

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería de Tecnologías Industriales

### El papel del Hidrógeno como combustible dual en MCIA para la descarbonización del transporte marítimo

Autor: Miguel Vilches Barrera

Tutor: Javier Serrano Reyes

**Dpto. Ingeniería Energética**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2024





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **El papel del Hidrógeno como combustible dual en MCIA para la descarbonización del transporte marítimo**

Autor:

Miguel Vilches Barrera

Tutor:

Javier Serrano Reyes

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Grado: El papel del Hidrógeno como combustible dual en MCI para la descarbonización del transporte marítimo

Autor: Miguel Vilches Barrera

Tutor: Javier Serrano Reyes

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis amigos*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

Después de muchos años con el objetivo de poder escribir estas palabras, al fin puedo hacerlo. Ha sido un camino difícil, por momentos bastante duro, pero estoy convencido de que ha merecido la pena. Tal y como dice una de las frases de mi libro favorito, “Viaje antes que Destino”, lo importante no es el final sino todo el camino que has recorrido para llegar hasta él.

Y este camino no hubiera sido posible sin mi familia, gracias a mis padres y a mis hermanos por apoyarme siempre desde niño y por hacerme ser quien soy hoy en día. Gracias a mis amigos, tanto a los de siempre como los que he hecho durante estos años en la Escuela, por hacerme la vida mucho más fácil y bonita.

También quiero agradecer a mi amigo Miguel Ángel por ayudarme siempre que puede y tenerme presente para cualquier cosa que surja, por ejemplo, este trabajo desde el principio es gracias a él.

Y por último y más importante, gracias a mi tutor Javier por aguantarme, enseñarme y guiarme durante todos estos meses hasta la conclusión del trabajo.

Espero que podáis aprender solo un poco de todo lo que yo he aprendido haciéndolo.

*Miguel Vilches Barrera*

*Sevilla, 2024*



# Resumen

---

Para poder reducir las emisiones contaminantes que provocan el cambio climático y por consiguiente el aumento de la temperatura en La Tierra, es capital una profunda renovación del sector energético mundial, ya que este es el responsable de la mayor parte de la generación de gases de efecto invernadero. Dicha renovación tiene que ir de la mano del cambio de combustibles fósiles por fuentes limpias, sin embargo, esto no es tan sencillo de realizar ya existen determinados usos finales que son difícilmente electrificables a través de recursos renovables, además de que la producción de estas es variable haciendo que la demanda no siempre se corresponda con la disponibilidad.

Dentro del sector energético, el sector transporte es el que más emisiones contaminantes emite, entre el que destaca el transporte marítimo ya que transporta casi el 80% de los bienes de mundo. Es aquí donde, por sus características fisicoquímicas, el uso de hidrógeno empleado junto al diésel en los grandes motores marinos puede reducir considerablemente las emisiones de este, cumpliendo con las legislaciones presentes y futuras con el objetivo de descarbonizar el sector.

Por tanto, el objetivo de este trabajo bibliográfico es evidenciar que el empleo de hidrógeno-diésel en motores marinos es una de las opciones más viables para reducir considerablemente las emisiones contaminantes del transporte marítimo. Durante este trabajo, se recalca la importancia del hidrógeno en un sistema energético sostenible, se hace un repaso a toda su cadena de valor, se exponen sus ventajas e inconvenientes al emplearlo en motores de combustión interna junto con el diésel. Además, se recogen los principales trabajos de investigación que ponen en valor el uso de hidrógeno como combustible marino.



# Abstract

---

In order to reduce the polluting emissions that cause climate change and consequently the increase in temperature on Earth, a deep renovation of the global energy sector is essential, as it is responsible for the majority of greenhouse gas generation. This renovation must go hand in hand with the replacement of fossil fuels with clean sources, however, this is not as easy to achieve as there are already certain end uses that are difficult to electrify through renewable resources, in addition to the fact that their production is variable, making the demand not always correspond with availability.

Within the energy sector, the transportation sector emits the most polluting emissions, with maritime transport standing out as it carries almost 80% of the world's goods. It is here where, due to its physicochemical characteristics, the use of hydrogen combined with diesel in large marine engines can significantly reduce emissions, meeting present and future regulations with the aim of decarbonizing the sector.

Therefore, the objective of this bibliographic work is to demonstrate that the use of hydrogen-diesel in marine engines is one of the most viable options to significantly reduce the polluting emissions of maritime transport. During this work, the importance of hydrogen in a sustainable energy system is emphasized, a review of its entire value chain is carried out, its advantages and disadvantages when used in internal combustion engines alongside diesel are discussed. Additionally, the main research studies that highlight the use of hydrogen as a marine fuel are included.

**Agradecimientos**

**Resumen**

**Abstract**

**Índice**

**Índice de Tablas**

**Índice de Figuras**

**Notación**

<b>1</b>	<b>Objeto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Alcance</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>El Papel del Hidrógeno en un Sistema Energético Sostenible</b>	<b>3</b>
3.1.	<i>Importancia del Hidrógeno en la Transición Energética</i>	9
3.2.	<i>Proyectos Internacionales y Nacionales</i>	13
3.1.1.	Proyectos Internacionales	14
3.1.2.	Proyectos Nacionales	23
<b>4</b>	<b>Cadena de Valor del Hidrógeno: Desde su Producción hasta su Utilización</b>	<b>28</b>
4.1.	<i>Producción de Hidrógeno</i>	28
4.1.1.	Gas Natural	30
4.1.2.	Carbón	31
4.1.3.	Biomasa	32
4.1.4.	Agua y Electricidad	33
4.1.5.	Otros Métodos de Producción	35
4.1.6.	Características de la Producción de Hidrógeno	37
4.1.7.	Costes de la Producción de Hidrógeno	38
4.1.8.	Tipos de Hidrógeno	38
4.1.9.	Conclusiones	39
4.2.	<i>Almacenamiento de Hidrógeno</i>	40
4.2.1.	Almacenamiento de Hidrógeno Comprimido	40
4.2.2.	Almacenamiento de Hidrógeno Líquido	41
4.2.3.	Almacenamiento de Hidrógeno Sólido	42
4.2.4.	Almacenamiento de Hidrógeno a Gran Escala	43
4.3.	<i>Transporte de Hidrógeno</i>	43
4.3.1.	Transporte Marítimo	43
4.3.2.	Transporte Terrestre	44
4.3.3.	Transporte a través de la Red de Gas Natural	45
4.4.	<i>Aplicaciones Finales del Hidrógeno</i>	45
4.4.1.	Materia Prima para Uso Industrial	46
4.4.2.	Generación de Calor	47
4.4.3.	Generación de Potencia	48
4.4.4.	Transporte	48
4.4.5.	Conclusiones	50

<b>5</b>	<b><i>El Hidrógeno como Combustible en Motores Diésel</i></b>	<b>51</b>
5.1.	<i>Utilización del Hidrógeno en Motores de Encendido por Compresión. Ventajas e Inconvenientes</i>	51
5.1.1.	Rendimiento Térmico y Potencia Suministrada	55
5.1.2.	Rendimiento Volumétrico	57
5.1.3.	Duración de la Combustión	58
5.1.4.	Retraso a la Combustión	69
5.1.5.	Presión y Temperatura dentro del Cilindro	60
5.1.6.	Rendimiento de la Combustión	61
5.1.7.	Temperatura de los Gases de Escape	61
5.1.8.	Tasa de Liberación de Calor	62
5.1.9.	Emisiones de CO	63
5.1.10.	Emisiones de CO <sub>2</sub>	64
5.1.11.	Emisiones de HC	65
5.1.12.	Emisiones de PM y Humos	66
5.1.13.	Emisiones de NO <sub>x</sub>	67
5.1.14.	Tabla Resumen	67
5.2.	<i>Métodos de Control de las Emisiones Asociadas al Empleo de Hidrógeno en Motores Duales</i>	68
5.2.1.	Recirculación de Gases de Escape	69
5.2.2.	Inyección de Agua	70
5.2.3.	Variación de la Relación de Compresión del Motor	72
5.3.	<i>Utilización en Motores de Combustión Dual Diésel-H<sub>2</sub> en Propulsión Marina</i>	73
<b>6</b>	<b><i>Descarbonización del Sector Marino mediante la Utilización de Hidrógeno</i></b>	<b>74</b>
6.1.	<i>Transporte Marino en la Actualidad</i>	74
6.2.	<i>Descarbonización del Sector Marítimo a través del Uso de Hidrógeno</i>	81
<b>7</b>	<b><i>Almacenamiento de Hidrógeno</i></b>	<b>116</b>
7.1.	<i>Introducción</i>	116
7.2.	<i>Principales Métodos de Almacenamiento de Hidrógeno</i>	117
7.2.1.	Basado en Amoníaco	117
7.2.2.	Basado en CO <sub>2</sub>	117
7.2.3.	Basado en Líquidos Orgánicos	118
7.3.	<i>Comparación entre los principales Métodos de Almacenamiento de Hidrógeno</i>	118
7.3.1.	Seguridad	119
7.3.2.	Aplicabilidad	120
7.3.3.	Eficiencia Energética	123
7.3.4.	Fiabilidad	123
7.4.	<i>Conclusiones</i>	124
<b>8</b>	<b><i>Combustibles Alternativos al Hidrógeno</i></b>	<b>125</b>
8.1.	<i>Biocombustibles</i>	127
8.2.	<i>Metanol</i>	128
8.3.	<i>Amoníaco</i>	130
8.4.	<i>Gas Natural Licuado</i>	130
8.5.	<i>Combustibles Sintéticos</i>	131
8.6.	<i>Etanol</i>	132
<b>9</b>	<b><i>Conclusiones</i></b>	<b>134</b>
9.1	<i>Conclusiones Globales</i>	134
	<b>Referencias</b>	<b>139</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

**Tabla. 5.1:** Principales características del H<sub>2</sub> con respecto a otros combustibles [100].

**Tabla. 5.2:** Resumen de la combustión en modo dual [97].

**Tabla. 5.3:** Resumen de las estrategias de inyección de agua y reducción de la RC para un motor de combustión dual [97].

**Tabla. 6.1:** Límites en las emisiones de NO<sub>x</sub> recogido en la MARPOL [128].

**Tabla. 6.2:** Límites en el contenido de azufre en los combustibles marinos recogido en la MARPOL [128].

**Tabla. 6.3:** Resumen de medidas a corto, medio y largo plazo para cumplir con los objetivos de la Estrategia Inicial de la OMI [132,134,135].

**Tabla. 6.4:** Especificaciones del motor marino empleado en el ensayo [141].

**Tabla. 6.5:** Modos de prueba del ensayo [141].

**Tabla. 6.6:** Parámetros del motor Hyundai-MAN B&W 9590 ME-C 10.2 para diferentes cargas de operación [142].

**Tabla. 6.7:** Especificaciones del motor marino empleado en el ensayo [143].

**Tabla. 6.8:** Especificaciones del motor utilizado en el estudio experimental [146].

**Tabla. 6.9:** Puntos de operación seleccionados para el estudio del modo dual [146].

**Tabla. 6.10:** V obtenidos por el modelo dual con respecto al modo diésel [146].

**Tabla. 6.11:** Comparación de valores obtenidos para los diferentes casos de cierre anticipado de válvulas de escape [146].

**Tabla. 6.12:** Comparación de valores obtenidos por el modelo de inyección directa con respecto al modo diésel [146].

**Tabla. 6.13:** Especificaciones del motor marino empleado en el ensayo [144].

**Tabla. 6.14:** Resultados de la simulación para el modo de combustible H<sub>2</sub>-diésel [144].

**Tabla. 6.15:** Especificaciones del motor utilizado en el estudio experimental [145].

**Tabla. 6.16:** Resultados de la simulación para el modo de combustible dual H<sub>2</sub>-diésel [145].

**Tabla. 6.17:** Especificaciones del motor marino empleado en el ensayo [147].

**Tabla. 6.18:** Resultados óptimos de parámetros del motor [147].

**Tabla. 6.19:** Resumen de los trabajos de investigación.

**Tabla. 7.1:** Evaluación de niveles y su descripción [157].

**Tabla. 7.2:** Comparación de los diferentes métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub> [157].

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

**Fig. 3.1:** Incremento de la temperatura media anual a lo largo de las décadas [1].

**Fig. 3.2:** Fracción molar anual a nivel mundial de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en ppm [1].

**Fig. 3.3:** Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero en 2016 [3].

**Fig. 3.4:** Emisiones de gases de efecto invernadero por países en 2021 [4].

**Fig. 3.5:** Iniciativas del Pacto Verde Europeo para alcanzar la neutralidad climática en 2050 [13].

**Fig. 3.6:** Objetivo de emisiones para alcanzar el escenario “Net Zero” en 2050 [4].

**Fig. 3.7:** Emisiones contaminantes procedentes del transporte de la UE en 2019 [17].

**Fig. 3.8:** Beneficios de la utilización de H<sub>2</sub> en 2050 [16].

**Fig. 3.9:** Empleo en energías renovables desglosado por sectores en 2030 [21].

**Fig. 3.10:** Miembros del Consejo del Hidrógeno [22].

**Fig. 3.11:** Inversiones de 2023 para proyectos de H<sub>2</sub> comparados con 2022 [22].

**Fig. 3.12:** Total de proyectos globales de H<sub>2</sub> hasta inicios de 2023 [22].

**Fig. 3.13:** Principales proyectos a nivel mundial de producción de H<sub>2</sub> [23].

**Fig. 3.14:** Agrupación de empresas del proyecto HyDeal Ambition [23].

**Fig. 3.15:** Localización del proyecto Australian Renewable Energy Hub [24].

**Fig. 3.16:** Localización del proyecto Western Green Energy Hub [25].

**Fig. 3.17:** Objetivos de España para el año 2030 [57].

**Fig. 3.18:** Mapa de los proyectos registrados en el Censo de Proyectos clasificado por actividades [56].

**Fig. 4.1:** Cadena de valor del H<sub>2</sub> [57].

**Fig. 4.2:** Vías potenciales para producir hidrógeno [65].

**Fig. 4.3:** Reacciones químicas de los métodos de reformado [37].

**Fig. 4.4:** Procesos de producción de hidrógeno a partir de biomasa [71].

**Fig. 4.5:** Reacción de electrólisis [15].

**Fig. 4.6:** Representación de un electrolizador alcalino [74].

**Fig. 4.7:** Representación de un electrolizador PEM [73].

**Fig. 4.8:** Representación de un electrolizador de óxido sólido [74].

**Fig. 4.9:** Comparativa entre los distintos tipos de electrolizadores [75].

**Fig. 4.10:** Número de pasos en TWSC en función de la fuente de calor [76].

**Fig. 4.11:** Tecnología de fotoelectrocatalisis [79].

**Fig. 4.12:** Producción de H<sub>2</sub> en los años 2020 y 2021 [30].

**Fig. 4.13:** Coste de H<sub>2</sub> producido por energía solar y eólica a largo plazo [65].

**Fig. 4.14:** Volumen ocupado por diferentes combustibles [71].

**Fig. 4.15:** Componentes del tanque presurizado para almacenamiento de H<sub>2</sub> [84].

**Fig. 4.16:** Clasificación de tanques presurizados para almacenamiento de H<sub>2</sub> [84].

**Fig. 4.17:** Componentes de un tanque de almacenamiento de H<sub>2</sub> líquido [84].

**Fig. 4.18:** Proceso de carga y descarga de H<sub>2</sub> utilizando almacenamiento sólido [84].

**Fig. 4.19:** Esquema de una planta de almacenamiento de H<sub>2</sub> en una caverna de sal [84].

**Fig. 4.20:** Esquema del transporte de H<sub>2</sub> por vía marítima [84].

**Fig. 4.21:** Suiso Frontier, el primer barco de transporte de H<sub>2</sub> líquido [85].

**Fig. 4.22:** Camión de tubo para transportar H<sub>2</sub> comprimido [86].

**Fig. 4.23:** Reacciones en una FC y su representación [84].

**Fig. 4.24:** Principales parámetros y aplicaciones de las tecnologías de FC [84].

**Fig. 4.25:** Esquema de un sistema micro-CHP para cogeneración doméstica [84].

**Fig. 4.26:** Aplicaciones del H<sub>2</sub> en el transporte [84].

**Fig. 5.1:** Esquema del modo dual de combustión en un motor CI con inyección de H<sub>2</sub> en el conducto de admisión [97].

**Fig. 5.2:** Técnica de inyección de H<sub>2</sub> justo antes de la válvula de admisión [104].

**Fig. 5.3:** Técnica de inyección de H<sub>2</sub> directamente en la cámara de combustión [104].

**Fig. 5.4:** Variación de la eficiencia térmica con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> y para diferentes cargas de operación [97].

**Fig. 5.5:** Variación de la eficiencia térmica con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> para medias y altas cargas [97].

**Fig. 5.6:** Potencia del motor con respecto a la relación aire-combustible para diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> y para 1000 rpm [105].

**Fig. 5.7:** Potencia del motor con respecto a la relación aire-combustible para diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> y para 4000 rpm [105].

**Fig. 5.8:** Variación del rendimiento volumétrico con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> empleado [97].

**Fig. 5.9:** Variación del rendimiento volumétrico con respecto a la carga de operación y al porcentaje de H<sub>2</sub> [107].

**Fig. 5.10:** Variación de la duración de la combustión con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> para medias y altas cargas [97].

**Fig. 5.11:** Variación de la duración de la combustión con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> y para diferentes cargas de trabajo [105].

**Fig. 5.12:** Variación del retraso a la combustión con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> y para diferentes cargas de trabajo [97].

**Fig. 5.13:** Variación de la presión en el interior del cilindro para diferentes cantidades de H<sub>2</sub> y cargas de operación [97].

**Fig. 5.14:** Variación de la eficiencia en la combustión con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> utilizado [97].

**Fig. 5.15:** Variación de la temperatura de los gases de escape con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> empleado [97].

**Fig. 5.16:** Variación de la tasa de liberación de calor con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> empleado y a la carga de operación [97].

**Fig. 5.17:** Variación de las emisiones de CO con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> y para diferentes cargas de operación [110].

**Fig. 5.18:** Variación de las emisiones de CO con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> para una carga de trabajo determinada [100].

**Fig. 5.19:** Variación de las emisiones de CO<sub>2</sub> con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> empleado y para diferentes cargas de trabajo [97].

**Fig. 5.20:** Variación de las emisiones de HC con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> y las cargas de trabajo [110].

**Fig. 5.21:** Variación de las emisiones de PM con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> y las cargas de trabajo [97].

**Fig. 5.22:** Variación de las emisiones de humos con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> y las cargas de trabajo [97].

**Fig. 6.1:** Evolución de las normas Tier de la OMI referentes a las emisiones de NO<sub>x</sub> [128].

**Fig. 6.2:** Actuales y futuros posibles ECA [129].

**Fig. 6.3:** Evolución de las normas Tier de la OMI referentes al contenido de azufre en los combustibles marinos [128].

**Fig. 6.4:** Emisiones de CO<sub>2</sub> para cada carga del motor y para diferentes caudales de H<sub>2</sub> [141].

**Fig. 6.5:** Energía de admisión del motor con respecto a los caudales de H<sub>2</sub> introducidos [141].

**Fig. 6.6:** Emisiones de NO<sub>x</sub> para cada carga del motor y para diferentes caudales de H<sub>2</sub> [141].

**Fig. 6.7:** Emisiones de CO para cada carga del motor y para diferentes caudales de H<sub>2</sub> [141].

**Fig. 6.8:** Emisiones de PM para cada carga del motor y para diferentes caudales de H<sub>2</sub> [141].

**Fig. 6.9:** Emisiones específicas ponderadas de gases y PM junto con valores de certificación Tier I y II bajo el ciclo de prueba E3 [141].

**Fig. 6.10:** Balance energético en el motor diésel y dual empleando diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [142].

**Fig. 6.11:** Eficiencia térmica del motor a diferentes cargas de operación e H<sub>2</sub> empleado [142].

**Fig. 6.12:** Balance exergético en el motor diésel y dual empleando diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [142].

**Fig. 6.13:** Eficiencia exergética del motor dual a diferentes cargas de operación e H<sub>2</sub> empleado [142].

**Fig. 6.14:** Emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> del motor en modo dual comparado con el motor diésel [142].

**Fig. 6.15:** Efecto de los porcentajes de sustitución de H<sub>2</sub> sobre las emisiones de NO<sub>x</sub> respecto a los límites Tier III de la OMI [142].

**Fig. 6.16:** Resultados de la potencia alcanzada por el motor empleando distintos combustibles con diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [143].

**Fig. 6.17:** Emisiones de NO<sub>x</sub> (g/kWh) empleando distintos combustibles con diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [143].

**Fig. 6.18:** Consumo específico de combustible empleando distintos combustibles con diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [143].

**Fig. 6.19:** Eficiencia del motor empleando distintos combustibles con diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [143].

**Fig. 6.20:** Comparación de la PME entre los diferentes casos de cierre de las válvulas de escape [146].

**Fig. 6.21:** Comparación de la eficiencia entre los diferentes casos de cierre de las válvulas de escape [146].

**Fig. 6.22:** Comparación del flujo másico de entrada entre los diferentes casos de cierre de las válvulas de escape [146].

**Fig. 6.23:** Comparación de la eficiencia del motor para los diferentes casos [146].

**Fig. 6.24:** Comparación de la PME del motor para el caso de referencia y para inyección directa de H<sub>2</sub> [146].

**Fig. 6.25:** Eficiencia térmica del motor para diferentes configuraciones de H<sub>2</sub> inyectado [144].

**Fig. 6.26:** Eficiencia volumétrica para diferentes configuraciones de H<sub>2</sub> inyectado [144].

**Fig. 6.27:** Consumo específico de combustible del motor para diferentes configuraciones de H<sub>2</sub> inyectado [144].

**Fig. 6.28:** Emisiones de CO<sub>2</sub> del motor en toneladas/día para diferentes configuraciones de H<sub>2</sub> inyectado [144].

**Fig. 6.29:** Reducción de CO<sub>2</sub> del motor para diferentes configuraciones de H<sub>2</sub> inyectado [144].

**Fig. 6.30:** Consumo específico de combustible para diferentes cargas del motor y diferentes mezclas de combustible [147].

