	146,8	40,1	84,0	0,006	2,660	17,260	178	8	5	2380	8,565	0,045	16,96
65,3	21,3	146,9	40,2	84,0	0,012	2,610	17,330	178	14	5	2382	8,747	0,040	16,96
70,5	23,7	210,9	50,1	91,1	0	4,35	14,4	492	10	9,5	2397	16,72	0,0628	26,23
70,5	23,7	212,5	50,4	91,5	0,008	4,28	14,67	492	11	9,5	2394	16,70	0,0608	26,23
70,4	23,6	212,8	50,3	91,4	0,004	4,25	14,67	491	8	9,5	2376	16,58	0,0596	26,23
70,3	23,6	213,3	50,3	91,5	0,001	4,26	14,71	490	5	9,5	2397	16,72	0,0596	26,23
70,1	23,6	213	50	91,5	0	4,24	14,72	490	2	9,5	2395	16,71	0,0606	26,23
78,3	26,5	281,2	64,3	97,7	0,005	5,08	14,51	670	4	15,0	2415	26,60	0,0884	38,07
78,2	26,8	281,5	64	97,8	0,008	5,04	14,48	668	6	15,0	2395	26,38	0,0878	38,07
78,3	26,7	281,4	64,1	97,6	0,010	4,98	14,52	671	7	15,0	2404	26,48	0,0868	38,07
78,1	26,8	281,4	64,1	97,7	0,011	4,97	14,49	665	9	15,0	2398	26,42	0,0876	38,07
78,2	26,6	281,5	64,2	97,5	0,005	5,02	14,51	667	6	15,0	2403	26,47	0,0878	38,07

3) Ensayos con 20% de sustitución:

**Tabla 29. Datos Medidos Para la Operación con 20% de Adición de Hidrógeno**

T° refrigerante [°C]	T° agua sal [°C]	T° Gas escape [°C]	T° aire adm [°C]	T° Aceite [°C]	CO (%Vol)	CO2 (%Vol)	O2 (%Vol)	NO (ppmv)	HC (ppmv)	Fuerza [Kgf]	RPM	Pe [kW]	m_comb (kg/min)	m_H2 (L/min)
65,3	21,3	146,4	40,5	82	0,012	2,54	17,23	153	13	5	2397	8,80	0,0374	33,92
65,5	21,4	147,1	40,8	83,1	0,011	2,51	17,23	158	12	5	2391	8,78	0,0372	33,92
65,5	21,4	147,1	40,7	83,5	0,011	2,49	17,29	153	11	5	2384	8,75	0,0368	33,92

65,6	21,5	147	40,7	83,7	0,01	2,47	17,3	159	13	5	2383	8,75	0,0378	33,92
65,6	21,5	146,8	40,8	83,7	0,009	2,41	17,32	158	13	5	2377	8,73	0,0374	33,92
65,6	21,5	146,7	41	83,8	0,011	2,45	17,32	155	12	5	2381	8,74	0,0384	33,92
65,4	21,5	146,5	40,9	83,8	0,008	2,56	17,32	162	10	5	2388	8,77	0,0372	33,92
65,5	21,5	147,2	41,3	84	0,13	2,48	17,27	164	14	5	2394	8,79	0,0374	33,92
65,6	21,5	147,2	41,5	84,2	0,009	2,46	17,28	165	11	5	2388	8,77	0,0376	33,92
70,2	23,6	216,4	49,8	91,3	0,002	4,11	14,72	480	1	9,8	2397	17,25	0,0576	52,46
70,2	23,5	216,9	49,8	91,5	0,001	4,09	14,76	483	1	9,5	2395	16,71	0,0570	52,46
70,2	23,5	217,4	49,6	91,6	0,001	4,10	14,73	488	2	9,8	2401	17,28	0,0580	52,46
70,3	23,6	218,3	49,9	91,5	0,005	4,02	14,78	482	5	9,5	2399	16,74	0,0544	52,46
70,2	23,5	218,7	49,7	91,3	0,001	4,02	14,8	485	7	9,8	2398	17,26	0,0562	52,46
78,3	26,5	288,1	64,3	98	0,005	4,88	14,51	687	5	15,0	2415	26,60	0,0808	76,15
78,2	26,8	287,5	64,1	97,8	0,008	4,77	14,56	681	9	15,0	2395	26,38	0,0804	76,15
78,3	26,7	287,9	64,1	98,1	0,007	4,75	14,52	683	0	15,0	2404	26,48	0,0796	76,15
78,5	26,8	287,8	64,3	97,7	0,009	4,76	14,53	685	3	15,0	2398	26,42	0,0804	76,15
78,2	26,8	287,9	64,2	97,9	0,008	4,79	14,51	683	5	15,0	2403	26,47	0,0794	76,15