**Fig. 6.31:** Rendimiento para diferentes cargas y diferentes mezclas de combustible [147].

**Fig. 6.32:** Emisiones de NO<sub>x</sub> para diferentes cargas del motor y diferentes mezclas de combustible [147].

**Fig. 6.33:** Emisiones de CO para diferentes cargas del motor y diferentes mezclas de combustible [147].

**Fig. 6.34:** Ferry Hydro Bingo impulsado por combustión dual diésel-H<sub>2</sub> [149].

**Fig. 6.35:** Motor marino diésel MAN D2862 LE448 adaptado para operar con una adición de H<sub>2</sub> [150].

**Fig. 6.36:** Embarcación Hydrocat 48 propulsada por combustión dual diésel- H<sub>2</sub> [151].

**Fig. 6.37:** Ferry MF Hydra propulsado por H<sub>2</sub> líquido [154].

**Fig. 7.1:** Técnica de almacenamiento de H<sub>2</sub> a bordo de los buques [157].

**Fig. 7.2:** Densidades energéticas y volumétricas de los diferentes métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub>: A) la densidad energética y volumétrica neta de los combustibles y B) la densidad energética y volumétrica bruta del combustible cuando está almacenado en tanques.

**Fig. 7.3:** Comparación de energía para los diferentes métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub> [157].

**Fig. 8.1:** Comparación entre diferentes combustibles marinos [159].

**Fig. 8.2:** Densidades energéticas y volumétricas para diferentes fuentes marinas [161].

**Fig. 8.3:** Ventajas e inconvenientes de cada combustible marino [160].

**Fig. 8.4:** Portacontenedor fabricado por Maersk alimentado con CH<sub>3</sub>OH [164].

# Notación

---

Aceite vegetal hidrogenado	<b>HVO</b>
Agencia de Protección Medioambiental	<b>EPA</b>
Agencia Internacional de la Energía	<b>IEA</b>
Agua	<b>H<sub>2</sub>O</b>
Amoniaco	<b>NH<sub>3</sub></b>
Asociación Española del Hidrógeno	<b>AeH<sub>2</sub></b>
Biogás comprimido	<b>CBG</b>
Biogás licuado	<b>LCB</b>
Ciclos termoquímicos de división de agua	<b>TWSC</b>
Cogeneración	<b>CHP</b>
Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	<b>COP</b>
Dimetiléter	<b>DME</b>
Distribución normal de cierre de válvulas de escape	<b>CVE</b>
Dióxido de carbono	<b>CO<sub>2</sub></b>
Dióxido de nitrógeno	<b>NO<sub>2</sub></b>
Dos tiempos	<b>2T</b>
Dólares canadienses	<b>CAD</b>
Dólares estadounidenses	<b>USD</b>
Emulsión de agua y diésel	<b>WDE</b>
Engineering Equation Solver	<b>EES</b>
Establecimiento del Mecanismo de Ajuste de Frontera de Carbono	<b>MAFC</b>
Estaciones de repostaje de H <sub>2</sub>	<b>HRS</b>
Fueloil marino con contenido en azufre ultrabajo	<b>ULSFO</b>
Gas licuado de petróleo	<b>G.L.P.</b>
Gas natural	<b>G.N.</b>
Gas natural licuado	<b>G.N.L.</b>
Gases de efecto invernadero	<b>GEI</b>
Gasoil marino	<b>MGO</b>
Hidrocarburos	<b>HC</b>
Hidrógeno	<b>H<sub>2</sub></b>
Inyección de agua a la entrada del aire de admisión	<b>WI</b>
Inyección de agua directa en el cilindro	<b>DWI</b>
Iones de hidróxido	<b>OH-</b>
Litro estándar por minuto	<b>SLPM</b>
Metano	<b>CH<sub>4</sub></b>
Metanol	<b>CH<sub>3</sub>OH</b>
Monóxido de carbono	<b>CO</b>
Motores de combustión interna	<b>MCI</b>
Motores de combustión interna alternativos	<b>MCIA</b>
Motores de encendido por compresión	<b>CI</b>
Nitrógeno	<b>N<sub>2</sub></b>
Organización Marítima Internacional	<b>OMI</b>
Organización Meteorológica Mundial	<b>OMM</b>

Oxidación parcial o partial oxidation	<b>POX</b>
Oxígeno	<b>O<sub>2</sub></b>
Pacto Verde Europeo	<b>PVE</b>
Partículas y humos	<b>PM</b>
Pila de combustible	<b>FC</b>
Pila de combustible alcalina	<b>AFC</b>
Pila de combustible de carbonato fundido	<b>MCFC</b>
Pila de combustible de membrana polimérica	<b>PEMFC</b>
Pila de combustible de ácido fosfórico	<b>PAFC</b>
Pila de combustible de óxido sólido cerámico	<b>SOFC</b>
Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque	<b>SEEMP</b>
Poder calorífico inferior	<b>PCI</b>
Presión media efectiva	<b>PME</b>
Punto muerto inferior	<b>PMI</b>
Punto muerto superior	<b>PMS</b>
Reacción de desplazamiento del agua	<b>WSR</b>
Recirculación de gases de escape	<b>EGR</b>
Reducción directa de hierro	<b>DRI</b>
Reformado autotérmico o autothermal reforming	<b>ATR</b>
Reformado con vapor o steam methane reforming	<b>SMR</b>
Relación de compresión	<b>RC</b>
Revoluciones por minuto	<b>RPM</b>
Toneladas métricas	<b>MT</b>
Técnicas de captura, uso y almacenamiento de CO <sub>2</sub>	<b>CCUS</b>
Unión Europea	<b>UE</b>
Áreas de control de emisiones de NO <sub>x</sub>	<b>ECA</b>
Éster metílico de ácidos grasos	<b>FAME</b>
Índice de Diseño de Eficiencia Energética	<b>EEDI</b>
Índice Operacional de Eficiencia Energética	<b>EEOI</b>
Óxido nitroso	<b>N<sub>2</sub>O</b>
Óxidos de azufre	<b>SO<sub>x</sub></b>
Óxidos de nitrógeno	<b>NO<sub>x</sub></b>
Óxidos nítricos	<b>NO</b>



# 1 OBJETO

---

Para hacer frente al cambio climático y al aumento de temperatura de la Tierra, es necesaria una profunda renovación del sector energético mundial, ya que este genera la mayor parte de las emisiones contaminantes globales, mediante el cambio de un sistema basado en fuentes fósiles a uno en el que se empleen recursos renovables tales como la energía solar o la eólica. Sin embargo, hoy en día hay determinados usos finales donde la electrificación a través de fuentes renovables no es fácil de llevar a cabo, como pueden ser el sector transporte, la generación de calor de alta calidad en el sector industrial y el consumo de energía en edificios.

Además, existe otro inconveniente como puede ser la producción variable de las energías renovables haciendo que su demanda no siempre se corresponda con la disponibilidad de estas. Es en este punto donde el hidrógeno ( $H_2$ ), gracias a sus características fisicoquímicas, se puede convertir en una de las claves para llevar a cabo la descarbonización del sector energético mundial y afrontar las cada vez más exigentes medidas que se imponen para lograrlo.

De todo el consumo energético mundial, el sector del transporte es el que más emisiones contaminantes produce. Dentro del mismo, el sector marítimo es esencial para la economía mundial ya que transporta casi el 80% de los bienes del mundo. Sin embargo, debido a los motores lentos diésel de dos tiempos (2T) que emplea, este sector genera grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo enormemente al calentamiento global. El empleo de  $H_2$  en combustión dual junto con el diésel tiene importantes mejoras en muchos aspectos del motor y en términos de emisiones y además hoy en día existen diferentes técnicas para paliar sus inconvenientes. Sin embargo, el almacenamiento de  $H_2$  se presenta como el gran cuello de botella para su empleo como combustible marino, debido a su baja densidad volumétrica. A pesar de ello, el uso de  $H_2$ , junto con otros combustibles marinos alternativos, se presentan como una opción viable en la actualidad y en los años siguientes para disminuir las emisiones cumpliendo con las legislaciones presentes y futuras, descarbonizando así el sector marítimo.

Por todo ello, este trabajo fin de grado tiene como objeto evidenciar que el uso de  $H_2$  como combustible dual es una de las opciones más viables en la actualidad y en los próximos años para lograr una disminución importante en las emisiones del transporte marino, con la meta de descarbonizar el sector.

## 2 ALCANCE

---

El alcance de este trabajo es recoger los principales trabajos de investigación que ponen en valor el uso de H<sub>2</sub> como combustible, enfocados sobre todo al sector del transporte marino.

Se han consultado más de 165 fuentes de información las cuales están recogidas en el apartado de Referencias. Además de recoger los principales proyectos y trabajos de investigación, se presenta la importancia que tiene el H<sub>2</sub> en el sistema energético mundial hoy en día y se realiza un estado del arte de toda la cadena de valor de este combustible, desde los diferentes caminos que hay para obtenerlo hasta las múltiples aplicaciones que tiene, pasando por su almacenamiento y sus formas de transporte.

También se explica su funcionamiento como combustible dual en motores diésel, destacando sus ventajas y describiendo las alternativas que hay para mitigar sus inconvenientes. Igualmente, se refleja la actualidad del transporte marino y las diferentes medidas que existen para regular las emisiones producidas por el mismo.

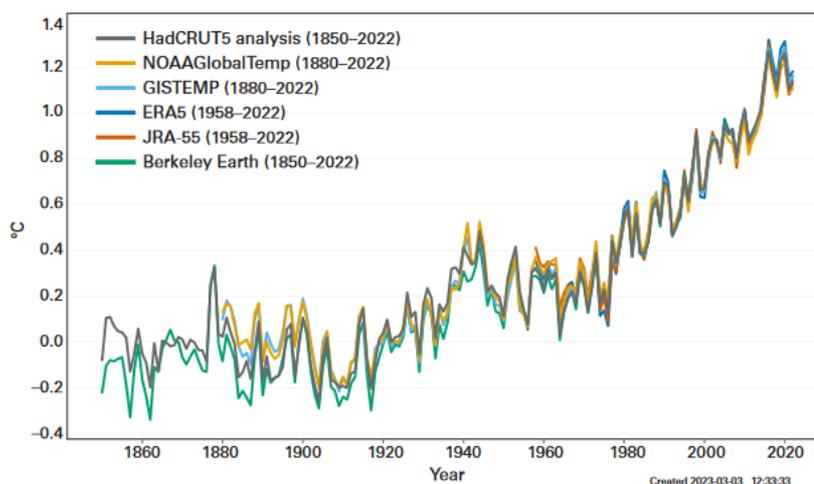
Asimismo, se realiza una revisión de los principales métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub> a bordo de los buques, evaluando sus ventajas e inconvenientes, así como los principales desafíos y obstáculos que conlleva.

Como último apartado, se explican los diferentes combustibles marinos alternativos que existen al H<sub>2</sub> destacando sus ventajas e inconvenientes y qué proyectos se están llevando a cabo hoy en día con los mismos. Para finalizar se exponen las diferentes conclusiones que se han obtenido de este trabajo bibliográfico.

# 3 EL PAPEL DEL HIDRÓGENO EN UN SISTEMA ENERGÉTICO SOSTENIBLE

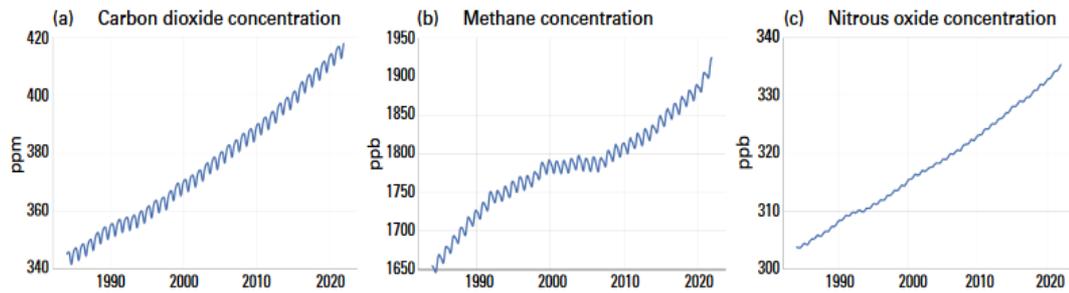
En los últimos años, la lucha frente al cambio climático ha dejado de ser un problema individual de cada país y ha pasado a convertirse en una emergencia mundial que requiere soluciones a todos los niveles y cooperación internacional, para así poder combatirlo y avanzar hacia un marco energético sostenible con bajas o nulas emisiones de gases contaminantes.

Según el consenso científico actual, la acumulación de GEI en la atmósfera provocadas por la actividad humana a raíz de la revolución industrial son el principal responsable del aumento de la temperatura en el planeta [1]. Tal y como refleja la Organización Meteorológica Mundial, OMM, en su artículo “State of the Global Climate 2022”, la temperatura media mundial en el año 2022 fue 1,15°C superior al promedio preindustrial (1850-1900). En la Fig. 3.1 se puede observar el incremento de temperatura desde 1850 hasta la actualidad:



**Fig. 3.1:** Incremento de la temperatura media anual a lo largo de las décadas [1].

Además, también se recoge que en 2021 los niveles de GEI en la atmósfera alcanzaron máximos históricos, con un aumento de las fracciones molares de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ) del 149%, 262% y 124% respectivamente, con respecto a la época preindustrial [1]. En la Fig. 3.2 puede verse este incremento a lo largo de las décadas:

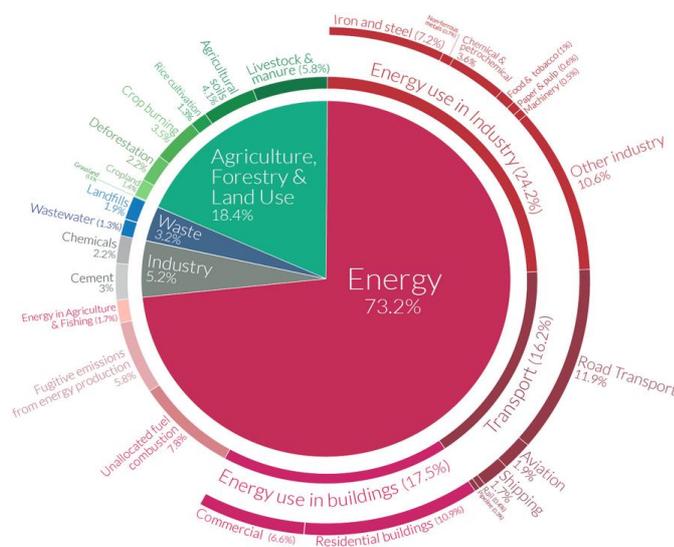


**Fig. 3.2:** Fracción molar anual a nivel mundial de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en ppm [1].

Las consecuencias del cambio climático, además del incremento de la temperatura media del planeta, conllevan a una mayor recurrencia de fenómenos meteorológicos extremos tales como olas de calor y frío, sequías, lluvias y nieves intensas, así como ciclones y tormentas tropicales. Estos factores climáticos pueden provocar, individualmente o en combinación, incendios forestales, inundaciones y deslizamientos de tierras entre otros [1]. Todos ellos suponen múltiples riesgos humanitarios importantes en la sociedad, en especial en aquellas zonas o países que no tienen la capacidad para hacer frente a estos desastres.

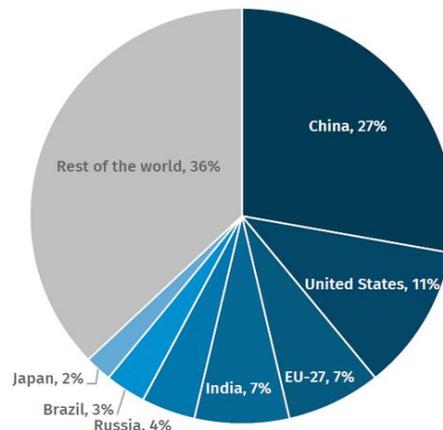
Además de riesgos físicos, también supone impactos socioeconómicos como pueden ser la seguridad alimentaria y el desplazamiento de la población como consecuencia de las peligrosas condiciones meteorológicas, así como riesgos en la estabilidad financiera que, al igual que en el caso anterior, se distribuyen de manera irregular por regiones y grupos económicos [1,2].

Estas emisiones de GEI provienen de una gran variedad de sectores y procesos. Como se refleja en la Fig. 3.3, el sector de la energía emite el 73,2% de las emisiones mundiales de 2016, desglosada principalmente en el transporte, en los edificios y en la industria. La agricultura representa casi un cuarto de las emisiones totales mientras que los sectores que menos contribuyen son los procesos industriales directos y los residuos, con un 5,2% y 3,2% respectivamente [3].



**Fig. 3.3:** Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero en 2016 [3].

Además, aproximadamente dos tercios de las emisiones de GEI del año 2021 se originaron en 8 grandes economías. Liderando la contribución se encuentra China con un 27%, junto con Estados Unidos y Europa con un 11% e India con un 7%. Les siguen países como Rusia, Brasil y Japón [4], todo ello recogido en la Fig. 3.4.



**Fig. 3.4:** Emisiones de gases de efecto invernadero por países en 2021 [4].

Para reducir los riesgos físicos y socioeconómicos del cambio climático, es necesario la aplicación de políticas de mitigación, regulación, fiscales y estructurales que favorezcan los cambios necesarios para impulsar una transición climática. Para poder lograrlo no solo se necesitan medidas certeras, sino que se pongan en marcha de forma coordinada y a escala internacional.

Una de las acciones internacionales para abordar la crisis climática fue la creación de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, conocida por sus siglas como COP, la cual se celebró por primera vez en 1995. Estas cumbres del clima se celebran anualmente y reúnen a casi 200 países para negociar acciones conjuntas frente al calentamiento global. Además de esta, existen otras dos convenciones que abordan otros objetivos importantes hoy en día como son la pérdida de biodiversidad y la desertización [5].

A finales del año 2015 tuvo lugar la COP21, conocida mundialmente como el Acuerdo de París. Este convenio internacional supuso un hito en la lucha contra la crisis climática ya que, por primera vez, se logró que todos los países unieran sus esfuerzos para poder combatirlo y adaptarse a sus efectos, redactando el primer tratado universal sobre el cambio climático. Entró en vigor en noviembre de 2016 y en la actualidad ha sido firmado por 193 países más la Unión Europea (UE). Los objetivos que establece a largo plazo son [6]:

- Limitar el aumento de la temperatura global a no más de 1,5°C por encima de la que había a finales del siglo XIX gracias a la disminución sustancial de las emisiones de GEI.
- Examinar la contribución de los países a la reducción de gases contaminantes cada cinco años.

- Ayudar a los países en desarrollo con financiación climática para que puedan mitigar el cambio climático y mejorar su capacidad de adaptación a sus impactos.

Durante los años posteriores se han celebrado más conferencias mundiales sobre el cambio climático, como por ejemplo la COP22 (2016) en Marrakech (Marruecos), la COP23 (2017) en Bonn (Alemania), la COP24 (2018) en Katowice (Polonia) y la COP25 en Madrid (España). En ellas, los países que se acogieron al Pacto de París han logrado superar sus diferencias, lo que ha permitido alcanzar pactos e implementar medidas internacionales para lograr los objetivos marcados a largo plazo.

Las cumbres del clima que se han celebrado más recientemente han sido la COP26 y la COP27. La primera de ellas, celebrada en 2021, reunió a representantes de más de 200 países cuyo resultado fue el Pacto de Glasgow para el Clima en el que se hizo hincapié en la urgencia de avanzar hacia una economía neutra de carbono. Para ello se reafirmaron los objetivos del Acuerdo de París, así como la necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 45% con el fin de alcanzar las emisiones netas cero para mediados de siglo. Además, se acordó la reducción en el uso del carbón como fuente de energía y la eliminación de las subvenciones a los combustibles fósiles, además de cumplir con urgencia el objetivo de 100.000 millones de dólares estadounidenses (USD) de financiación climática [7,8].

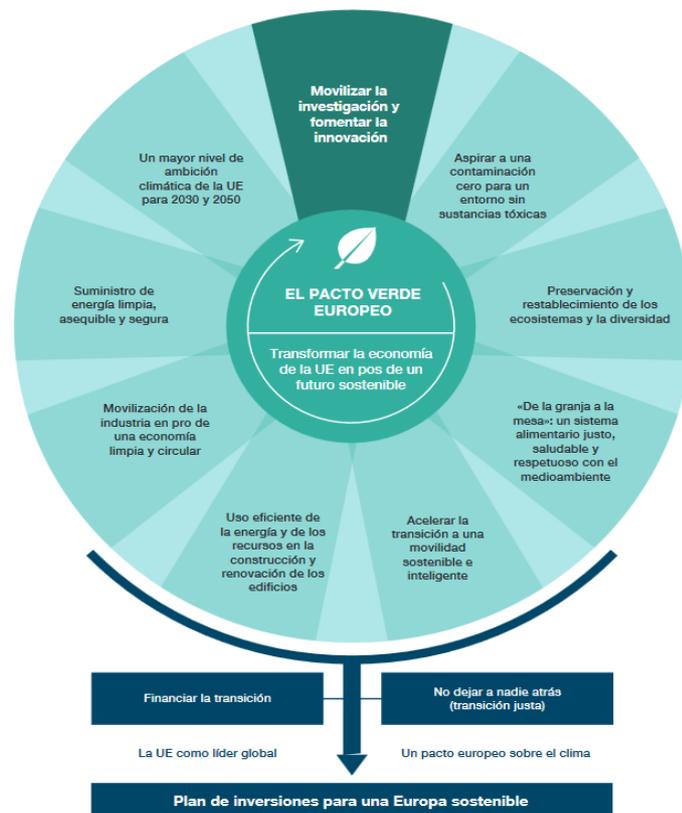
En cuanto a la COP27 celebrada en Egipto a finales de 2022, esta tuvo un perfil más bajo que otras Cumbres del Clima debido a grandes amenazas para la economía mundial como son la inflación y a los altos costes de la energía, provocadas por la guerra en Ucrania. Sin embargo, sí se produjeron avances en sectores específicos como el sector del transporte marino, donde se hablará con más profundidad en el apartado 7 [9].

También se volvió a tratar el importante objetivo de no superar el aumento de la temperatura global de 1,5°C a final de siglo, aplicando iniciativas y medidas reales que den soluciones concretas a la crisis climática. [10]. Sin embargo, el mayor acuerdo fué la creación de un fondo de compensación de pérdidas y daños, conocido como Plan de Implementación de Sharm El Sheikh. El objetivo es ayudar a los países en desarrollo, los cuales son especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático y al que apenas han contribuido para su desarrollo [11].

La UE está muy implicada en la lucha frente a la crisis climática desempeñando un liderazgo internacional en este ámbito. Este compromiso se inició hace décadas con su participación en iniciativas internacionales como la Cumbre de Río o el Protocolo de Kyoto de los años 90 y se intensificó en los primeros años de siglo con la adopción de un paquete de medidas en 2007 sobre energía y clima, con el objetivo de reducir las emisiones de GEI en el continente y de transformar en sector energético en el horizonte de 2020 [12].

El nuevo compromiso de la UE con respecto al cambio climático se aprobó a finales de 2019 y fué el denominado Pacto Verde Europeo (PVE). En este pacto se introdujo un objetivo muy ambicioso con respecto a las emisiones netas de GEI, como es la reducción del 55% de las mismas para mínimo el año 2030 y adoptar el compromiso de alcanzar la neutralidad climática, es decir,

emisiones netas de GEI nulas para 2050. A través de la Ley Europea del Clima se establece el carácter vinculante de dicho compromiso y proporciona el marco jurídico necesario para alcanzarlo [13]. Las iniciativas del PVE pueden verse en la Fig. 3.5:



**Fig. 3.5:** Iniciativas del Pacto Verde Europeo para alcanzar la neutralidad climática en 2050 [13].

Para poder cumplir con dicho pacto y alcanzar sus ambiciosos objetivos se establecieron un paquete de medidas conocido como Objetivo 55, Fit for 55, en su versión en inglés. Se trata de un conjunto de propuestas interconectadas relacionadas con el clima, la energía y el transporte, todas ellas orientadas hacia el mismo objetivo de garantizar una transición justa, competitiva y ecológica de aquí a 2050 [14]. Las medidas que incluye el paquete Objetivo 55 son las siguientes:

- Reforma del régimen de comercio de derechos de emisión de la UE. Se trata de uno de los mayores mercados de carbono del mundo y la principal herramienta de la UE para reducir las emisiones de GEI.
- Fondo para apoyar a los ciudadanos y empresas más afectados, con una financiación de hasta 65.000 millones de euros.
- Establecimiento del Mecanismo de Ajuste de Frontera de Carbono, MAFC, para la creación de incentivos para evitar que aquellas empresas con altas emisiones de GEI se

trasladen fuera de la UE donde hay medidas menos estrictas en materia de política climática.

- Actualización del objetivo de reducción de emisiones de los estados miembros en sectores como el transporte, los edificios, la agricultura y los residuos del 29% al 40%.
- Aumento del objetivo de las absorciones de carbono, proceso por el cual los bosques y la tierra capturan CO<sub>2</sub>, garantizando que el uso de la tierra y la silvicultura se compensen con una absorción equivalente de CO<sub>2</sub>.
- Mayores objetivos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en turismos y furgonetas de aquí a 2030 y un objetivo del 100% para 2035, es decir, todos los turismos y furgonetas nuevas introducidas en el mercado a partir de ese año deberán de ser vehículos de emisión cero.
- Promover la utilización de combustibles más ecológicos en los sectores marítimo y de la aviación.
- Implantación de la infraestructura necesaria para la recarga y repostaje de turismo, camiones, buques y aviones con combustibles alternativos.
- Duplicar la producción de energía renovable de un 22% a un 42,5% para el año 2030.
- Aumentar la eficiencia energética reduciendo el consumo de energía en un 11,7 % en 2030.
- Sustitución gradual del gas natural, G.N., por gases renovables e hipocarbónicos e impulsar la implantación de estos en la UE de aquí a 2030 y después de esa fecha.

Sin embargo, a pesar de todos los acuerdos alcanzados en el Pacto de París y en las recientes COP, los resultados obtenidos no son suficientes para que el aumento de la temperatura media del planeta no supere los 1,5°C. Hoy en día, ya se ha producido un aumento de 1,14°C en comparación con los niveles preindustriales y las emisiones responsables del cambio climático continúan elevándose.

Además, para poder alcanzar el escenario de neutralidad climática para 2050, se necesitará cumplir con el objetivo de emisiones de la Fig. 3.6 que establece la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [4]. Para lograrlo, se necesita realizar una profunda renovación del sector energético, ya que es el responsable de cerca de tres cuartas partes de las emisiones de GEI en la actualidad.

Cambiar de un sistema basado en combustibles fósiles a uno basado en fuentes de energía renovables, como la solar o la eólica, modificará la forma en que los seres humanos generan, almacenan, transportan y consumen energía. La descarbonización del sector energético a través de energías renovables es el principal objetivo por conseguir, sin embargo, actualmente hay determinados usos finales donde la electrificación directa mediante fuentes limpias es difícil de llevar a cabo. Es en este punto donde el H<sub>2</sub> es clave para llevar a cabo la transición energética.

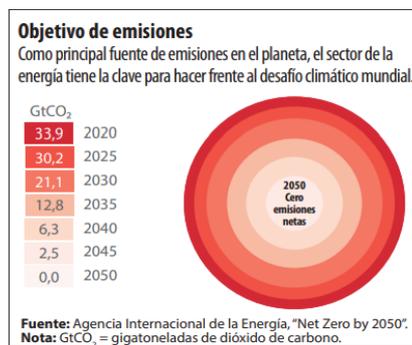


Fig. 3.6: Objetivo de emisiones para alcanzar el escenario “Net Zero” en 2050 [4].

### 3.1 Importancia del hidrógeno en la transición energética

El H<sub>2</sub> es un elemento químico formado por una molécula simple de dos átomos, H<sub>2</sub>, siendo el más abundante en el universo. Sin embargo, este no se encuentra de forma natural en el medio ambiente sino junto a otros elementos como los hidrocarburos (HC) y el agua (H<sub>2</sub>O), por lo que hay que producirlo mediante diferentes procesos, siendo esta la razón por la que se le considera más un vector energético que una fuente de energía [15].

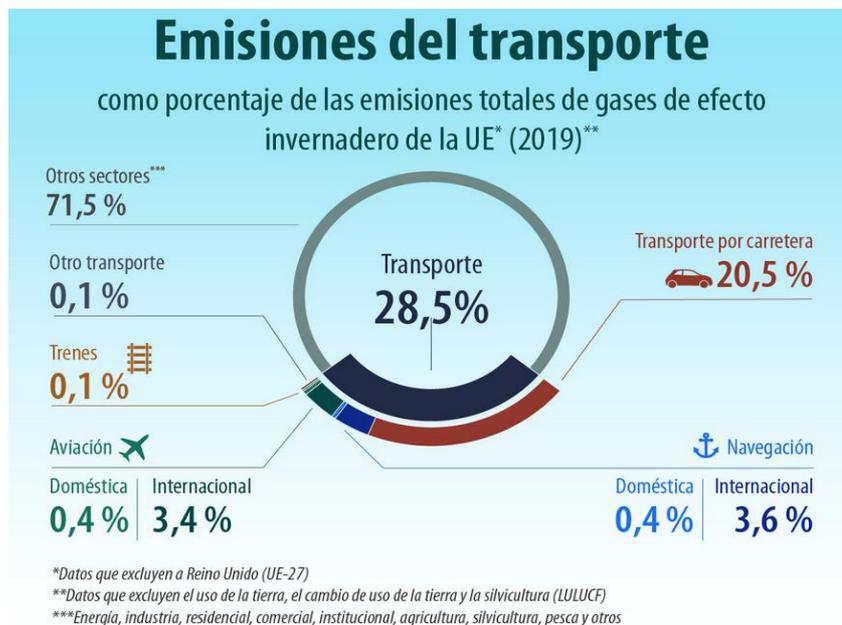
Otras características de interés son su bajo peso molecular y su alto poder calorífico inferior (PCI), de 120 MJ/Kg, casi 3 veces superior a la de la gasolina. Sin embargo, posee una baja densidad volumétrica siendo uno de sus principales inconvenientes, por ejemplo, a la hora de ser almacenado [15]. Pero la gran ventaja del H<sub>2</sub> es que el subproducto de su combustión es vapor de agua, por lo que no emite GEI que contribuyen al cambio climático. Son estas características las que hacen del H<sub>2</sub> el elemento clave para conseguir un planeta libre de emisiones.

Según el informe “Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the european energy transition”, para que Europa pueda llevar a cabo la descarbonización del sector energético, el uso de H<sub>2</sub> es totalmente indispensable [16]. Esta afirmación se sustenta en tres argumentos fundamentales:

1. El H<sub>2</sub> es la mejor elección para descarbonizar aquellos sectores donde la electrificación es difícil de llevar a cabo y poco competitiva.

El sector transporte es clave para la transición energética ya que representa casi un tercio de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Europa, como se puede ver en la Fig. 3.7. Las baterías actuales presentan desventajas tales como un bajo rango de operación debido a una baja densidad de energía, altos costes iniciales y una recarga lenta. Además, el uso de H<sub>2</sub> requiere menos materias primas en comparación con las baterías y su infraestructura para el reabastecimiento ocupa una décima parte en las ciudades, así como una carga rápida.

Por estos motivos, el H<sub>2</sub> puede ser una tecnología muy a tener en cuenta en el sector del transporte por carretera, sin embargo, para el transporte por vía aérea y marítima, donde el uso de baterías no se contempla, sí que puede ser una gran opción para lograr los objetivos y poder reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en 825 Mt para el año 2050 [16].



**Fig. 3.7:** Emisiones contaminantes procedentes del transporte de la UE en 2019 [17].

La producción de calor de alta calidad es el sector industrial que más contribuye al cambio climático, responsable de emitir 390 toneladas métricas (Mt) de CO<sub>2</sub> cada año en Europa [16]. Descarbonizar los procesos industriales que necesitan bajas y medias temperaturas es posible mediante la electrificación a través de calderas y hornos eléctricos. Sin embargo, por su capacidad de alcanzar altas temperaturas, el H<sub>2</sub> es la mejor opción para generar calor de alta calidad sustituyendo a los HC como el G.N.

Además, también es el mejor suministrador de energía en otros sectores industriales como la industria química, utilizado como materia prima para la producción de metanol (CH<sub>3</sub>OH) o amoníaco (NH<sub>3</sub>), en las refinerías y en la siderurgia. Haciendo un uso combinado de las energías renovables y de H<sub>2</sub>, es posible reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en aproximadamente 220 Mt para el año 2050 [16].

Un ejemplo de ello es la iniciativa que pusieron en marcha en 2021 las empresas Ovako y Linde Gas, donde utilizaron H<sub>2</sub> en lugar de gas natural licuado, G.N.L., para generar calor en la fabricación de acero. Al obtener como subproducto vapor de agua, se trata de una iniciativa que puede hacer este tipo de industrias más sostenibles [18].

Otra empresa que pretende usar H<sub>2</sub> para obtener calor industrial es Star Scientific. Con su tecnología HERO pueden alcanzar una poderosa fuente de calor de hasta 700°C, con la interacción de oxígeno (O<sub>2</sub>) e H<sub>2</sub> en presencia de un catalizador, utilizada para el saneamiento de operaciones de producción de alimentos, reduciendo el consumo de G.N. y ayudando a la descarbonización del sector alimenticio [19,20].

El consumo de energía en los edificios constituye el segundo sector que más emisiones emite en Europa, aproximadamente más de 530 Mt de CO<sub>2</sub>, la mayoría procedente de edificios antiguos de más de 25 años [16]. En los más modernos, se puede reducir el consumo de energía haciendo uso de medidas de eficiencia energética como un mejor aislamiento térmico, y la calefacción de los hogares se puede llevar a cabo a través de bombas de calor.

No obstante, estas mejoras en muchos casos no serán prácticas o incluso imposibles para edificios más antiguos, por lo que una combinación de bombas de calor y uso directo en calderas de H<sub>2</sub> es una de las opciones para sustituir al G.N. y realizar la descarbonización en las viviendas. Además, el uso de pilas de combustibles (FC), dispositivos que transforman la energía química del H<sub>2</sub> en electricidad, es otra de las alternativas para llevar a cabo no solo la generación de calor en los edificios sino también la producción de electricidad simultáneamente, lo que se conoce como cogeneración (CHP) o micro-CHP [16].

En Europa, ya se ha empezado la descarbonización de este sector a través del proyecto ENE-FIELD, que ha conseguido la instalación de decenas de miles de sistemas micro-CHP alimentados por FC en viviendas europeas [16].

Igualmente, la tecnología HERO también puede usarse para la calefacción en los edificios usando como combustible H<sub>2</sub>, desplazando así los sistemas tradicionales y logrando una producción de calor urbano limpia y eficiente [19,20].

**2.** El H<sub>2</sub> puede ayudar a permitir que las energías renovables tengan una contribución aún mayor.

Puede almacenar la electricidad generada por fuentes limpias durante varios días o semanas, ayudando con la producción variable de las energías renovables donde la demanda no siempre se corresponde con la disponibilidad. También puede transportar esta energía generada a través de regiones con amplios recursos renovables con otras que no disponen de ellos situadas a grandes distancias [16].

3. La transición energética a través de H<sub>2</sub> cumple con las necesidades y las expectativas de las personas igual o más que las opciones actuales.

Por ejemplo, la autonomía y recarga de los vehículos usando H<sub>2</sub> es idéntica a la que ofrecen los motores de combustión actuales y el consumo de energía en los hogares se realiza utilizando las redes de G.N. ya instaladas. Si esto no fuera así y el H<sub>2</sub>, aun siendo indispensable para reducir las emisiones contaminantes, no convenciera las expectativas de los seres humanos, la puesta en marcha de un sistema energético sostenible y libre de emisiones sería mucho más difícil de llevar a cabo [16].

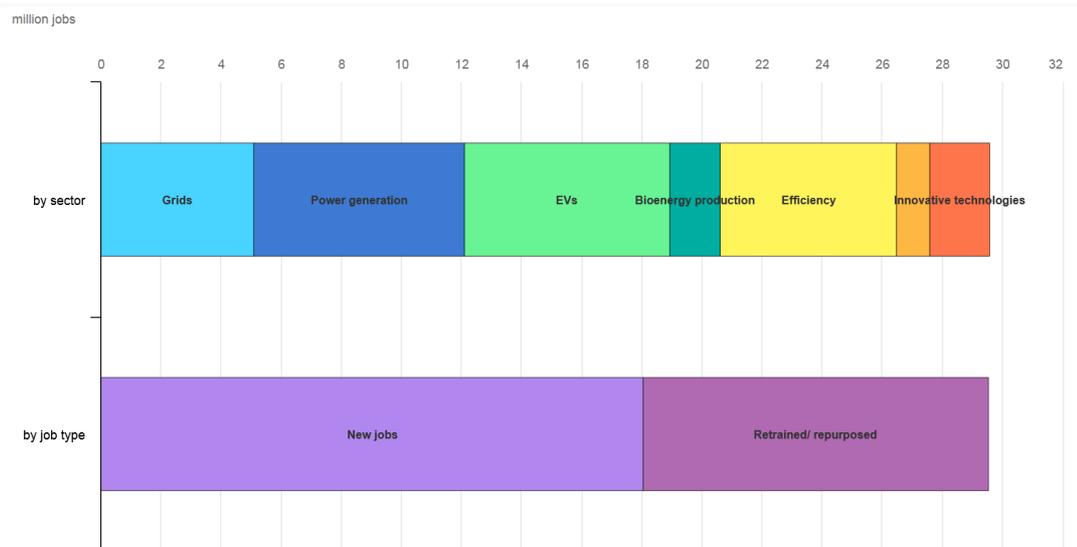
Alcanzar un escenario donde las emisiones sean mínimas, no solo tendrá un impacto beneficioso en el clima si no también en la economía y en la sociedad. Acorde con el escenario que presenta el informe “Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the european energy transition”, en 2050 el H<sub>2</sub> podría llegar a cubrir el 24% de la demanda de energía final, así como reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en aproximadamente 560 Mt y contribuir a la creación de 5,4 millones de puestos de trabajo [16], como se observa en la Fig. 3.8.



**Fig. 3.8:** Beneficios de la utilización de H<sub>2</sub> en 2050 [16].

Estas ventajas socioeconómicas también se recogen en el informe “Net Zero by 2050: A roadmap for the Global Energy Sector” de la IEA, donde se estima que se generarían 14 millones de nuevos puestos de trabajo en el suministro de energía para el año 2030. Además, los nuevos sectores que empleen energías limpias como el sector del transporte, sector industrial o el sector de eficiencia energética, requerirán alrededor de otros 16 millones de nuevos empleados [21].

Esto significa que la transición energética donde la tecnología del H<sub>2</sub> es esencial, ayudaría a crear unos 30 millones de nuevos puestos de trabajo generando no solo importantes ventajas ambientales sino también sociales y económicas [21]. En la Fig. 3.9 se puede observar los puestos de trabajo que generarían la utilización de energías limpias desglosados por sectores:



**Fig. 3.9:** Empleo en energías renovables desglosado por sectores en 2030 [21].

### 3.2 Proyectos Internacionales y Nacionales

La cooperación internacional entre países es imprescindible para el crecimiento del H<sub>2</sub> ya que como se ha visto, es la clave para acelerar el cambio hacia un sistema energético sostenible. Cada vez es mayor el número de países que invierten en el desarrollo de tecnologías de H<sub>2</sub>, así como los sectores donde se utiliza. De esta manera, en 2017 surgió el Council Hydrogen o Consejo de Hidrógeno, que es una agrupación de empresas formada en sus inicios por 13 miembros entre los que destacan Toyota, Honda, Hyundai y BMW [22].

Actualmente está formada por 145 miembros, los cuales se pueden observar en la Fig. 3.10, y cuya función es ayudar a limitar el calentamiento global de acuerdo con los Pactos Climáticos de París del año 2015 utilizando el H<sub>2</sub> como piedra angular para la transición energética [22].

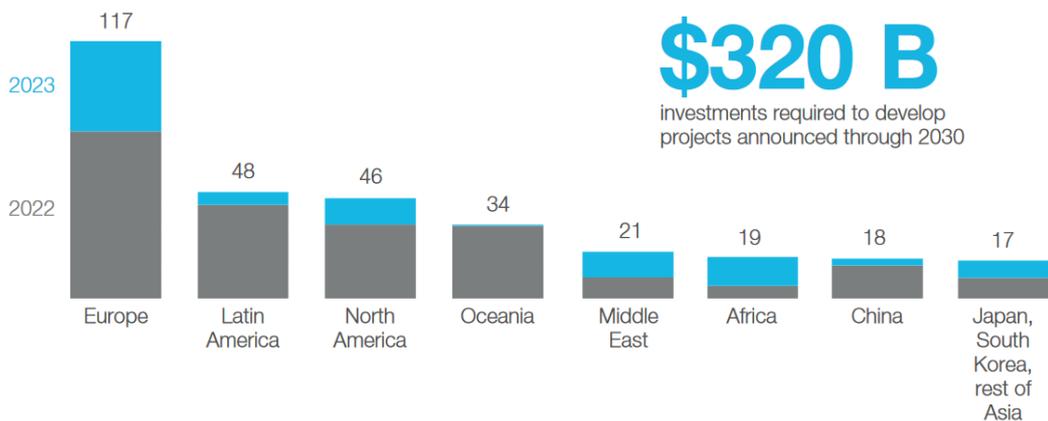


Fig. 3.10: Miembros del Consejo del Hidrógeno [22].

### 3.2.1 Proyectos Internacionales

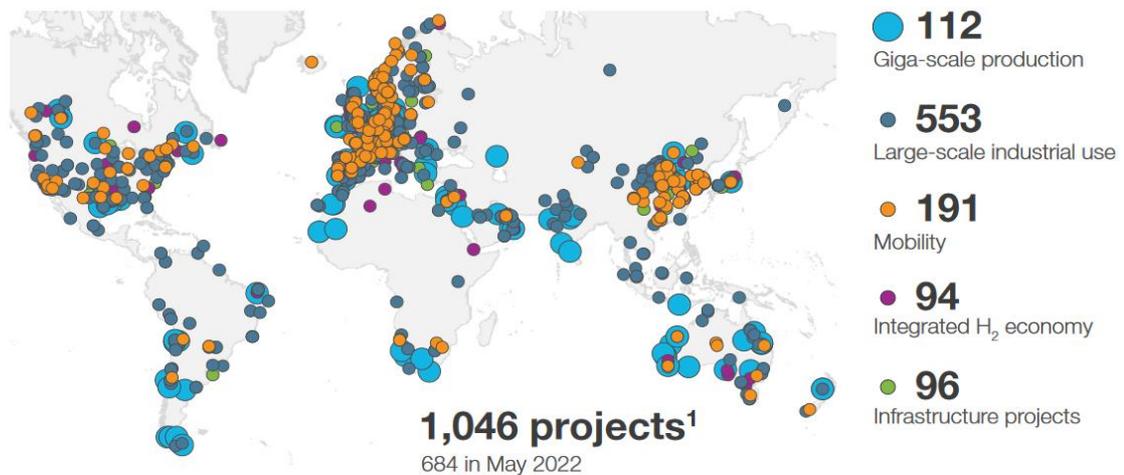
Hasta inicios de 2023 se han anunciado más de 1.000 proyectos a gran escala a lo largo de toda la cadena de valor del H<sub>2</sub>, lo cual supone un aumento de más de 350 nuevos proyectos con respecto a 2022. De todos ellos, casi 800 pretenden estar total o parcialmente operativos para el año 2030 representando una inversión total de 3.200 millones de USD [22].

La región líder mundial en proyectos de H<sub>2</sub> y con el mayor crecimiento absoluto sigue siendo Europa, con un 35% de las inversiones globales. Tanto América del Norte como América del Sur siguen a Europa con un porcentaje de inversiones totales del 15% cada una [22]. En la Fig. 3.11 se observa las inversiones de cada región con respecto al año 2022 donde se puede apreciar un crecimiento en cada una de ellas.