4) Ensayos con 30% de sustitución:

**Tabla 30. Datos Medidos Para la Operación con 30% de Adición de Hidrógeno**

T° refrig [°C]	T° ag. Sal [°C]	T° Gas esc [°C]	T° air ad [°C]	T° Aceite [°C]	CO (%Vol)	CO2 (%Vol)	O2 (%Vol)	NO (ppmv ol)	HC (ppm vol)	Fuerza [Kgf]	RPM	Pe [kW]	m_comb (kg/min)	m_H2 (L/min)
65,2	21,3	145,2	39,4	83,2	0,007	2,33	17,32	132	10	4,9	2402	8,64	0,0368	50,88
65,2	21,3	145,3	39,5	83,2	0,008	2,31	17,28	134	12	5	2397	8,80	0,0366	50,88
65,2	21,2	145	39,4	83,1	0,006	2,29	17,3	137	11	4,8	2391	8,43	0,0352	50,88
65,3	21,3	145	39,4	83,2	0,006	2,26	17,3	137	10	5	2390	8,78	0,0336	50,88
65,3	21,3	145,1	39,5	83,3	0,008	2,28	17,3	137	11	4,8	2394	8,44	0,0374	50,88
69,9	23,7	220,6	49,1	90,8	0,003	3,74	14,92	510	9	9,8	2405	17,31	0,0530	78,69
70,1	23,7	223,1	50,4	91,1	0,002	3,75	14,97	517	9	9,5	2403	16,77	0,0534	78,69
70,3	23,8	224	50,9	91,5	0,001	3,72	14,94	521	8	9,8	2405	17,31	0,0550	78,69
70,4	23,9	223,8	50,7	91,4	0,006	3,74	14,84	511	14	9,5	2397	16,72	0,0526	78,69
69,7	23,6	220,6	49,7	90,9	0,005	3,73	14,9	496	13	9,8	2390	17,20	0,0516	78,69
78,1	26,6	286,1	64,1	98	0,010	4,38	14,49	721	5	15,1	2415	26,78	0,0788	114,22
78,3	26,8	285,5	64,1	97,9	0,008	4,37	14,52	718	9	15,0	2395	26,38	0,0758	114,22
78,5	26,7	285,9	64,3	98,1	0,005	4,4	14,5	722	8	15,1	2404	26,66	0,0756	114,22
78,5	26,8	286,1	64,1	97,9	0,006	4,35	14,49	718	6	15,0	2398	26,42	0,0750	114,22
78,3	26,8	286,3	64,2	98	0,005	4,37	14,48	719	5	15,1	2403	26,65	0,0750	114,22

5) Puntos con "Backfire" e Índice de detonación [5]:

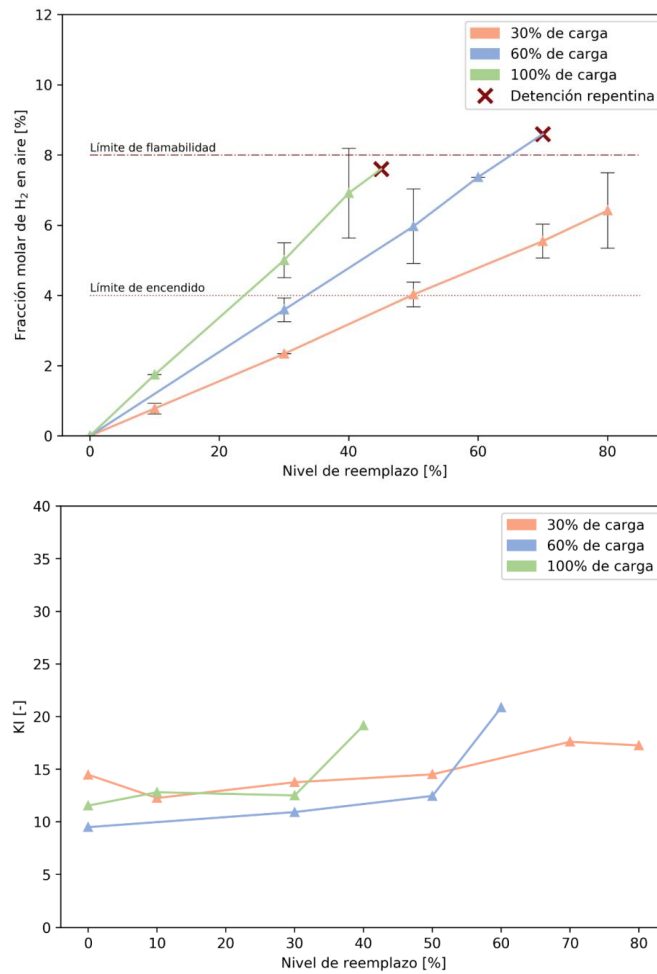


Figura 11. Gráfico proporción H2-Aire v/s %H2 y Knock Index v/s % H2 [5]

6) Flujo de caja 30% de sustitución:

	Año										
US\$	0 2025	1 2026	2 2027	3 2028	4 2029	5 2030	6 2031	7 2032	8 2033	9 2034	10 2035
Ahorro Monetario	\$ -	\$ -4.199	\$ -627	\$ 3.495	\$ 9.823	\$ 11.477	\$ 14.234	\$ 14.234	\$ 14.234	\$ 14.234	\$ 14.234
Mantenición	\$ -	\$ -3.000	\$ -3.000	\$ -3.000	\$ -3.000	\$ -3.000	\$ -3.000	\$ -3.000	\$ -3.000	\$ -3.000	\$ -3.000
Ahorros Netos	\$ -	\$ -3.000	\$ -3.000	\$ 495	\$ 6.823	\$ 8.477	\$ 11.234	\$ 11.234	\$ 11.234	\$ 11.234	\$ 11.234
Dep	\$ -	\$ -1.200	\$ -1.200	\$ -1.200	\$ -1.200	\$ -1.200	\$ -1.200	\$ -1.200	\$ -1.200	\$ -1.200	\$ -1.200
Amort	\$ -	\$ -450	\$ -450	\$ -450	\$ -450	\$ -450	\$ -450	\$ -450	\$ -450	\$ -450	\$ -450
RAI	\$ -	\$ -4.650	\$ -4.650	\$ -1.155	\$ 5.173	\$ 6.827	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584
TAX	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
RDI	\$ -	\$ -4.650	\$ -4.650	\$ -1.155	\$ 5.173	\$ 6.827	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584
RO NETO	\$ -	\$ -4.650	\$ -4.650	\$ -1.155	\$ 5.173	\$ 6.827	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584
Inversion	\$ -16.500	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
VR	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 4.500
FdC	\$ -16.500	\$ -4.650	\$ -4.650	\$ -1.155	\$ 5.173	\$ 6.827	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 9.584	\$ 14.084
TD		10%									
VAN	\$ 6.024,51										
TIR	14%										