**Fig. 3.11:** Inversiones de 2023 para proyectos de H<sub>2</sub> comparados con 2022 [22].

Los proyectos a escala giga, es decir, de más de 1 GW de electrólisis para la producción de H<sub>2</sub> renovable o con bajas emisiones de carbono representan 112 propuestas de todas las totales siendo casi el doble que las del año 2022. De todas ellas, 91 son para producción de H<sub>2</sub> renovable y 21 para H<sub>2</sub> bajo en carbono. El resto de los proyectos se dividen para uso a gran escala industrial, movilidad, infraestructura y para su integración en la economía [22]. Todo esto queda reflejado en la Fig. 3.12:



**Fig. 3.12:** Total de proyectos globales de H<sub>2</sub> hasta inicios de 2023 [22].

Sin embargo, a pesar de que las inversiones globales han aumentado un 35% con respecto al año pasado, de 240 a 320 mil millones de USD, aún queda mucho por hacer ya que en torno a un 30% y 40% de los proyectos aún están en fases tempranas de desarrollo. Para poder alcanzar un escenario de cero emisiones netas, es necesario más del doble de las inversiones actuales para el año 2050, así como que los proyectos anunciados se desarrollen y puedan desplegarse [22].

En la Fig. 3.13 quedan recogidos los principales proyectos a nivel mundial centrados en la producción de H<sub>2</sub> a escala de GW, entre los que destacan los siguientes:



**Fig. 3.13:** Principales proyectos a nivel mundial de producción de H<sub>2</sub> [23].

HyDeal Ambition es una plataforma industrial lanzada en 2020 por la empresa Soladvent, que reúne a 30 empresas las cuales cubren toda la cadena de valor del H<sub>2</sub> renovable, desde la generación de energía solar y fabricación de electrolizadores hasta su financiación mediante deuda y capital [23]. Las empresas que forman parte de este proyecto pueden verse en la Fig. 3.14:

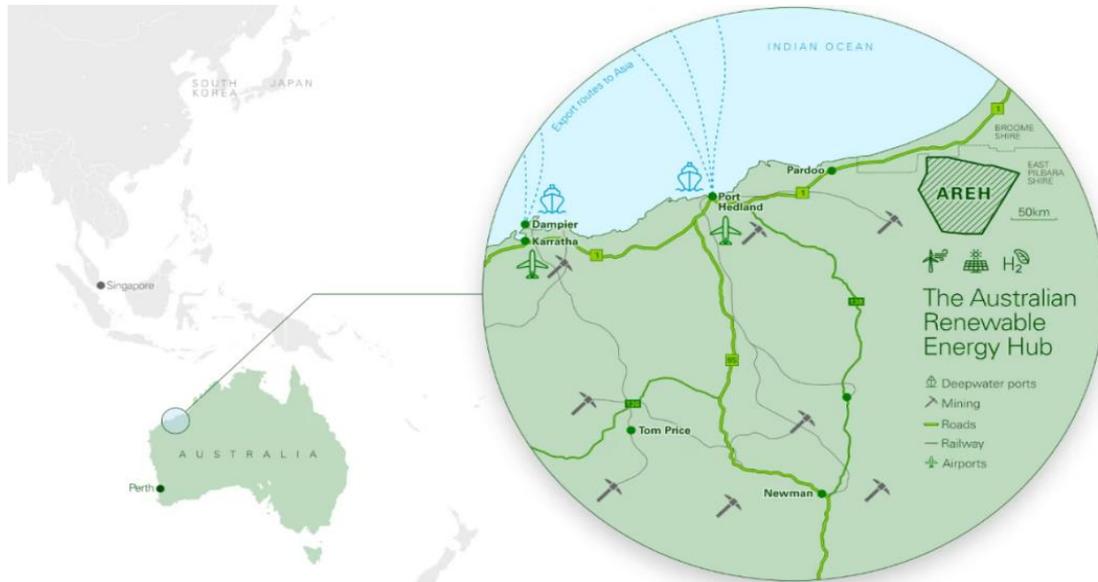


**Fig. 3.14:** Agrupación de empresas del proyecto HyDeal Ambition [23].

Este proyecto desarrolló el mayor sistema integrado de H<sub>2</sub>, abarcando desde España hasta Francia y Alemania, tratándolo como un producto energético a gran escala y no como un negocio de pequeños proyectos locales. Su objetivo es conseguir la producción de H<sub>2</sub> renovable a un coste competitivo con los combustibles fósiles en Europa. Además, tiene los beneficios adicionales de crear valor agregado y empleo dentro de la UE y de tener independencia de las cadenas de suministros internacionales, fomentando la industria europea de forma sostenible [23].

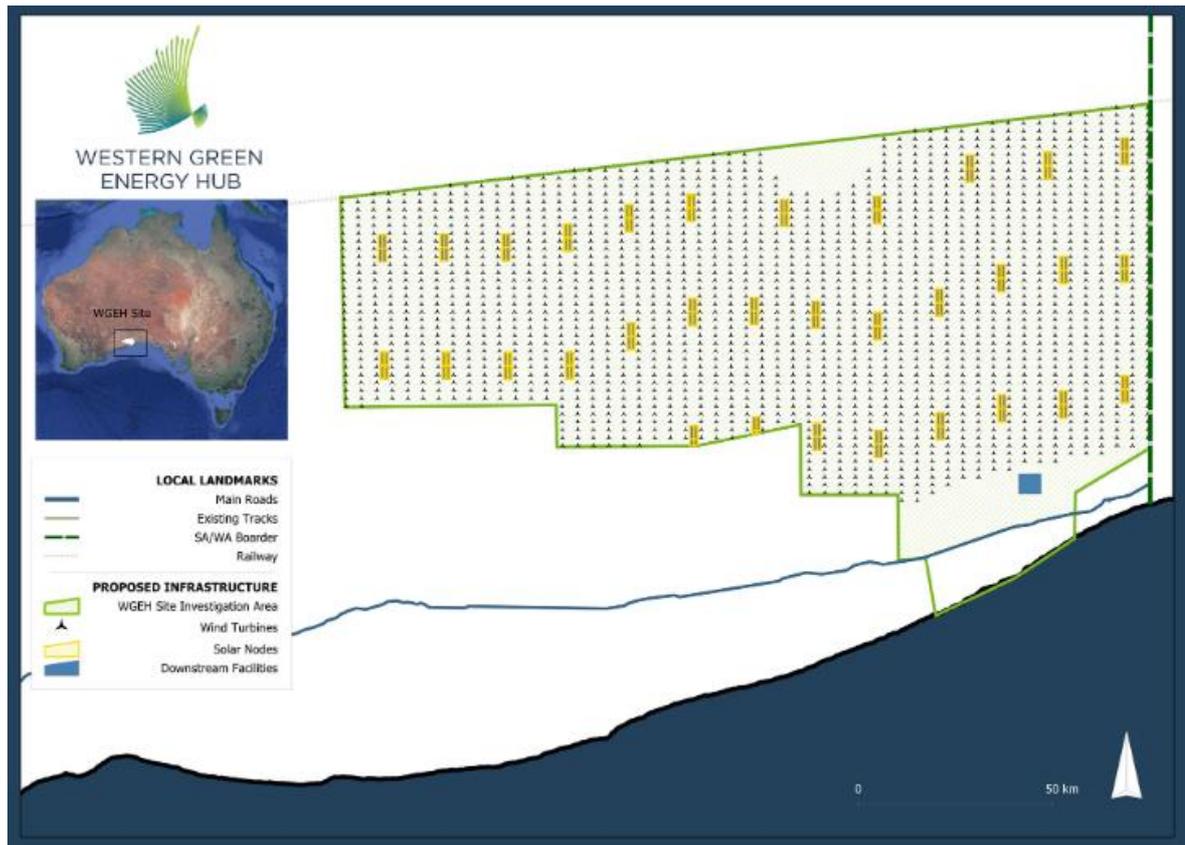
Australia tiene en marcha la construcción del proyecto llamado Asian Renewable Energy Hub, situado en la costa occidental como refleja la Fig. 3.15, que consta de una serie de plantas

con electrolizadores para la producción de H<sub>2</sub> renovable con capacidad total de hasta 26 GW de energía solar y eólica. Está desarrollado por un consorcio de empresas entre las que destacan InterContinental Energy, Vestas y CWP Energy Asia y se estima que creará hasta 5.000 empleos destinados a su construcción y otros 3.000 para la operación de la planta, con una producción de alrededor de 1,6 millones de Mt de H<sub>2</sub> para exportar a Asia a partir de 2027 [24].



**Fig. 3.15:** Localización del proyecto Australian Renewable Energy Hub [24].

Además, cuenta con otro proyecto llamado Western Green Energy Hub situado en la costa sur del país como se observa en la Fig. 16, donde se aprovechará la energía solar y eólica con una capacidad de hasta 50 GW para el año 2030. Una vez que esté en pleno funcionamiento, se prevé que produzca 3,5 Mt de H<sub>2</sub> limpio al año [25].



**Fig. 3.16:** Localización del proyecto Western Green Energy Hub [25].

Otros de los proyectos con la producción de H<sub>2</sub> más grande del mundo se sitúa en Kazajstán, aunque en realidad el proyecto corre a manos de la empresa europea SVEVIND Energy Group. Con una capacidad de alrededor de 40 GW de energía renovable, está previsto que suministre hasta 2 Mt de H<sub>2</sub> limpio para el año 2032 [26].

El Mar del Norte tiene un importante potencial para la generación de energías renovables por lo que son muchos los proyectos que quieren explotarlo. Uno de ellos es Aqua Ventus, que busca generar hasta 10 GW de potencia gracias a las turbinas eólicas marinas para producir 1 Mt de H<sub>2</sub> para el año 2035 [27].

Uno de los principales proyectos en América es el llamado H<sub>2</sub> Magallanes, el cual está situado en Chile y tiene una capacidad de 10 GW de energía eólica. Se espera que las obras finalicen en 2025 y una vez que esté en funcionamiento reduzca las emisiones contaminantes de CO<sub>2</sub> en hasta 5 Mt anuales [28].

Arabia Saudita planea introducirse en el mercado del H<sub>2</sub> y disminuir su dependencia de los combustibles fósiles a través del Helios Green Fuels Project. Situado en la ciudad de Neom, debería de estar en funcionamiento en 2025 y tendría la capacidad para producir 650 toneladas de H<sub>2</sub> renovable por día mediante la electrólisis a través de energía solar y eólica [29].

Además de estos planes para la producción de H<sub>2</sub> con energías renovables, hay otros proyectos centrados en su utilización en determinadas aplicaciones finales ayudando a la descarbonización de estos sectores. Algunos de los más destacados son los siguientes:

### 3.2.1.1 Proyectos en Industria

En cuanto al sector industrial dedicado al refinado de petróleo, la empresa Essar Energy ha invertido 55 millones de USD en la instalación de un horno en la refinería Stanlow capaz de operar al 100% con H<sub>2</sub>. Estará en operación en 2023 usando combustibles fósiles hasta el año 2026, donde utilizará H<sub>2</sub> obtenido a partir de G.N. con técnicas de captura, uso y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCUS) ahorrando alrededor de 16.000 toneladas de emisiones contaminantes al año [30].

Además del refinado del crudo, en las refinerías el H<sub>2</sub> también puede usarse para la producción de combustibles sintéticos de bajas emisiones o para la mejora de biocombustibles. Un ejemplo de ello es el proyecto Varennes Carbon Recycling en Canadá, el cual transformará más de 200.000 toneladas de residuos no reciclables y biomasa en 125 millones de litros de biocombustibles usando como combustible H<sub>2</sub> producido en un electrolizador de 88 MW de potencia. Su puesta en marcha será en 2025 con una inversión de más de 875 millones de dólares canadiense (CAD) y además de reducir las emisiones contaminantes en el proceso ayudará a la creación de más de 500 puestos de trabajo [31].

En 2021, la empresa Alemana Atmosfair lanzó el primer proyecto para la producción de combustibles sintéticos utilizando H<sub>2</sub> obtenido por fuentes renovables, llegando a un acuerdo con la aerolínea Lufthansa de 25.000 litros de queroseno sintético, promoviendo así el camino hacia un transporte aéreo libre de emisiones [32].

El H<sub>2</sub> puede ayudar a descarbonizar la obtención de acero a partir de menas de hierro, lo que se conoce como reducción directa del hierro (DRI). En 2019, la empresa ArcelorMittal anunció la construcción de una planta para producir acero a partir del método DRI empleando únicamente H<sub>2</sub> con electricidad procedente de un parque eólico, con una inversión de 110 millones de euros. Se prevé su puesta en marcha para finales de 2025 con una producción inicial de 100.000 toneladas de acero [33].

### 3.2.1.2 Proyectos en Transporte

El mercado de vehículos terrestres motorizados con pilas de H<sub>2</sub> se va a expandir durante la próxima década gracias a los numerosos anuncios en el sector del transporte, como pueden ser:

#### **Vehículos de pasajeros ligeros:**

- BMW comenzó a producir a finales de 2022 una pequeña serie del modelo iX5 Hydrogen, que se trata de un vehículo con FC capaz de ofrecer un rendimiento completo a temperaturas extremas de aproximadamente -20°C [34].

- La empresa Changan Motors lanzó a mediados de 2022 el primer automóvil de FC para ser producido en masa en China. Asegura un consumo de H<sub>2</sub> de 0,65 g/100 km asegurando una autonomía total de 700 km [35].
- En 2021, la empresa Jaguar Land Rover empezó a desarrollar un prototipo de vehículo propulsado por FC de H<sub>2</sub> con objetivo de alcanzar en 2036 unas emisiones netas cero en toda su cadena de suministros, operaciones y productos [36].
- El principal fabricante de China de vehículos deportivos finalizó su etapa de planificación de automóviles alimentados por FC, planeando lanzarlos bajo una marca de alta gama durante 2023 [37].

### **Vehículos de pasajeros pesados:**

- West Midlands desplegará en Reino Unido una flota de 124 nuevos autobuses alimentados con H<sub>2</sub> uniéndose a la flota ya existente de 20 buses, todo ello gracias a una inversión de 30 millones de libras [38].
- A principios de 2022, el aeropuerto de Kansai en Japón lanzó un servicio de autobús lanzadera propulsado con FC de H<sub>2</sub> [39].
- Las empresas Wrightbus y Solaris desplegarán 60 y 20 autobuses con FC a la ciudad de Colonia respectivamente durante el transcurso de 2023 [40,41].

### **Vehículos de mercancías pesados:**

- Cummings y Daimler Truck North America están desarrollando un camión para servicio pesado basado en H<sub>2</sub>, estando disponible para el año 2024 [42].
- Hyzon Motors espera suministrar durante 2023 hasta 80 camiones impulsados por FC, ayudando así a mejorar la infraestructura del H<sub>2</sub> en Francia [43].
- Hyundai Motor desplegó 47 unidades de camiones pesados con la tecnología XCIENT de FC en el año 2020, llegando a acumular más de 4 millones de km de conducción hasta julio de 2022. Tienen planeado el despliegue de 1.600 unidades de estos camiones para el año 2025 [44,45].

## **Sector Ferroviario:**

El uso de H<sub>2</sub> en trenes de pasajeros está empezando a aumentar, especialmente en Europa, con proyectos como el de la empresa Alstom que pretenden reemplazar gradualmente los trenes diésel. Para ello inició operaciones a mediados de 2022 para poner en servicio 14 trenes de FC en Alemania, formando así la primera ruta 100% alimentada con H<sub>2</sub>. También distribuirá estos trenes a otros países como Francia e Italia [46].

Además de Alstom, Siemens Mobility ha desarrollado su tren de pasajeros motorizado con H<sub>2</sub> comenzando las pruebas a mediados de 2023 para entrar en servicio en Alemania a principios de 2024 [47].

Aparte de los proyectos basados en FC, hay otras empresas que están desarrollando motores de combustión interna (MCI) usando H<sub>2</sub> en lugar de gasolina o gasoil. Es el caso de la compañía ORECA, constructora de automóviles de competición, que tiene como objetivo el desarrollo de un motor térmico usando H<sub>2</sub> como fuente de energía [48]. Otro ejemplo es la presentación del primer camión pesado en China a mediados de 2022 propulsado por un MCI alimentado por H<sub>2</sub>, desarrollado por las empresas Sinotruk y Weichai [49].

Asimismo, el fabricante estadounidense de trenes Wabtec junto con varios socios de investigación trabajarán conjuntamente durante 4 años para desarrollar locomotoras impulsadas por un MCI alimentado con H<sub>2</sub>. Su objetivo es diseñar motores de trenes con la misma rentabilidad y potencia que los motores diésel actuales, reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> de los 25.000 trenes que ya están en operación en Estados Unidos [50].

## **Sector Aéreo:**

Como se comentó anteriormente, en 2021 ya se produjeron los primeros pasos para el uso de H<sub>2</sub> en la aviación, con el acuerdo entre Atmosfair y Lufthansa para la venta de 25.000 litros de queroseno sintético obteniendo a través de H<sub>2</sub> renovable. Otro proyecto basado en la producción de queroseno sintético es el Green Fuels Hamburg, formado por un consorcio de empresas que incluyen a Uniper, Airbus, Siemens y Sasol cuyo objetivo es la obtención de 10.000 toneladas de queroseno sintético a través de H<sub>2</sub> y biomasa [51].

Otra empresa como Hypoint, tiene puesta su mirada en el desarrollo de FC para aplicaciones de aviación con planes para su comercialización en 2025. Pero de entre todos los fabricantes de aviones, Airbus tiene el programa más ambicioso con el objetivo de desarrollar aviones propulsados gracias a la combustión de H<sub>2</sub> para 2035 [52].

## **Sector Marítimo:**

La Compagnie Maritime Belge, CMB, empresa pionera en el uso de H<sub>2</sub> para el transporte marino, está desarrollando el proyecto Hydrotug para construir el primer remolcador alimentado con combustible dual H<sub>2</sub>-diesel del mundo, con una capacidad de 415 kg de H<sub>2</sub> comprimido le permite ahorrar emisiones equivalentes a 350 coches [53]. El gobierno Noruego en su plan de reducir las emisiones navales en un 50% para 2030, se ha comprometido a la construcción de 5 centros de producción de H<sub>2</sub> y alimentar así a 30-40 barcos. Países como Alemania o Canadá han comenzado las pruebas para desarrollar sus primeros barcos y botes de H<sub>2</sub> [52].

### **3.2.1.3 Proyectos en Edificios**

Además del proyecto ENE-FIELD, comentado anteriormente donde se instaló decenas de miles de sistemas micro-CHP en Europa, también ha tenido lugar el proyecto ENE-FARM liderado por empresas japonesas. Estas han desplegado durante más de 10 años sistemas de CHP a nivel doméstico para la producción de calor y electricidad gracias a FC de H<sub>2</sub>, llegando a superar los 430.000 sistemas a final del año 2021. Hoy en día, las FC se instalan de manera muy eficiente en el sector de la edificación en varias partes del mundo como puede ser Japón, Europa, Corea y Estados Unidos [54].

Un proyecto en curso de la UE llamado TULIPS, con una financiación de 25 millones de euros por parte del PVE, tiene como objetivo lograr la sostenibilidad de las operaciones que se realizan en los aeropuertos. Producen H<sub>2</sub> a través de un electrolizador para utilizarlo en una FC y así generar tanto electricidad como calor [52].

### **3.2.1.4 Proyectos en Generación de Electricidad**

En Australia se llevó a cabo el proyecto Port Lincoln donde se integraron varias tecnologías de H<sub>2</sub>, como fueron una planta electrolizadora de 15 MW, una instalación de producción de NH<sub>3</sub>, utilizando para suministrar energía a la red una celda de combustible de 5 MW y una turbina de gas alimentada 100% de H<sub>2</sub> renovable con una potencia de 10 MW [55]. Asimismo, hay otras empresas que están desarrollando turbinas de gas de H<sub>2</sub>, como puede ser el fabricante Coreano Doosan.

Todos estos trabajos de investigación y proyectos que se están llevando a cabo por diferentes países y empresas que abarcan toda la cadena de valor del H<sub>2</sub>, desde su producción, almacenamiento, distribución y aplicación, son esenciales para desplazar los combustibles fósiles y hacer del H<sub>2</sub> no solo la tecnología del futuro sino del presente.

### 3.2.2 Proyectos Nacionales

España tiene un gran potencial en el ámbito del H<sub>2</sub> renovable o bajo en carbono, debido principalmente a tres factores clave. Primero de todo, tiene una posición geográfica privilegiada que le permite producir H<sub>2</sub> renovable, no sólo para satisfacer sus propias necesidades, sino para exportarlo al norte de Europa. En segundo lugar, el país cuenta con una importante base científica y tecnológica y, por último, cuenta con empresas y entidades que cubren toda la cadena de valor del H<sub>2</sub>, desde su producción hasta su aplicación [56].

Además, el desarrollo de esta fuente de energía renovable traerá consigo multitud de beneficios para España como pueden ser empresariales, económicos, sociales y ambientales. Algunas de estas oportunidades se recogen en el informe “Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable” publicado por el Gobierno de España en 2020, las cuales son [57]:

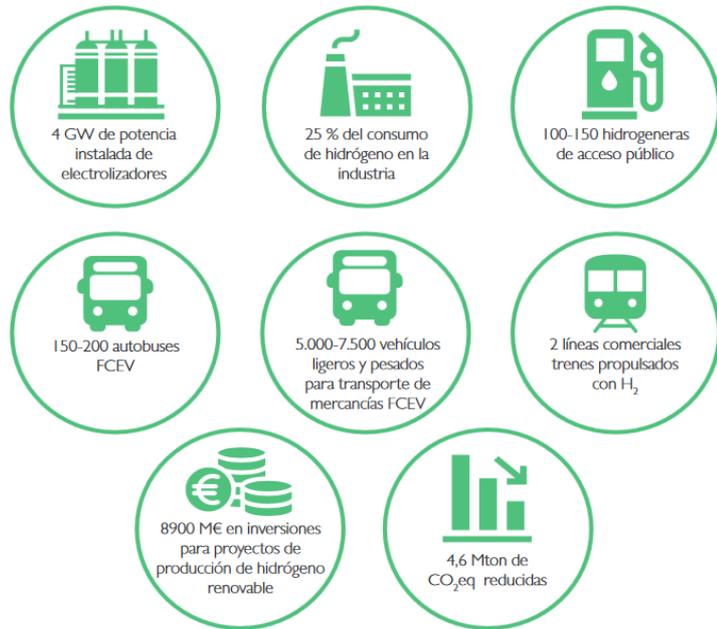
- Eliminar las emisiones de GEI a la atmósfera en sectores o procesos difícilmente descarbonizables para alcanzar los objetivos de la neutralidad climática en 2050.
- Desarrollar todos los procesos que componen la cadena de valor del H<sub>2</sub> posicionando a España como referente tecnológico.
- Aumentar el porcentaje de energías renovables en el sistema eléctrico obteniendo un mayor grado de gestionabilidad, convirtiendo a España en una de las potencias europeas de generación de energía limpia.
- Disminuir la dependencia energética nacional al reducir las importaciones de combustibles fósiles procedentes de otros países.
- Favorecer la descarbonización de sistemas energéticos aislados como pueden ser los territorios insulares.
- Aumentar el crecimiento económico del país al potenciar la I+D+i energética española.

Hoy en día, se tasa el consumo de este elemento en 500.000 toneladas al año. El problema es que actualmente el 99% del H<sub>2</sub> consumido, utilizado principalmente en refinerías y en la industria química, es producido mediante fuentes no renovables [57].

Para revertir esta situación y poder alcanzar las emisiones netas cero de GEI en 2050, el

Gobierno de España establece la siguiente serie de objetivos de cara al año 2030 que permitirían reducir las emisiones en 4,6 Mt de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en el período de 2020-2030 y con la ayuda de inversiones estimadas en 8.900 millones de euros [34]. En la Fig. 3.17 se pueden observar dichos objetivos:

- Instalación de al menos 4 GW de potencia de electrolizadores, estimando que para el año 2024 podría alcanzarse un valor total de potencia instalada de electrolizadores de entre 300 y 600 MW.
- Contribución mínima del H<sub>2</sub> renovable del 25% con respecto al total consumido en 2030.
- Flota de al menos 150-200 autobuses con FC de H<sub>2</sub>, en especial en grandes ciudades.
- Un total de al menos 5.000-7.500 vehículos destinados al transporte de mercancías con FC de H<sub>2</sub>.
- Acceso público de 100-150 estaciones de repostaje de H<sub>2</sub>, HRS, con una distancia máxima de 250 Km entre ellas para el repostaje de los vehículos anteriormente mencionados.
- En vías actualmente no electrificadas, la utilización de trenes propulsados con H<sub>2</sub> en al menos dos líneas comerciales de media y larga distancia.
- Utilización de maquinaria handling para la utilización de FC de H<sub>2</sub> limpio en los principales puertos y aeropuertos.



**Fig. 3.17:** Objetivos de España para el año 2030 [57].

La Asociación Española del Hidrógeno, AeH<sub>2</sub>, publicó en julio de 2023 el informe “Análisis del Censo de Proyectos” donde recopila propuestas de demostración que están en desarrollo o activo en España. Hasta la fecha, el censo incluye un total de 123 proyectos que abarcan toda la cadena de valor del H<sub>2</sub> y provienen de 46 empresas asociadas, pudiendo observar su ubicación en la Fig. 3.18 [56]:



**Fig. 3.18:** Proyectos registrados en el Censo de Proyectos clasificado por actividades [56].

Como se puede observar, la mayoría de los proyectos se centran en la producción de H<sub>2</sub> donde el 91% tienen previsto utilizar energías limpias. Además, los datos del censo también pronostican una producción de 9 GW aproximadamente para 2024 y de casi 11 GW a partir de 2026, lo que casi triplicaría las previsiones de la Hoja de Ruta mencionadas anteriormente [56].

En cuanto a la industria, se han censado un total de 17 proyectos en este sector de los cuales un 67% es para su uso en refino del petróleo y la industria petroquímica, mientras que un 15% de este se destina a la producción de amoníaco. El resto, se encuentran enfocados a la industria alimentaria, del vidrio y la cerámica [56].

En el sector transporte se recogen un total de 34 HRS planeadas, de las cuales 21 serán de acceso público para vehículos ligeros y pesados y 13 de ellas de acceso privado para autobuses, transporte ferroviario y vehículos especiales. A su vez, también hay proyectos dedicados al transporte por carretera, ferroviario y marítimo [56].

A partir de los datos obtenidos de los 123 proyectos que han participado en el Censo, la AeH<sub>2</sub> prevé una inversión total cercana a los 21.000 millones de euros, que superaría ampliamente los 8.900 millones estimados por la Hoja de Ruta del Hidrógeno para el período 2020-2030 [56].

En cuanto a proyectos de investigación llevados a cabo en España en los últimos años y que van a ayudar a alcanzar los objetivos propuestos para el año 2030 se pueden destacar los siguientes:

- **H2PORT**: Su objetivo es demostrar la viabilidad del uso de H<sub>2</sub> en las operaciones del puerto de Valencia para reducir el impacto ambiental de sus actividades. Como por ejemplo la utilización de H<sub>2</sub> en dos máquinas, grúa tractora y cabeza de camión, así como el desarrollo de una hidrogenadora que suministre el H<sub>2</sub> necesario para las operaciones del puerto. Comenzó en 2019 con una duración de 4 años y una financiación de 4 millones de euros [58].
- **SUN2HY**: El objetivo del proyecto es desarrollar una tecnología fotoelectroquímica a partir de los resultados obtenidos a escala de laboratorio, para producir de forma eficiente H<sub>2</sub> renovable al 100% gracias al uso de energía solar. Se realizó durante 2018 y 2019 por las empresas Repsol y Enagás con un presupuesto de aproximadamente 2 millones de euros. Una vez realizado este proyecto se constituyó la compañía Sunrgyze, que está desarrollando la primera planta pre-comercial de producción de H<sub>2</sub> mediante la tecnología patentada de fotoelectrocatalisis la cual estará operativa en 2025 [59].
- **SEAFUEL**: Este proyecto, que estuvo en operación desde 2017 a 2020, generó 25 kg de H<sub>2</sub> al día a partir de una instalación de energías renovables de 51 MW. Este H<sub>2</sub> se utilizó para abastecer al transporte local de Tenerife. Su objetivo era demostrar la viabilidad de usar este combustible promoviendo un sistema de transporte sostenible [60].

- **GREEN ISLAND**: Este proyecto, con una duración de 6 años desde 2020 a 2025 y una inversión de 50 millones de euros, tiene como objetivo convertir la isla de Mallorca en el primer hub de H<sub>2</sub> al suroeste de Europa. Para ello se ha desplegado todo un ecosistema de H<sub>2</sub> abarcando toda su cadena de valor, desde su producción a partir de energía fotovoltaica, distribución a través de la red de G.N., estación de repostaje para abastecer a los vehículos y un sistema de generación de calor y electricidad basados en FC [61].

También empiezan a ser una realidad en España los denominados clúster o valles del H<sub>2</sub> que son la creación de grandes infraestructuras compartidas por diferentes empresas destinadas a la producción de H<sub>2</sub> renovable. Algunos de los más importantes son: El corredor Vasco del Hidrógeno (BH2C), El Valle del Hidrógeno de Cataluña y Aragón y el Clúster del hidrógeno en Castilla-La Mancha, entre otros [57,62].

A mediados de 2022, la Comisión Europea aprobó un importante proyecto denominado Hy2Tech para llevar a cabo el desarrollo de la tecnología del H<sub>2</sub>. Para ello seleccionó 4 empresas españolas, las cuales son IVECO, H2B2, SENER y Nordex. A principios de 2023, el Gobierno de España aprobó un Real Decreto para la concesión de 74 millones de euros para poner en marcha estos 4 proyectos, que contarán con una inversión final de 245 millones de euros [63,64].

Las empresas H2B2, SENER y Nordex se centrarán en el diseño y fabricación de electrolizadores, mientras que IVECO se centrará en el desarrollo y producción de vehículos terrestres pesados propulsados por H<sub>2</sub> [63,64]. Estas iniciativas pueden lograr que España sea una de las potencias europeas en generación renovable gracias al H<sub>2</sub>.

En resumen, debido a sus características, el H<sub>2</sub> está llamado a liderar la transición energética hacia un sistema sostenible en el que los combustibles fósiles estén cada vez más desplazados, combatiendo de esta manera al cambio climático. Actualmente tiene varios problemas, como lo son su producción de forma limpia y su baja densidad volumétrica, pero gracias a los desarrollos en los métodos para su obtención a través de energías renovables y en tecnología, hace que alcanzar un escenario en 2050 donde las emisiones sean inexistentes pueda ser una realidad.

# 4 CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO: DESDE SU PRODUCCIÓN HASTA SU UTILIZACIÓN

Para poder comprender de qué manera el H<sub>2</sub> es capaz de llevar a los seres humanos a alcanzar un punto de emisiones neutras en el futuro, es necesario conocer y entender toda su cadena de valor. Como refleja la Fig. 4.1, la cadena de valor del H<sub>2</sub> comprende principalmente 4 procesos: producción, almacenamiento, transporte y aplicaciones finales. A lo largo de este punto trataremos en profundidad cada uno de ellos.

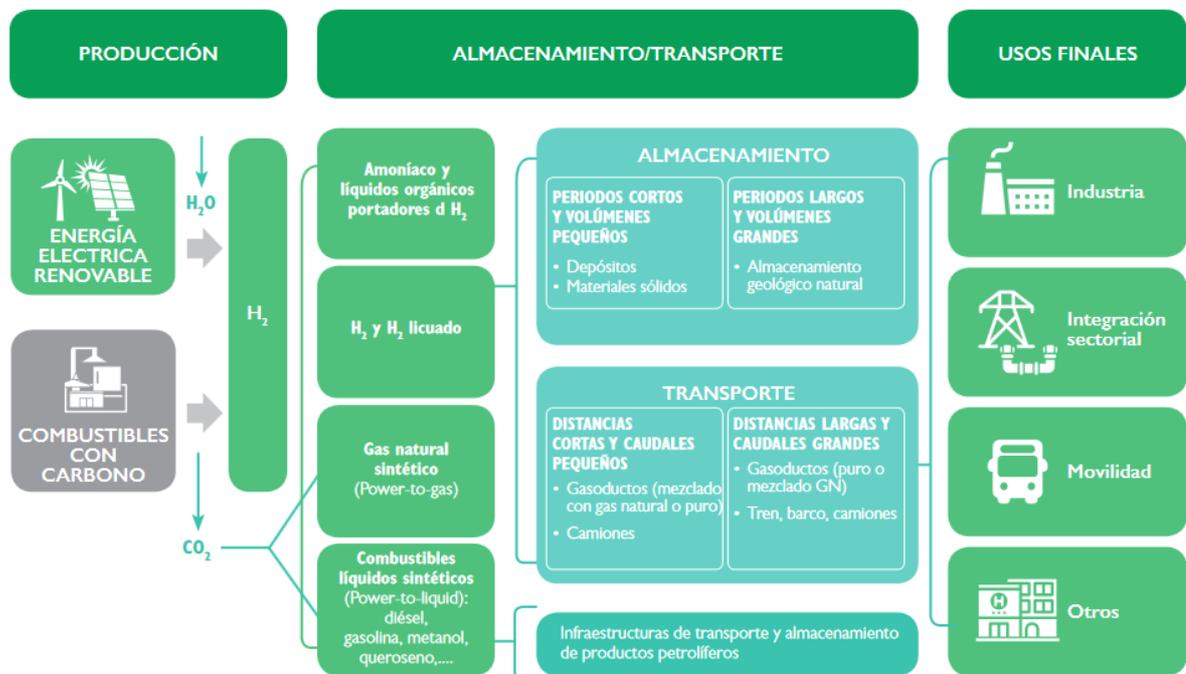


Fig. 4.1: Cadena de valor del H<sub>2</sub> [57].

## 4.1 Producción de Hidrógeno

Como se ha comentado anteriormente, el H<sub>2</sub> no se encuentra de forma natural en la naturaleza sino combinado con otros elementos en forma de compuesto. Esta es la razón por lo que es necesario producirlo, descomponiendo esta materia prima para obtenerlo en estado puro. El H<sub>2</sub> puede ser extraído de combustibles con carbono, como pueden ser los combustibles fósiles y la biomasa o a través de fuentes de energía renovables. En la actualidad, aproximadamente el 2% de la demanda de energía primaria global se utiliza para la producción de H<sub>2</sub> correspondiendo a 275 Mt de energía [65].

Los métodos de producción de H<sub>2</sub> [66] se pueden dividir según la materia prima necesaria,

descritos en la Fig. 4.2:

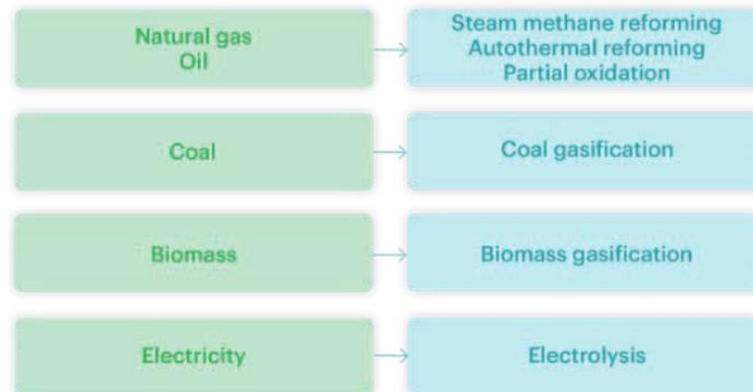


Fig. 4.2: Vías potenciales para producir H<sub>2</sub> [65].

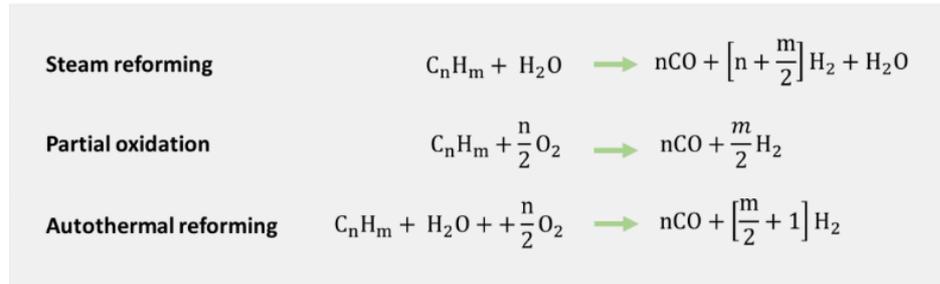
#### 4.1.1 Gas Natural

El reformado es la opción más extendida y generalizada de producción de H<sub>2</sub> a partir de HC como el G.N., siendo su principal inconveniente las importantes emisiones contaminantes que genera, alrededor de 10 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de H<sub>2</sub> producido [65]. Se lleva a cabo principalmente a través de tres métodos como son el reformado con vapor, la oxidación parcial y el reformado autotérmico:

- **Reformado con vapor o Steam methane reforming (SMR):** Esta tecnología utiliza vapor a alta temperatura (700-1000 °C) que reacciona en un reformador con CH<sub>4</sub> a una presión de entre 3 a 25 bar para producir un gas de síntesis formado por H<sub>2</sub> y monóxido de carbono (CO), todo ello en presencia de un catalizador. Esta es una reacción endotérmica, por lo que es necesario un aporte de calor para que se lleve a cabo el proceso, con un rendimiento del 80% de conversión [67,68]
- **Oxidación parcial o Partial Oxidation (POX):** En este proceso el CH<sub>4</sub> del G.N. se hace reaccionar con una cantidad limitada de O<sub>2</sub>, es decir, en una proporción menor a la estequiométrica en un reformador a temperaturas elevadas (1300-1500°C), obteniendo como producto un gas de síntesis. Se trata de una reacción exotérmica y generalmente es un proceso más rápido que el anterior, pero con un rendimiento menor, del orden de 70% [68].
- **Reformado autotérmico o Autothermal Reforming (ATR):** Esta tecnología es una combinación de las dos anteriores, es decir, el G.N. reacciona tanto con el vapor de H<sub>2</sub>O como con el O<sub>2</sub> para producir un gas de síntesis rico en H<sub>2</sub>. En esta ocasión, no se necesita una fuente de calor externa como en el SMR ya que se aprovecha el calor liberado en el

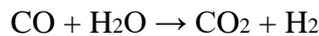
proceso POX, haciendo que se tenga un reformado más simple y compacto con bajos costes de capital. Sin embargo, se obtienen rendimientos menores que con el proceso SMR [68].

Las reacciones de los métodos anteriores se reflejan en la Fig. 4.3:



**Fig. 4.3:** Reacciones químicas de los métodos de reformado [37].

El producto de los tres métodos anteriores es una combinación de H<sub>2</sub> y CO, conocido como gas de síntesis. Este gas de síntesis se somete a un tratamiento denominado reformado secundario, donde a través de una reacción de desplazamiento (WSR) el CO se transforma en CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, haciendo el proceso más eficiente y obteniendo aún más H<sub>2</sub> [69]. Este CO<sub>2</sub> producido puede liberarse al medio ambiente o utilizarlo en diferentes procesos, como el procesamiento y envasado de alimentos, donde de nuevo se libera a la atmósfera. Para finalizar, si la aplicación final lo requiere, se lleva a cabo una purificación del H<sub>2</sub> siendo imposible obtenerlo puro al 100%. La reacción química de desplazamiento del CO es la siguiente:



Para mitigar los efectos de las emisiones contaminantes de estos procesos basados en G.N., se llevan a cabo CCUS. De esta manera, el CO<sub>2</sub> producido es capturado para usarlo como materia prima en determinadas aplicaciones o para ser almacenado en depósitos geológicos como lo son los yacimientos agotados de gas y petróleo. Gracias a las técnicas de CCUS, se pueden reducir las emisiones de carbono en torno al 90% en las técnicas de reformado [65].

## 4.1.2 Carbón

La producción de H<sub>2</sub> mediante la gasificación del carbón es una tecnología bien implantada, usada sobre todo en la industria química y de fertilizantes para obtener NH<sub>3</sub>. Hoy en día, hay aproximadamente 130 plantas de este tipo operando alrededor del mundo estando más del 80% en China [65].

La gasificación del carbón, al igual que en el caso del G.N. consiste en su oxidación parcial en presencia de vapor y O<sub>2</sub> a una temperatura de hasta 700°C, dando como resultado un gas de síntesis. Este gas, formado por H<sub>2</sub> y CO, podría usarse en plantas de ciclo combinado para producir electricidad o bien someterlo a un reformado secundario para producir aún más H<sub>2</sub> [70].

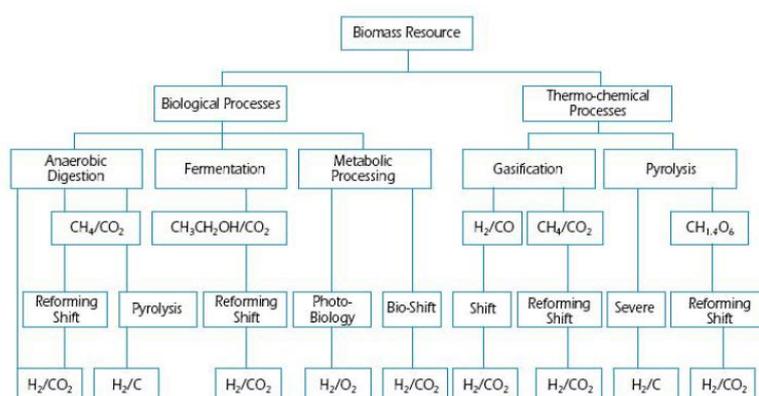
También se puede producir  $H_2$  a través del proceso de pirólisis. Este consiste en la descomposición del carbón a una temperatura aproximadamente de  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , dando como productos finales gases compuestos por  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , e  $HC$ . La diferencia entre este proceso y la gasificación es que la pirólisis se realiza en ausencia de  $O_2$  mientras que en la gasificación si es necesaria su presencia [66].

Esta tecnología emite a la atmósfera grandes cantidades de  $CO_2$ , aproximadamente el doble que, en el caso del gas natural, siendo de 19 toneladas de  $CO_2$  por cada tonelada de  $H_2$  [65]. Es por ello, que si se quiere que la producción de  $H_2$  a partir de carbón sea un sistema de energía bajo en carbono, las técnicas de CCUS en este tipo de tecnologías son impredecibles.

### 4.1.3 Biomasa

La biomasa como materia prima para producir  $H_2$  tiene un gran aliciente debido a que es capaz de retener el  $CO_2$  generado en la producción durante el crecimiento de la materia orgánica, obteniendo un balance de emisiones neutras. Además, si su utilización no excede a su regeneración natural, se trata de una fuente sostenible y renovable [71].

Como se puede observar en la Fig. 4.4, hay diferentes caminos para obtener  $H_2$  a partir de biomasa. En los procesos biológicos destacan la digestión anaeróbica y la fermentación, produciendo biogás que posteriormente se puede transformar en  $H_2$  mediante el método de reformado secundario visto anteriormente. En la vía termoquímica, destaca la gasificación y la pirólisis de la biomasa, que son procesos muy similares a los utilizados con el G.N. y el carbón, teniendo en la formación de alquitrán su principal problema [72].



**Fig. 4.4:** Procesos de producción de hidrógeno a partir de biomasa [71].

Debido a su bajo contenido energético y a su disponibilidad, las plantas de producción a gran escala de  $H_2$  a partir de biomasa están limitadas. Por ejemplo, para satisfacer una demanda de 60 Mt de  $H_2$  en Estados Unidos, hará falta casi el 100% del potencial técnico de la biomasa del país por solo el 6% de la energía eólica y menos del 1% de la energía solar [65].

Sin embargo, si se usa esta tecnología con técnicas de CCUS podría llevar a procesos que se denominan de emisiones negativas, que pueden desempeñar un papel fundamental en la lucha contra el cambio climático.