Figura 12. Flujo de Caja 30% de Sustitución

7) Flujo de caja 20% de sustitución:

US\$	Año										
	0 2025	1 2026	2 2027	3 2028	4 2029	5 2030	6 2031	7 2032	8 2033	9 2034	10 2035
Ahorro Monet. \$	- \$	-2.204 \$	296 \$	3.163 \$	7.501 \$	8.603 \$	10.441 \$	10.441 \$	10.441 \$	10.441 \$	10.441 \$
Mantenición \$	- \$	-2.300 \$	-2.300 \$	-2.300 \$	-2.300 \$	-2.300 \$	-2.300 \$	-2.300 \$	-2.300 \$	-2.300 \$	-2.300 \$
Ahorros Netos \$	- \$	-2.300 \$	-2.004 \$	863 \$	5.201 \$	6.303 \$	8.141 \$	8.141 \$	8.141 \$	8.141 \$	8.141 \$
Dep \$	- \$	-800 \$	-800 \$	-800 \$	-800 \$	-800 \$	-800 \$	-800 \$	-800 \$	-800 \$	-800 \$
Amort \$	- \$	-350 \$	-350 \$	-350 \$	-350 \$	-350 \$	-350 \$	-350 \$	-350 \$	-350 \$	-350 \$
RAI \$	- \$	-3.450 \$	-3.154 \$	-287 \$	4.051 \$	5.153 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$
TAX \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
RDI \$	- \$	-3.450 \$	-3.154 \$	-287 \$	4.051 \$	5.153 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$
RO NETO \$	- \$	-3.450 \$	-3.154 \$	-287 \$	4.051 \$	5.153 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$
Inversion \$	-11.500 \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
VR \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
FdC \$	-11.500 \$	-3.450 \$	-3.154 \$	-287 \$	4.051 \$	5.153 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$	6.991 \$
TD	10%										
VAN	\$5.738,66										
TIR	15%										

Figura 13. Flujo de Caja 20% de Sustitución

8) Flujo de caja 10% de sustitución:

US\$	Año										
	0 2025	1 2026	2 2027	3 2028	4 2029	5 2030	6 2031	7 2032	8 2033	9 2034	10 2035
Ahorro Monetario \$	- \$	-1.020 \$	246 \$	1.696 \$	3.881 \$	4.432 \$	5.351 \$	5.351 \$	5.351 \$	5.351 \$	5.351 \$
Mantenición \$	- \$	-1.500 \$	-1.500 \$	-1.500 \$	-1.500 \$	-1.500 \$	-1.500 \$	-1.500 \$	-1.500 \$	-1.500 \$	-1.500 \$
Ahorros Netos \$	- \$	-1.500 \$	-1.254 \$	196 \$	2.381 \$	2.932 \$	3.851 \$	3.851 \$	3.851 \$	3.851 \$	3.851 \$
Dep \$	- \$	-400 \$	-400 \$	-400 \$	-400 \$	-400 \$	-400 \$	-400 \$	-400 \$	-400 \$	-400 \$
Amort \$	- \$	-300 \$	-300 \$	-300 \$	-300 \$	-300 \$	-300 \$	-300 \$	-300 \$	-300 \$	-300 \$
RAI \$	- \$	-2.200 \$	-1.954 \$	-504 \$	1.681 \$	2.232 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$
TAX \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
RDI \$	- \$	-2.200 \$	-1.954 \$	-504 \$	1.681 \$	2.232 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$
RO NETO \$	- \$	-2.200 \$	-1.954 \$	-504 \$	1.681 \$	2.232 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$
Inversion \$	-7.000 \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
VR \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
FdC \$	-7.000 \$	-2.200 \$	-1.954 \$	-504 \$	1.681 \$	2.232 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$	3.151 \$
TD	10%										
VAN	\$103,48										
TIR	10%										

Figura 14. Flujo de Caja 10% de Sustitución