#### 4.1.4 Agua y Electricidad

La electrólisis es una tecnología que consiste en la ruptura de una molécula de H<sub>2</sub>O gracias al paso de corriente eléctrica continua, dando como productos H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> como se representa en la Fig. 4.5. Si esta energía eléctrica proviene de fuentes renovables, como la eólica o la solar, la electrólisis se convierte en la principal opción para producir H<sub>2</sub> renovable, ya que no emite GEI a la atmósfera en el proceso.

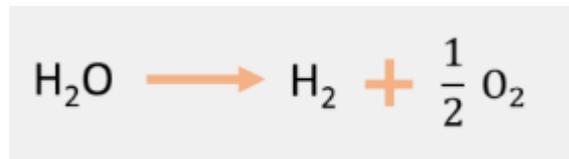


Fig. 4.5: Reacción de electrólisis [15].

Los electrolizadores, formados por un ánodo y un cátodo y separados por un electrólito, son los dispositivos encargados de realizar la separación de la molécula de H<sub>2</sub>O. En la actualidad destacan los siguientes cuya principal diferencia reside en el material utilizado para el electrólito y en la temperatura de operación:

- **Electrolizadores alcalinos:** Son los más extendidos hoy en día debido a su alto desarrollo y a su rentabilidad económica. Su rango de temperatura de operación oscila entre los 50-85°C y utilizan como electrólito una solución alcalina líquida (hidróxido de potasio o sodio). Cuando se aplica corriente eléctrica, el H<sub>2</sub>O se divide para formar H<sub>2</sub> en el cátodo, y los iones de hidróxido (OH<sup>-</sup>) generados se desplazan hacia el ánodo donde terminan por convertirse en O<sub>2</sub>, como se representa en la Fig. 4.6. Como contrapartida, trabajan con una baja densidad de corriente lo que deriva en una menor cantidad de H<sub>2</sub> por volumen de equipo [73].

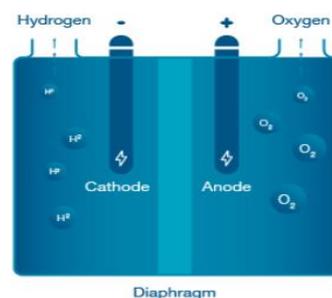


Fig. 4.6: Representación de un electrolizador alcalino [74].

- **Electrolizadores de Proton Exchange Membrane (PEM):** En este caso, no se utiliza un electrolito líquido si no una membrana sólida que es capaz de conducir protones. Como se refleja en la Fig. 4.7, al aplicar corriente en el ánodo el  $H_2O$  se separa en  $O_2$  y protones de  $H_2$ , que al atravesar la membrana y unirse con los electrones forman  $H_2$ . Al utilizar esta membrana, se evita el empleo de un electrólito corrosivo como ocurre con las alcalinas. Además, estos electrolizadores trabajan a mayores densidades de corriente, mayores presiones y el  $H_2$  producido es de mayor pureza que en el caso anterior. Sin embargo, requieren el uso de metales preciosos lo que deriva en altos costes [73].

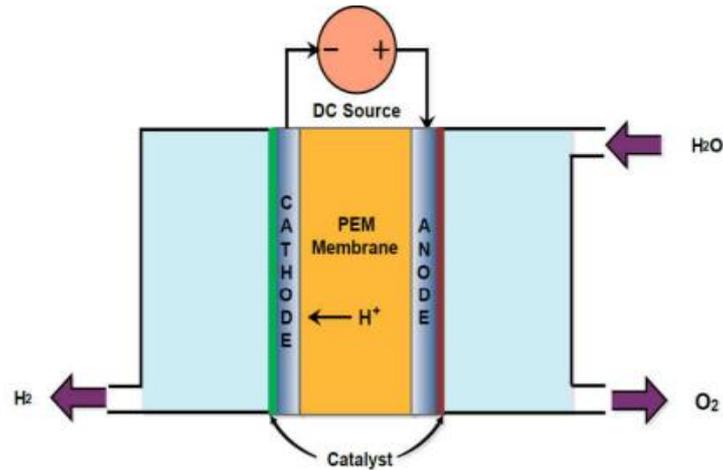


Fig. 4.7: Representación de un electrolizador PEM [73].

- **Electrolizadores de óxido sólido (SOEC):** Utilizan como electrolito un material cerámico sólido. Como se observa en la Fig. 4.8, los electrones de la corriente eléctrica se combinan con el  $H_2O$  en el cátodo para formar  $H_2$  e iones negativos que al pasar por el material cerámico llegan al ánodo donde reaccionan para producir  $O_2$ . Es una tecnología en desarrollo que es capaz de trabajar a temperaturas superiores a los  $700^{\circ}C$  por los  $50-85^{\circ}C$  de los anteriores electrolizadores, permitiendo así una eficiencia energética más alta [73]. Sin embargo, esto hace que tengan un coste elevado así como una menor vida útil por la degradación de los materiales.

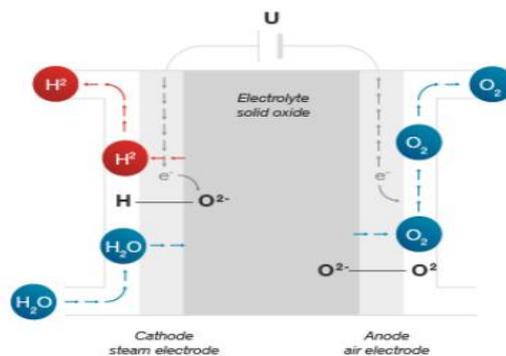


Fig. 4.8: Representación de un electrolizador de óxido sólido [74].

Como se resume en la Fig. 4.9, la eficiencia más alta se alcanza en los electrolizadores SOEC, en torno al 85-95%, debido a sus altas temperaturas de operación con respecto a eficiencias del orden de 60-75% en electrolizadores de tipo alcalino y PEM. Sin embargo, estas elevadas

temperaturas en electrolizadores SOEC junto con la utilización de metales preciosos en el caso de electrolizadores PEM hacen que sus costes de operación sean mayores que en el caso de los alcalinos, así como una vida útil menor que este último. También se puede observar, como se ha comentado anteriormente, que los electrolizadores alcalinos tienen una menor densidad de corriente que los otros dos tipos, lo que deriva en una menor cantidad de H<sub>2</sub> producido por volumen de equipo [75].

	ALCALINA	PEM	ÓXIDO SÓLIDO
<b>Semi-reacciones</b>	Cátodo: $2H_2O_{(l)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2OH_{(ac)}^-$ Ánodo: $2OH_{(ac)}^- \rightarrow \frac{1}{2}O_{2(g)} + H_2O_{(l)} + 2e^-$	Ánodo: $H_2O_{(l)} \rightarrow H_{(ac)}^+ + \frac{1}{2}O_{2(g)} + 2e^-$ Cátodo: $H_{(ac)}^+ + 2e^- \rightarrow H_{2(g)}$	Cátodo: $H_2O_{(g)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + O^{2-}$ Ánodo: $O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_{2(g)} + 2e^-$
<b>Electrodos y catalizadores</b>	Ánodo: Ni, Fe, óxidos metálicos Cátodo: Ni/Ni-Co, óxidos metálicos	Ánodo: Ti+Ti/RuO <sub>2</sub> , IrO Cátodo: grafito, Ti+Pt	Ánodo: cerámico (Mn,La,Cr)Ni Cátodo: Zr+Ni/CeOx
<b>Medio separador</b>	Diafragma (NiO, PAM, Zirfon®)	Membrana	Membrana cerámica
<b>Electrolito</b>	KOH (alrededor de 30%wt) NaOH (alrededor de 18%wt)	Electrolito polimérico sólido(Nafion®)	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> MgO- ZrO <sub>2</sub>
<b>Ion transporte</b>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	O <sup>2-</sup>
<b>Temperatura</b>	60-85°C	50-80°C	800-1000°C
<b>Presión</b>	<30 bar	<35 bar	1-5 bar
<b>Dens.corriente</b>	200-600 mA/cm <sup>2</sup>	<2000 mA/cm <sup>2</sup>	<2000 mA/cm <sup>2</sup>
<b>Costes (€/kW)</b>	900-1400(a escala de kW) 600-850(a escala de MW)	1500-2000(a escala de kW) 1100-1400(a escala de MW)	2000-3000
<b>Eficiencia global</b>	60-70%	65-75%	85-95%
<b>Vida útil</b>	>95000 h	55000-75000 h	En investigación
<b>Consumo energía (kWh/Nm<sup>3</sup>H<sub>2</sub>)</b>	4.3-5	4.2-4.7	3.2-3.7

Fig. 4.9: Comparativa entre los distintos tipos de electrolizadores [75].

#### 4.1.5 Otros Métodos de Producción

Existen otros procesos para obtener H<sub>2</sub> a parte de los ya mencionados anteriormente, como son:

- **Termólisis:** Estos procesos implican la extracción de H<sub>2</sub> de la molécula de H<sub>2</sub>O que lo contiene, pero en lugar de hacerlo aplicando electricidad como en el caso de la electrólisis, se aplica calor a altas temperaturas que puede provenir de procesos industriales, de energía solar concentrada o de energía nuclear. El problema principal radica en que para realizar una termólisis directa del H<sub>2</sub>O se requiere temperaturas superiores a 2500 °C, lo que lo hace inviable para aplicaciones en la vida real. Es por ello que, en lugar de realizarlo de forma directa, el proceso de separación del H<sub>2</sub>O se realiza en diferentes pasos lo que se conoce como ciclos termoquímicos de división del H<sub>2</sub>O (TWSC). Los TWSC pueden implicar de 2 a 6 pasos empleando temperaturas de operación entre 500 y 2000°C, es decir,

cuanto mayor sea el número de pasos menor será la temperatura de trabajo que hay que emplear como se resume en la Fig. 4.10. Esta tecnología se encuentra actualmente en desarrollo y puede contribuir a reducir el coste del H<sub>2</sub> renovable pero aún tiene desafíos a solucionar como su baja eficiencia y durabilidad de los materiales, así como sus altos costes de capital, operación y mantenimiento [76,77].

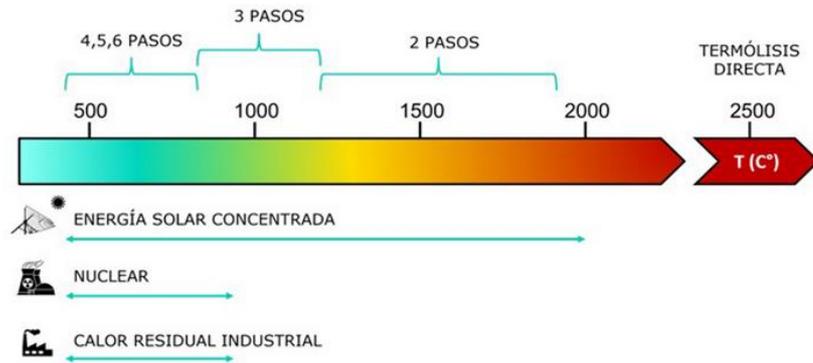


Fig. 4.10: Número de pasos en TWSC en función de la fuente de calor [76].

- **Fotoelectrocatalisis:** Esta tecnología permite producir H<sub>2</sub> renovable haciendo un uso directo de la energía solar, es decir, el proceso se lleva a cabo en un único dispositivo empleando un solo paso como se refleja en la Fig. 4.11. Lo atractivo de este procedimiento es que simplifica el proceso de producción frente a la electrólisis, generando una mayor eficiencia energética al poder evitar las pérdidas asociadas al transporte y a la transformación de la electricidad. De esta manera es posible que esta tecnología mejore la eficiencia de la conversión de energía solar a H<sub>2</sub> con respecto a la electrólisis, simplificando infraestructuras y equipos reduciendo así los costes de capital [78,79].

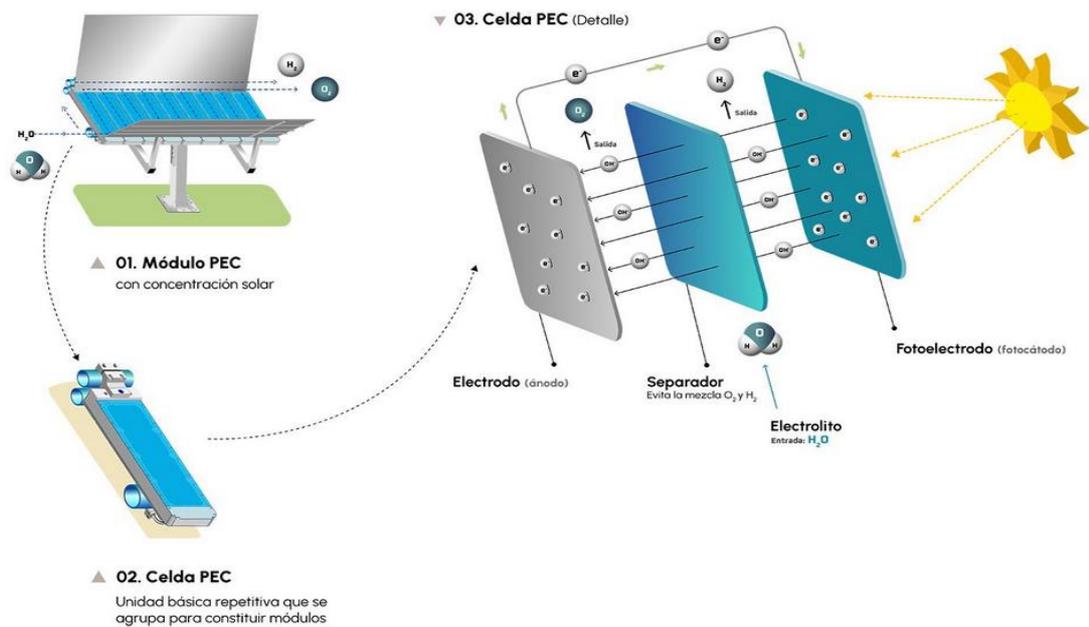


Fig. 4.11: Tecnología de fotoelectrocatalisis [79].

- **Fotobiólisis:** A raíz del proceso natural de la fotosíntesis, algunas cianobacterias y microalgas verdes pueden actuar como catalizadores biológicos y producir H<sub>2</sub> como subproducto de sus reacciones metabólicas, a partir de H<sub>2</sub>O y enzimas como la hidrogenasa. Actualmente se encuentra en una fase muy verde de desarrollo, pero en el futuro puede contribuir a alcanzar una producción de H<sub>2</sub> renovable sostenible [71,80].

#### 4.1.6 Características de la Producción de Hidrógeno

Según el informe “Global Hydrogen Review 2022” de la IEA, en el año 2021 la producción global de H<sub>2</sub> alcanzó los 94 Mt, superando al máximo anterior de 91 Mt del año 2019, generando unas emisiones de CO<sub>2</sub> de 900 Mt [30].

La gran mayoría de H<sub>2</sub> se obtuvo de combustibles fósiles sin técnicas de CCUS, siendo la principal materia prima el G.N. con un 62%, seguido del carbón con un 19%, generado fundamentalmente en China. Un 18% del H<sub>2</sub>, se obtuvo como un subproducto del reformado de nafta en refinerías [30].

La producción de H<sub>2</sub> de bajas emisiones en carbono en todo el mundo fue inferior a 1 Mt, con tan solo 35 Kt procedente de la electrólisis del H<sub>2</sub>O. A pesar de que la producción basada en la electrólisis es muy baja, esta aumentó alrededor de un 20% con respecto al año 2020 lo que refleja un crecimiento de esta tecnología [30].

Todo esto se refleja en la Fig. 4.12:

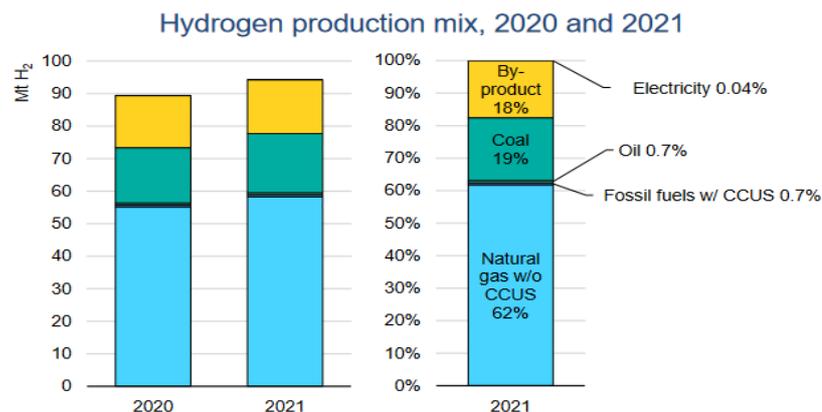


Fig. 4.12: Producción de H<sub>2</sub> en los años 2020 y 2021 [30].

#### 4.1.7 Costes de la Producción de Hidrógeno

Un aspecto importante a la hora de producir H<sub>2</sub> son los costes de las diferentes materias primas. Según la IEA, producir H<sub>2</sub> por fuentes renovables supone un coste de 2.5–6 USD/kgH<sub>2</sub>, considerablemente mayor al del G.N., 1–2 USD/kgH<sub>2</sub>, y al del carbón con un coste de 1,2-2 USD/KgH<sub>2</sub>. Sin embargo, la IEA señala que el coste de producir H<sub>2</sub> con energías renovables podría caer un 30% hacia 2030, haciendo que esta alternativa sea más económica que utilizando fuentes contaminantes [30].

Además, como se ve en la Fig. 4.13, existen determinadas áreas alrededor del mundo como Chile, China, Australia, India y el norte de África con una excelente combinación de recursos renovables, que van a liderar la producción de H<sub>2</sub> a través de fuentes limpias bajando aún más los costes de esta tecnología.

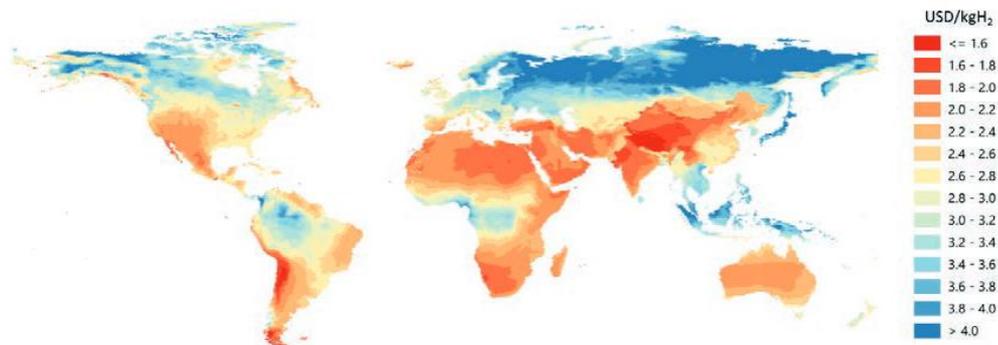


Fig. 4.13: Coste de H<sub>2</sub> producido por energía solar y eólica a largo plazo [65].

#### 4.1.8 Tipos de Hidrógeno

También se puede clasificar el H<sub>2</sub> producido en distintos colores en función de las emisiones asociadas al mismo [81,82,83]:

- **H<sub>2</sub> negro y marrón:** Ambos tipos se obtienen a partir de la gasificación del carbono, usando para ellos combustibles fósiles como lo son el carbón bituminoso para el caso de H<sub>2</sub> y lignito para el tipo marrón. En ninguno de ellos se lleva a cabo técnicas de CCUS, por lo que se liberan importantes emisiones contaminantes a la atmósfera.
- **H<sub>2</sub> gris:** Se produce usando procesos de reformado, normalmente por reformado de vapor usando como combustible G.N., CH<sub>4</sub> o gases licuados de petróleo, GLP. Actualmente el 99% del H<sub>2</sub> que se consume en España es de este tipo y al igual que en los dos casos anteriores, lleva asociado grandes cantidades de emisiones contaminantes.

- **H<sub>2</sub> azul**: Se obtiene de forma similar al H<sub>2</sub> gris, pero con la diferencia de que en este caso se llevan a cabo sistemas de CCUS, reduciendo hasta en un 95% las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas minimizando de esta forma el impacto ambiental.
- **H<sub>2</sub> turquesa**: Es aquel que se obtiene por combustibles de origen fósil, mediante el pirólisis alimentado por G.N. En esta ocasión, se obtiene carbono solidificado por lo que tiene unas bajas emisiones contaminantes asociadas. Este carbono sólido generado puede utilizarse en múltiples aplicaciones, como el refuerzo de los neumáticos o para las fibras de carbono para coches y aviones.
- **H<sub>2</sub> rosa**: Es aquel H<sub>2</sub> que se produce a través de la electrólisis del H<sub>2</sub>O alimentada mediante energía nuclear, por lo que se trata de una tecnología que no emite GEI a la atmósfera, pero sí genera residuos radiactivos de difícil eliminación.
- **H<sub>2</sub> amarillo**: Se produce a través de un proceso de electrólisis donde la electricidad para llevarlo a cabo proviene de multitud de fuentes diversas, desde la energía solar a los combustibles fósiles.
- **H<sub>2</sub> blanco**: Es el H<sub>2</sub> que encontramos de forma gaseosa en la naturaleza, normalmente en depósitos subterráneos. Actualmente no existen explotaciones a gran escala para el aprovechamiento de este recurso.
- **H<sub>2</sub> verde**: Conocido también como H<sub>2</sub> renovable, se produce mediante la electrólisis del H<sub>2</sub>O haciendo uso de electricidad procedente de energías renovables, con lo que tiene unas emisiones contaminantes nulas asociadas. Es por ello que este tipo de H<sub>2</sub> es la opción principal para llevar a cabo la descarbonización del sector energético.
- **H<sub>2</sub> dorado**: Algunos estudios proponen hacer una distinción entre el H<sub>2</sub> verde y el H<sub>2</sub> dorado, que sería aquel producido exclusivamente a través de la energía solar mediante el proceso de fotoelectrocatalisis anteriormente explicado. La energía solar capturada no podría usarse para otros fines ni el H<sub>2</sub> podría ser obtenido mediante otras fuentes de energía renovables.

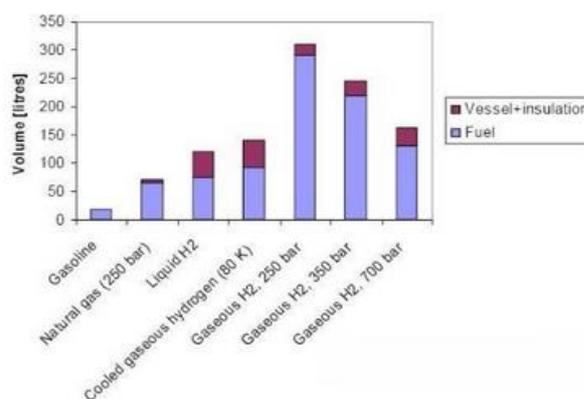
#### 4.1.9 Conclusiones

Hoy en día, la producción de H<sub>2</sub> a partir de combustibles fósiles, es decir, H<sub>2</sub> gris o azul, están dejando paso a poco a poco a otras opciones de generación limpias como es el H<sub>2</sub> verde, al mismo tiempo que su utilización se va extendiendo para lograr la transición energética.

La posibilidad de producir H<sub>2</sub> verde a un coste adecuado e integrarlo de manera eficaz en diferentes redes de generación y almacenamiento, así como ser una solución para las diferentes aplicaciones a las que va destinado, abre un panorama tan interesante como necesario para las próximas décadas.

## 4.2 Almacenamiento de Hidrógeno

El H<sub>2</sub> es un combustible con una alta densidad energética por unidad de masa, sin embargo, posee una baja densidad por unidad de volumen. Esto quiere decir que almacena menor cantidad de energía por volumen que otros vectores energéticos como la gasolina o el G.N., haciendo que sea un gas difícil de almacenar. Como se puede observar en la Fig. 4.14, el H<sub>2</sub> líquido y gaseoso a 700 bar son las formas de almacenamiento de H<sub>2</sub> que ofrecen menor volumen, pero son del orden de 7 veces más voluminosos que un tanque de gasolina para un mismo contenido de combustible [71].



**Fig. 4.14:** Volumen ocupado por diferentes combustibles [71].

Hoy en día, las principales soluciones para el almacenamiento de H<sub>2</sub> son comprimirlo, licuarlo o hacer que forme parte de un compuesto sólido.

### 4.2.1 Almacenamiento de Hidrógeno Comprimido

Almacenar el H<sub>2</sub> en forma de gas comprimido es la forma más extendida y la tecnología más desarrollada. Consisten en tanques de H<sub>2</sub> presurizados, Fig. 4.15, con una presión de trabajo de entre 150 hasta 700 bar. Normalmente, el H<sub>2</sub> se comprime a temperatura ambiente, pero hay otros tipos, como el H<sub>2</sub> crió-comprimido que están siendo investigados ya que logran mayores densidades del H<sub>2</sub> al almacenarlo a temperaturas de -123 °C [84].



**Fig. 4.15:** Componentes del tanque presurizado para almacenamiento de H<sub>2</sub> [84].

Como se observa en la Fig. 4.16, existen 4 tipos de tanques para almacenar H<sub>2</sub> en forma gaseosa en función de los materiales utilizados y de su presión máxima admitida. Los recipientes de tipo 1 y 2 son los más pesados y se utilizan en aplicaciones industriales estacionarias, con una presión máxima de trabajo de 300 y 800 bar respectivamente. Por el contrario, los tanques de tipo 3 y 4 se fabrican de materiales más ligeros ya que están destinados a aplicaciones de transporte de H<sub>2</sub>, con un rango de presiones de operación de 350-700 bar [84].

Tipo de tanque	Presión admitida (bar)	Características
Tipo I Acero o Aluminio (sin costuras ni revestimiento)	150 - 300	Muy pesados y de paredes gruesas. Utilizados principalmente en vehículos de GNC y en aplicaciones estacionarias industriales.
Tipo II Metálicos sin costuras envueltos en aros de fibra de vidrio y resina	450 - 800	Muy pesados. Se utilizan principalmente como buffer o tanque intermedio en aplicaciones estacionarias.
Tipo III Revestimiento de aluminio sin costuras y envueltos con fibra de vidrio y resinas compuestas.	350 - 700	Más ligeros y de paredes más finas respecto a los de Tipo I y II. Se utilizan principalmente para aplicaciones de movilidad y transporte de H <sub>2</sub> en trailers.
Tipo IV Revestimiento no-metálico envueltos con fibra y revestimiento polimérico.	350 - 700	

**Fig. 4.16:** Clasificación de tanques presurizados para almacenamiento de H<sub>2</sub> [84].

Esta tecnología también presenta una serie de problemas, entre los que se encuentra la seguridad, al tener tanques a alta presión de trabajo, la resistencia del recipiente por el efecto de la carga y descarga de H<sub>2</sub>, y el alto coste de fabricación de los tanques. Además, tiene un problema de eficiencia, ya que alrededor de un 13% del PCI del H<sub>2</sub> se consume para llevar a cabo la compresión de este [71].

## 4.2.2 Almacenamiento de Hidrógeno Líquido

Esta forma de almacenamiento es la base de la red industrial y de distribución existente. El tanque debe estar adecuadamente aislado para impedir la transferencia de calor con el exterior al mínimo posible, ya que el H<sub>2</sub> se almacena a temperaturas criogénicas de hasta -253°C. Si se produjera transferencia de calor con el ambiente la presión de H<sub>2</sub> aumenta, y este tiene que escapar del recipiente a través de unas válvulas de alivio denominadas boil-off. Es por esta razón que es imposible almacenar H<sub>2</sub> en forma líquida en un depósito estacionario de forma indefinida ya que acabará por agotarse [71,84]. Los componentes de este tipo de recipientes se recogen en la Fig. 4.17:



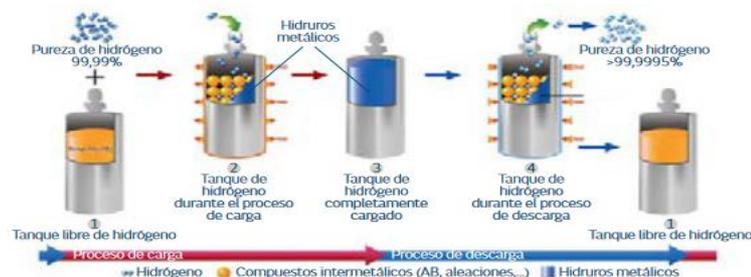
**Fig. 4.17:** Componentes de un tanque de almacenamiento de H<sub>2</sub> líquido [84].

Como en el caso anterior, para llevar a cabo la licuación del H<sub>2</sub> se consumen alrededor del 30 y 40% del PCI del combustible haciendo que su eficiencia baje [71]. Sin embargo, como se pudo ver en la Fig. 4.14, la principal ventaja de almacenar el H<sub>2</sub> en forma líquida es que tiene una densidad energética por unidad de volumen muy superior al H<sub>2</sub> en forma de gas.

### 4.2.3 Almacenamiento de Hidrógeno Sólido

En este tipo de almacenamiento, el H<sub>2</sub> gaseoso pasa a formar parte de la composición molecular de un compuesto sólido. Diversos metales y aleaciones tales como, cromo, níquel, magnesio y titanio, se combinan con el H<sub>2</sub> para formar hidruros metálicos obteniéndose una mayor densidad volumétrica respecto al H<sub>2</sub> comprimido y licuado [84].

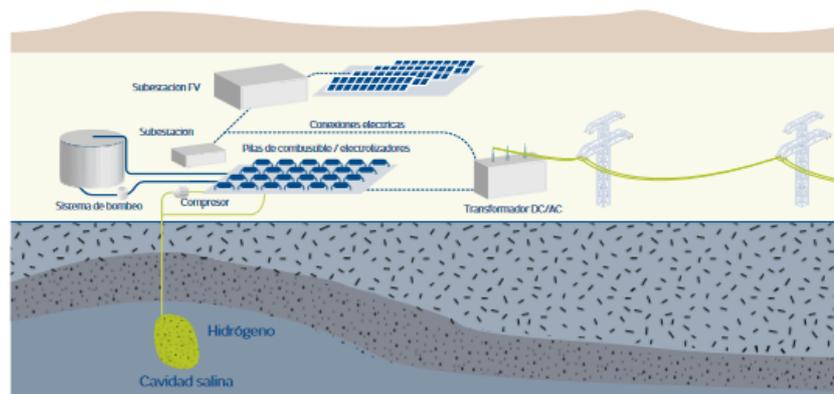
La reacción para formar estos hidruros metálicos es reversible en condiciones adecuadas de presión y temperatura, por lo que pueden absorber y liberar H<sub>2</sub> de forma ilimitada sin ningún deterioro significativo, Fig. 4.18, por lo que son muy adecuados para aplicaciones estacionarias [84].



**Fig. 4.18:** Proceso de carga y descarga de H<sub>2</sub> utilizando almacenamiento sólido [84].

## 4.2.4 Almacenamiento de Hidrógeno a Gran Escala

Cuando los volúmenes de H<sub>2</sub> generados son tan grandes que su almacenamiento en tanques durante un tiempo prolongado resulta inviable, se puede recurrir a almacenar el H<sub>2</sub> en depósitos geológicos naturales, como puede observarse en la Fig. 4.19. Estos depósitos naturales pueden ser cavernas de sal o yacimientos de gas, donde se puede almacenar H<sub>2</sub> en grandes volúmenes y sin grandes pérdidas operando a una presión de 50-200 bares. Debido a su bajo coste, seguridad y capacidad de sellado, se considera el proceso de almacenamiento a gran escala más prometedor [84].



**Fig. 4.19:** Esquema de una planta de almacenamiento de H<sub>2</sub> en una caverna de sal [84].

## 4.3 Transporte de Hidrógeno

Una vez que el H<sub>2</sub> ha sido producido y almacenado, debe de distribuirse hacia su aplicación final ya sea industrial, doméstica o de transporte, ya que no siempre se produce en el punto donde se consume. Para que el H<sub>2</sub> llegue a ser un vector energético fundamental contra el cambio climático, es necesario la construcción y desarrollo de infraestructuras para su correcto transporte y aprovisionamiento.

Análogamente al que se utiliza en el sector del G.N., actualmente el transporte de H<sub>2</sub> se lleva a cabo de tres formas distintas: vía terrestre para cubrir distancias cortas, vía marítima para largas distancias o zonas aisladas y haciendo uso de la red de distribución del G.N. ya existente [84].

### 4.3.1 Transporte Marítimo

El transporte de H<sub>2</sub> por mar tiene la ventaja de cubrir grandes distancias y llegar hasta zonas aisladas, así como conectar a los países proveedores con exportadores de H<sub>2</sub>. Además, también se favorece la utilización de fuentes renovables para producir H<sub>2</sub> en puntos del planeta con altos recursos renovables para exportarlo posteriormente hasta países con menos recursos en energías limpias. Sin embargo, hoy en día el consumo de H<sub>2</sub> se lleva a cabo muy cerca de los puntos de producción, por lo que no existe aún una tecnología de transporte marítimo muy desarrollada.

Aun así, la estrategia para transportar H<sub>2</sub> por vía marítima es prácticamente idéntica de la que se lleva a cabo para transportar G.N.L. En primer lugar, el H<sub>2</sub> producido se debe licuar y luego se almacena en los recipientes anteriormente explicados. Posteriormente se transporta y finalmente se regasifica en su punto de aplicación. Es por ello que la infraestructura asociada al transporte marítimo, la cual se refleja en la Fig. 4.20, es muy costosa [84].



**Fig. 4.20:** Esquema del transporte de H<sub>2</sub> por vía marítima [84].

Como se ha explicado en el apartado 4.2.2, almacenar H<sub>2</sub> en forma líquida presenta las desventajas de que consume el 30 o 40% del PCI de este para llevar a cabo la licuación, además de que es necesario aislar muy bien térmicamente el recipiente para que no se escape el H<sub>2</sub> a través de las válvulas de alivio. Esto hace que el aislamiento térmico de los buques sea un gran reto tecnológico.

Sin embargo, en diciembre de 2021 se llevó a cabo el transporte de H<sub>2</sub> licuado a -243°C y a 800 bar mediante el buque representado en la Fig. 4.21, el Suiso Frontier, con una capacidad de 1.250 m<sup>3</sup> desde la costa sur de Australia hasta Japón, construido por la empresa Kawasaki Heavy Industries [84,85].



**Fig. 4.21:** Suiso Frontier, el primer barco de transporte de H<sub>2</sub> líquido [85].

### 4.3.2 Transporte Terrestre

El transporte de H<sub>2</sub> para distancias cortas, menores de 300 Km, se realiza normalmente a través de camiones, aunque también se podrían emplear ferrocarriles. Si distribuyen el H<sub>2</sub> en forma gaseosa comprimido, se denominan camiones y trailers de tubo, que transportan recipientes cilíndricos a una presión de 200-500 bar y de hasta unos 360 Kg de peso. Por otra parte, los camiones cisterna, que son los que transportan el H<sub>2</sub> en forma de líquido, pueden llegar a cargar

hasta 3.500 Kg, como se observa en la Fig. 4.22 [84].

Para distancias superiores a 500 Km, está justificado el uso de camiones cisterna debido al impacto que tiene la licuación del H<sub>2</sub>, y para distancias menores de 300 Km se emplean los camiones de tubo con H<sub>2</sub> comprimido en forma de gas [84].



**Fig. 4.22:** Camión de tubo para transportar H<sub>2</sub> comprimido [86].

### 4.3.3 Transporte a través de la Red de Gas Natural

El H<sub>2</sub> gaseoso comprimido puede ser distribuido a través de la infraestructura ya existente de G.N., lo que permite un mayor aprovechamiento de las instalaciones actuales reduciendo así los costes de operación, siendo muy apropiado para el transporte de grandes volúmenes de H<sub>2</sub> a grandes distancias [84].

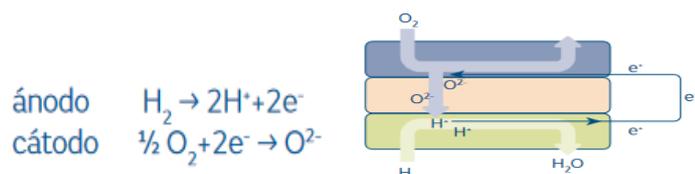
Sin embargo, puede presentar varios inconvenientes como las fugas y permeación del H<sub>2</sub>, así como la fragilización de este que puede causar corrosión a las tuberías metálicas. Es por ello por lo que existe la posibilidad de llevar a cabo la construcción de una red de tuberías para el transporte exclusivo de H<sub>2</sub>, como puede ser la iniciativa The European Hydrogen Backbone, que tiene como objetivo acelerar la descarbonización en Europa estableciendo una red de gasoductos, nuevos y existente, permitiendo el desarrollo de un mercado de H<sub>2</sub> competitivo y renovable [87].

## 4.4 Aplicaciones Finales del Hidrógeno

La última etapa de la cadena de valor del H<sub>2</sub> es su empleo en determinados usos finales. Actualmente, se pueden resumir en tres las aplicaciones del H<sub>2</sub>: su uso directo para diferentes procesos industriales, en FC y en MCI. Esta última de las aplicaciones es el fin último de este trabajo y se desarrollará con más detalle en apartados posteriores.

En primer lugar, es conveniente explicar en detalle la tecnología de las FC de H<sub>2</sub> que son usadas en multitud de sectores:

Las FC son dispositivos que realizan un proceso inverso al llevado a cabo en los electrolizadores, es decir, utilizan la energía química del H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> para obtener energía eléctrica sin que exista ningún tipo de combustión. Las moléculas de H<sub>2</sub> que alimentan a la pila reaccionan con el O<sub>2</sub> para producir H<sub>2</sub>O, liberando en el proceso electrones que son utilizados como corriente eléctrica, como puede verse en la Fig. 4.23. Al igual que los electrolizadores, las FC están formados por por dos electrodos, un ánodo y un cátodo, separados por un electrólito que puede ser líquido o sólido [84].



**Fig. 4.23:** Reacciones en una FC y su representación [84].

En la Fig. 4.24 se clasifican en función de sus parámetros los principales tipos de FC, como son las de membrana polimérica (PEMFC), las alcalinas (AFC), las basadas en ácido fosfórico como electrolito (PAFC), las de carbonato fundidos (MCFC) y las que están fundamentadas en óxidos sólidos cerámicos (SOFC):

Tipos de pilas de combustible					
	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Combustible utilizado	Hidrógeno o metano	Hidrógeno	Hidrógeno	Metano	Hidrógeno o metano
Rango de potencia (kW)	1-100	1-100	5-400	300-3.000	1-2.000
Eficiencia (%) H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>	60/40	60/-	40/-	-/50	70/60
Temperaturas de operación (°C)	40-80	65-220	150-210	600-700	600-900
Aplicación	Transporte Electricidad Cogeneración Generación distribuida	Electricidad Aplicaciones espaciales	Electricidad Cogeneración	Generación estacionaria a gran escala	Electricidad Cogeneración Generación distribuida

**Fig. 4.24:** Principales parámetros y aplicaciones de las tecnologías de FC [84].

Como se podrá observar, las FC están presentes en la mayoría de las aplicaciones actuales del H<sub>2</sub>.

#### 4.4.1 Materia Prima para Uso Industrial

La mayor parte de la demanda de H<sub>2</sub> en la actualidad está dominada por aplicaciones industriales, siendo las principales la industria del refino de petróleo, la producción de NH<sub>3</sub>, fertilizantes y otros productos químicos.

El refino de petróleo, que consiste en convertir el crudo de petróleo en productos finales como son los combustibles o materia prima petroquímica, es el mayor demandante de H<sub>2</sub> de la actualidad. Consume al año aproximadamente 40 Mt de H<sub>2</sub> lo que significa en 33% de la demanda mundial de H<sub>2</sub>, y se prevé que aumente hasta un 7% más hasta el año 2030 donde comenzaría a

estabilizarse [65].

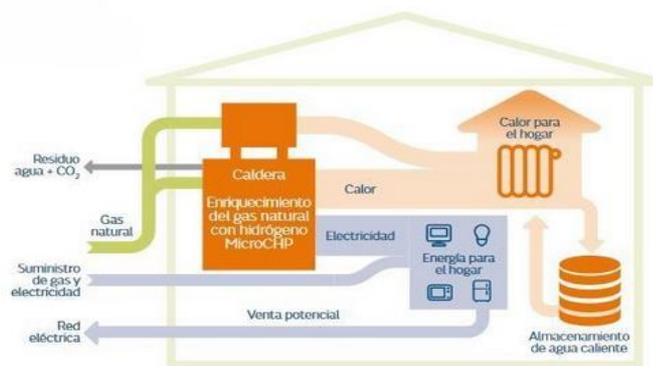
Las principales aplicaciones del H<sub>2</sub> en las refinerías están dedicadas a procesos de eliminación de impurezas del petróleo crudo, lo que se conoce como hidrotratamiento, o para la mejora de crudos más pesados. Las opciones para descarbonizar este sector es la utilización de sistemas de CCUS a la hora de producir H<sub>2</sub> o sustituirlo por uno que provenga directamente de la electrólisis alimentado por energías renovables [65].

Debido a su composición química, el H<sub>2</sub> también es muy empleado en la producción tanto de NH<sub>3</sub> como CH<sub>3</sub>OH que posteriormente sirven para la elaboración de fertilizantes, biocombustibles y plásticos. La producción de NH<sub>3</sub> emplea alrededor de 31 Mt de H<sub>2</sub> al año por los 12 Mt que se necesitan para el CH<sub>3</sub>OH [65].

El H<sub>2</sub> también se emplea como fuente de energía para alcanzar las altas temperaturas que se requieren para obtener acero en la industria metalúrgica. Actualmente es la cuarta fuente de demanda de H<sub>2</sub> con 4 Mt anuales lo que representa el 3% de consumo total de H<sub>2</sub> [65].

#### 4.4.2 Generación de Calor

Las FC alimentadas con H<sub>2</sub> se usan en los sistemas de CHP, es decir, producción simultánea de calor y electricidad, tanto a nivel industrial como a nivel doméstico cuando se trata de una potencia menor a 20 KW, denominadas micro-CHP. Mientras que los sistemas CHP utilizan principalmente la tecnología SOFC, PAFC y MCFC, los sistemas micro-CHP están basados en PEMFC y SOFC [84]. En la Fig. 4.25 se presenta un esquema de un sistema micro-CHP:



**Fig. 4.25:** Esquema de un sistema micro-CHP para cogeneración doméstica [84].

En Europa, el proyecto ENE.FIELD, liderado por empresas líderes en calderas domésticas y FC, ha conseguido la instalación de varias decenas de miles de sistemas micro-CHP en hogares europeos [84]

Además del uso de FC para la generación de calor a nivel doméstico, se pueden seguir empleando MCI para sistemas de cogeneración ya que son la tecnología más empleada para bajas potencias, pero en lugar de usar como fuente de energía G.N. o diésel, lo harían empleando H<sub>2</sub>

como combustible principal o un modo de combustión dual formado por H<sub>2</sub>-diésel [88,89].

### 4.4.3 Generación de Potencia

El H<sub>2</sub> también puede ser usado en la generación de energía implementado a través de FC en plantas de producción de potencia, como pueden ser turbinas de gas o ciclos combinados. Esto haría reducir las emisiones contaminantes a la vez que se mejora la eficiencia del sistema, siendo la tecnología empleada en estos casos la SOFC por ser la que más temperatura de trabajo admite, del orden de 600-900 °C [84].

A su vez, se pueden emplear FC estacionarias para la generación de electricidad ya sea conectadas a la red principal o como servicio auxiliar para cuando la demanda energética lo requiera [84].

Al igual que en caso anterior, para la producción de electricidad se podría seguir utilizando MCI, pero alimentados con combustible dual H<sub>2</sub>-diésel o H<sub>2</sub> como combustible único, ya que este tipo de motores son empleados por Endesa en producción de potencia en diferentes islas Canarias y Baleares [90,91,92].

También se podría utilizar H<sub>2</sub> para alimentar turbinas de gas empleando un modo dual H<sub>2</sub>-diésel, representando una alternativa viable a las FC [93,94]. Hoy en día, ya hay en marcha proyectos que emplean una combustión dual en turbinas de gas [95].

### 4.4.4 Transporte

El sector transporte representa casi un tercio de las emisiones contaminantes en Europa, por lo que su descarbonización es clave para la transición energética. Comparado con la electrificación, el H<sub>2</sub> supera las limitaciones de autonomía y los elevados tiempos de recarga de los vehículos eléctricos a batería, haciendo que el H<sub>2</sub> sea una muy buena opción para descarbonizar el transporte ligero y pesado, así como el marítimo y el aéreo, como se refleja en la Fig. 4.26 [84]:

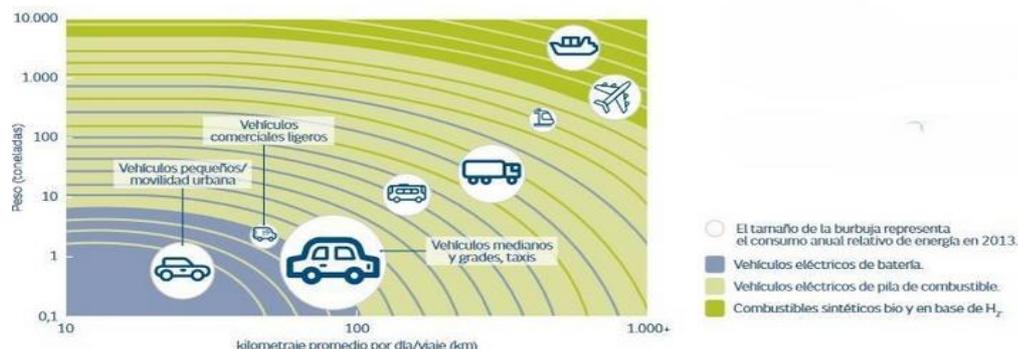


Fig. 4.26: Aplicaciones del H<sub>2</sub> en el transporte [84].

#### 4.4.4.1 Transporte Terrestre Ligero

Las emisiones de los vehículos privados suponen alrededor de la mitad de las emisiones generadas por el sector, por lo que la descarbonización del transporte debe centrarse de forma obligada en ellos. Hoy en día, una de las formas de lograrlo es a través de un vehículo impulsado por FC, en concreto, por una PEMFC [84].

De esta manera, estos vehículos emitirán a la atmósfera H<sub>2</sub>O y si el H<sub>2</sub> es producido por energías renovables, tampoco emitirán ningún tipo de emisiones contaminantes, alcanzando una autonomía de unos 500 Km. En el mercado hay varios modelos comerciales, entre los que destacan el Toyota Mirai y el Hyundai Nexu con un precio de unos 70.000 € cada uno [15].

Además, otra opción al empleo de FC es el uso de H<sub>2</sub> en motores de combustión interna alternativos (MCIA), más concretamente en motores de encendido por compresión (CI). Esta alternativa está en desarrollo y supondría no cambiar de tecnología y seguir dándole una vida útil a este tipo de motores.

#### 4.4.4.2 Transporte Terrestre Pesado

Para el transporte de vehículos pesados, el uso de H<sub>2</sub> en FC es una de las mejores opciones por delante de los vehículos a batería. Además, en el caso de autobuses o camiones de recogida de residuos como operan siempre en un circuito cerrado, son ideales para fomentar el desarrollo e implantación de la infraestructura de HRS [84].

Europa sigue liderando la implantación de vehículos impulsados con H<sub>2</sub>, con proyectos como JIVE, que tiene como gran objetivo avanzar en la comercialización de autobuses con FC a través del despliegue tanto de vehículos como de la infraestructura necesaria, alcanzando casi los 300 autobuses [84], como se observa en la Fig. 4.27:

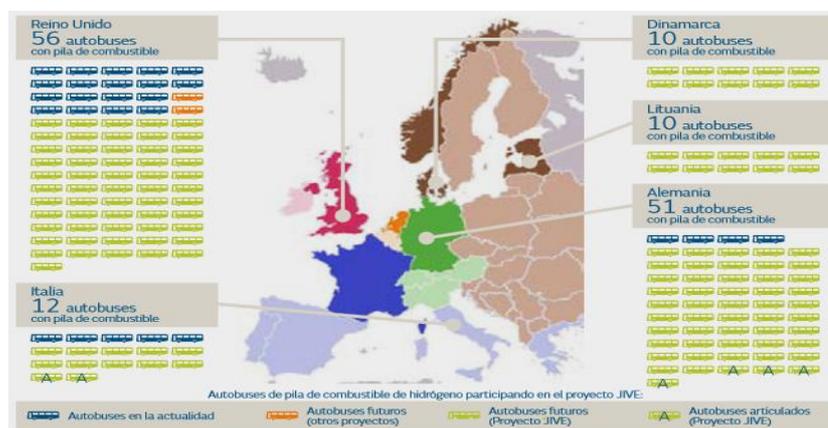


Fig. 4.27: Implantación de autobuses de H<sub>2</sub> en Europa [84].

### 4.4.4.3 Transporte Marítimo y Aéreo

El sector de la aviación puede hacer uso del H<sub>2</sub> para reducir sus emisiones contaminantes, usando FC en aviones pequeños y de corto alcance o quemando directamente H<sub>2</sub> en lugar de queroseno para aviones más grandes [84] .

El sector naval también persigue la descarbonización, pero las aplicaciones marítimas del H<sub>2</sub> aún se encuentran en una fase muy inicial para su despliegue a nivel comercial. Aun así, en zonas como el Mar del Norte se ha empezado a regular ferris para que sean impulsados en su totalidad por energías renovables, lo que ha llevado a embarcaciones a ser propulsadas por FC [84].

Además, se están llevando a cabo proyectos como FLAGSHIPS, que tiene como objetivo un transporte marítimo y fluvial limpio al desarrollar buques que funcionen con FC. También existe la posibilidad de descarbonizar los puertos y aeropuertos gracias al H<sub>2</sub>, con proyectos como H2Ports que lleva a cabo las operaciones portuarias reales gracias a tecnologías de FC y a una estación móvil de suministro de H<sub>2</sub> [96].

Al igual que en los casos de transporte por vía terrestre, el empleo de H<sub>2</sub> en MCIA en el sector marino, más concretamente en motores de CI de 2T lentos, es una tecnología que está actualmente en desarrollo y que puede lograr disminuir las emisiones contaminantes en este sector.

### 4.4.5 Conclusiones

Como se ha podido observar durante todo el capítulo, el H<sub>2</sub> es un vector energético que cuenta con numerosos atractivos como pueden ser la gran variedad de métodos que hay para obtenerlo, siendo cada vez más abundantes aquellos que lo producen de manera renovable. A su vez, cuenta con varias formas de almacenamiento y cada vez más desarrollo en construcciones e infraestructuras que permiten un correcto transporte y aprovisionamiento. Además, se usa en numerosas aplicaciones importantes como son el sector industrial, la generación de potencia ya sea en MCIA o en turbinas de gas o el sector del transporte, que pueden ayudar a reducir las emisiones del sector energético.

Como se ha mencionado anteriormente, una de las formas de utilizar el H<sub>2</sub> es emplearlo en motores CI debido a que sus características fisicoquímicas lo hacen ideal para adaptarse a esta tecnología. Es por ello por lo que en apartados posteriores se explicará su utilización en este tipo de motores y porque se presentan como una alternativa, ya no solo a los combustibles fósiles, si no a las baterías y a los sistemas de FC actuales para ser empleados en propulsión marina y poder lograr la descarbonización del sector marítimo.

# 5 EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE EN MOTORES DIÉSEL

---

El objetivo de este capítulo es realizar una revisión del empleo de H<sub>2</sub> como fuente de energía alternativa para impulsar los motores CI, analizando su efecto en diferentes aspectos del motor como son su rendimiento, las características de su combustión y sus emisiones contaminantes, así como las diferentes técnicas para paliar las consecuencias negativas que tenga su utilización.

## 5.1 Utilización del Hidrógeno en Motores de Encendido por Compresión. Ventajas e Inconvenientes.

Los motores CI son aquellos que usan diésel como fuente de energía y permiten el autoencendido del combustible debido a las altas relaciones de compresión (RC) con las que se diseña, sin necesidad de una bujía como ocurre en el caso de los motores de encendido por chispa (SI). Estos existen desde hace más de un siglo y hoy en día son usados en multitud de sectores como pueden ser el transporte, la agricultura y la generación de potencia a pequeña escala debido principalmente a su eficiencia térmica y sus bajas emisiones de CO y de HC [98,98]. Las emisiones de estos contaminantes son bajas ya que estos motores son de combustión pobre con una alta relación aire-combustible, lo que proporciona suficiente oxígeno para una combustión completa [99].

Sin embargo, los motores CI producen elevadas cantidades de humo y partículas (PM), así como óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) debido a diversos factores como la combustión de la mezcla heterogénea de aire y diésel, el contenido de azufre y cenizas en el combustible y la temperatura de combustión alcanzada en el cilindro [99]. Es por ello que en los últimos años estos motores han recibido multitud de críticas por los niveles de contaminantes emitidos en comparación con los motores de gasolina, e incluso se redactaron algunos artículos sugiriendo el fin de estos motores [100,101].

Además, uno de los principales GEI como es el CO<sub>2</sub> está incluido en las regulaciones de emisiones actuales. Por ejemplo, la UE estableció en 2014 una regulación de emisiones de CO<sub>2</sub> para vehículos de pasajeros de 95 g/Km para el año 2021, así como la implementación de la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) de 820 gCO<sub>2</sub>/Km para todo tipo de vehículos [102,103]. Por otro lado, la mejora de la eficiencia energética de los motores CI con las técnicas actuales no se puede llevar a cabo simultáneamente sin un aumento de las emisiones contaminantes [97].

Las características fisicoquímicas del H<sub>2</sub> lo hacen muy adecuado para su empleo en motores CI, así como una opción viable para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones al mismo tiempo [97]. Las propiedades principales del H<sub>2</sub> son muy diferentes a las de otros combustibles como pueden ser la gasolina, el diésel o el G.N., como se refleja en la Tabla 5.1. Como puede observarse, una de las principales ventajas del H<sub>2</sub> es su gran densidad energética con respecto a los otros combustibles, por ejemplo 1 Kg de H<sub>2</sub> contiene hasta 3 veces más energía que

la misma cantidad de diésel o gasolina.

Además, posee unos amplios límites de inflamabilidad lo que permite un buen funcionamiento del motor en una gran gama de mezclas aire-combustible [100]. Igualmente, posee una alta velocidad de llama y una alta difusividad que conduce a una alta eficiencia de combustión y al tratarse de un combustible libre de carbono, no produce emisiones tales como CO, CO<sub>2</sub>, HC y PM si no que el subproducto de su combustión es vapor de agua [97]. Es por todo ello que el empleo de H<sub>2</sub> es la mejor opción para motores CI.

<b>Tabla. 5.1:</b> Principales características del H <sub>2</sub> con respecto a otros combustibles [100].				
	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>Gas natural</b>	<b>Gasolina</b>	<b>Diésel</b>
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	0,09	0,7-0,9	737	820-950
<b>Poder Calorífico Inferior (PCI) (Mj/Kg)</b>	120	47	42,5	43
<b>Temperatura de autoignición (K)</b>	858	813	520-583	473
<b>Límites de inflamabilidad (% volumétrico)</b>	4-75	5-15	1,4-1,6	0,6-7,5
<b>Energía mínima de ignición (mJ)</b>	0,02	0,29	-	-

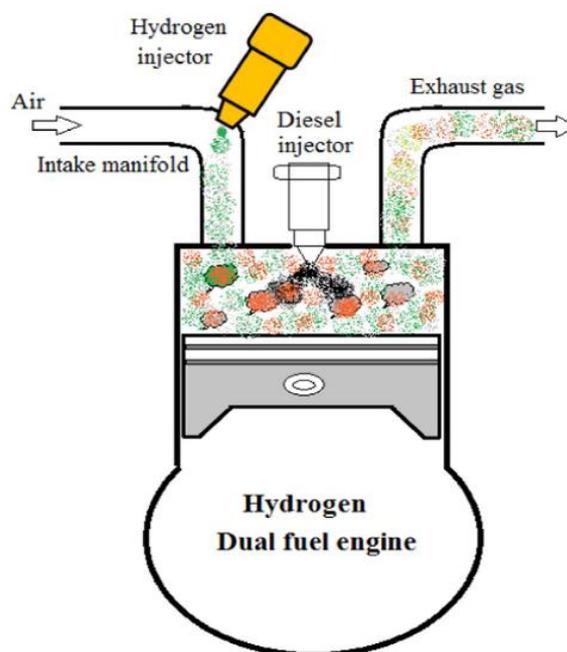
En cuanto a la aportación de H<sub>2</sub> al motor CI, existen principalmente dos casos diferentes [100]:

- **Modo único de combustión:** El H<sub>2</sub> se emplea como única fuente de energía, utilizando bujías para su ignición, lo cual requiere la modificación de un motor CI o bien utilizarlo en un motor SI.
- **Modo dual de combustión:** En este modo se puede diferenciar a su vez dos casos distintos en función de la cantidad de H<sub>2</sub> que se emplee. En el primero, el H<sub>2</sub> se utiliza como principal combustible usando diésel (combustible piloto) para llevar a cabo la ignición. La mayor parte de la energía suministrada en este caso proviene del H<sub>2</sub>. El otro caso sería igual que el anterior, pero sin un combustible principal, es decir, pudiendo variar el porcentaje de la energía aportada por cada combustible.

Se han realizado estudios en el pasado intentando hacer funcionar un motor CI usando H<sub>2</sub> como fuente única de energía, demostrando las pocas posibilidades de implementación de este modo. Esto se debe a que el rango de operación del motor era muy pequeño debido a la resistencia del H<sub>2</sub> a la autoignición. Este problema no se soluciona ni aumentando la relación de compresión

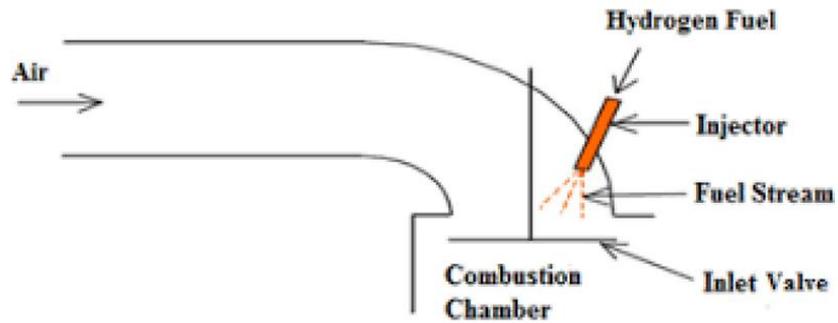
a valores de 29:1. Además, también se obtuvieron valores de  $\text{NO}_x$  y presiones medias efectivas (PME) mayores que en casos donde se utiliza diésel como combustible principal [100].

Con respecto al modo dual de combustión, se ha demostrado que el empleo de  $\text{H}_2$  junto con el diésel como combustible piloto tiene un enfoque más realista debido a que de esta manera se logra disminuir la temperatura de autoignición [100]. Normalmente en los motores que emplean este modo, el  $\text{H}_2$  es introducido en la cámara de combustión en algún punto del colector de admisión y el diésel es suministrado cerca del punto muerto superior (PMS) para iniciar la ignición de la premezcla de aire e  $\text{H}_2$ , como puede observarse en la Fig. 5.1. Además, este tipo de motores tienen una gran flexibilidad ya que pueden operar en modo dual si se dispone de  $\text{H}_2$  o en modo diésel como único combustible [97].

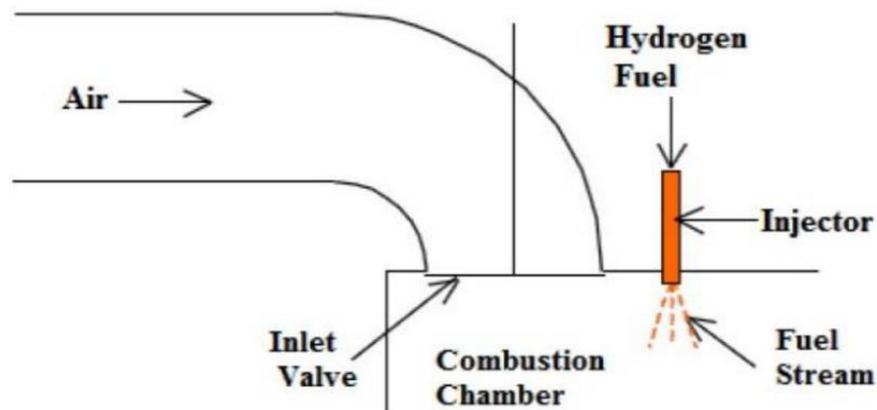


**Fig. 5.1:** Esquema del modo dual de combustión en un motor CI con inyección de  $\text{H}_2$  en el conducto de admisión [97].

Además de la inyección de  $\text{H}_2$  en el conducto de admisión, existen otras técnicas como por ejemplo son inyectarlo justo antes de la válvula de admisión, como se puede observar en la Fig. 5.2, o directamente en la cámara de combustión a través de un inyector reflejado en la Fig. 5.3 [97,104]. Inyectar  $\text{H}_2$  en el colector de admisión es la técnica más antigua y empleada ya que presenta una serie de beneficios como es la mejora en la mezcla de aire-combustible, la exposición del  $\text{H}_2$  a una menor temperatura, así como las menores alteraciones que se requieren para su uso con respecto a la configuración original del motor. Sin embargo, este tipo de técnica puede producir detonaciones del motor y retroceso de la llama [104].



**Fig. 5.2:** Técnica de inyección de H<sub>2</sub> justo antes de la válvula de admisión [104].



**Fig. 5.3:** Técnica de inyección de H<sub>2</sub> directamente en la cámara de combustión [104].

La mayoría de los estudios realizados sobre el modo de combustión dual se centran en el efecto que tiene el H<sub>2</sub> en tres aspectos: el rendimiento del motor, las características de la combustión y las emisiones producidas [97].

Relativo al desempeño del motor, se analizan los siguientes aspectos:

- Rendimiento térmico y potencia suministrada.
- Rendimiento volumétrico.

Referente a las características de la combustión, se centran en:

- Duración de la combustión.
- Retraso a la combustión (ignition delay).
- Presión y temperatura dentro del cilindro.
- Rendimiento de la combustión.
- Temperatura de los gases de escape.
- Tasa de liberación de calor.

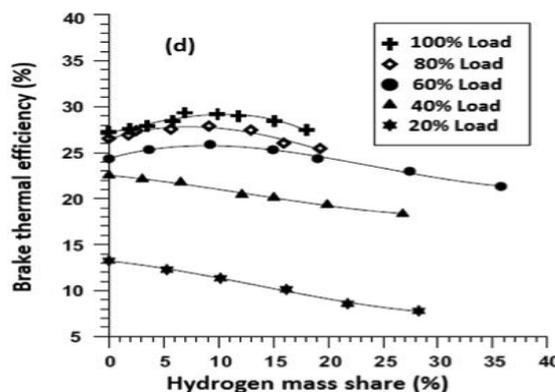
Y finalmente, en cuanto a las emisiones:

- CO.
- CO<sub>2</sub>.
- HC.
- PM y humo.
- NO<sub>x</sub>.

### 5.1.1 Rendimiento Térmico y Potencia Suministrada

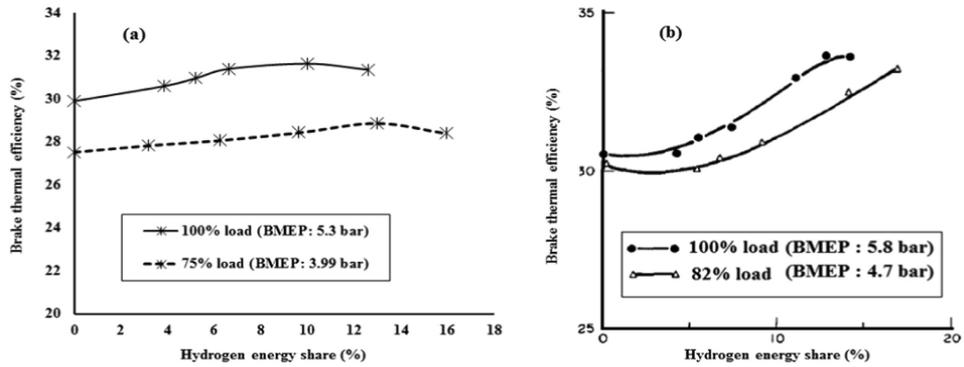
Desde el punto de vista de la eficiencia térmica, numerosos estudios afirman que el rendimiento aumenta para alta y media carga y decrece para cargas bajas, cuando la cantidad de H<sub>2</sub> suministrado al motor aumenta [97,98,105].

En la Fig. 5.4 se puede observar que para una carga del 20%, la eficiencia térmica disminuye de aproximadamente el 13% con una cantidad del 0% de H<sub>2</sub> al 8% para un porcentaje de H<sub>2</sub> del 29%. También se refleja que ocurre lo mismo si se opera con una carga del 40%. Las razones por la que el rendimiento térmico disminuye al trabajar a bajas cargas son la menor temperatura al final del proceso de compresión, la baja velocidad de la llama de la mezcla de aire y combustible y que se dispone de tiempo suficiente para que el calor se transfiera a las paredes del cilindro, provocando pérdidas. [106].



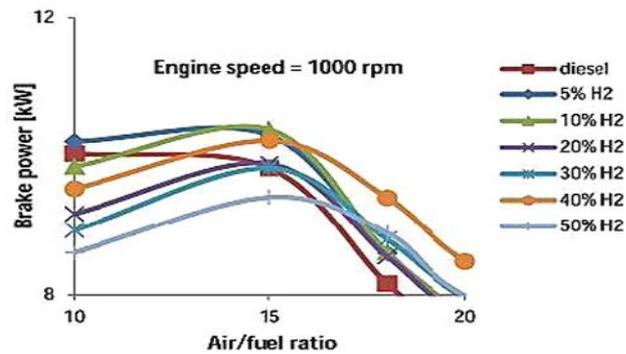
**Fig. 5.4:** Variación de la eficiencia térmica con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> y para diferentes cargas de operación [97].

En cuanto a la otra afirmación, en la Fig. 5.5 se observan dos estudios que reflejan que a medias y altas cargas la eficiencia térmica del motor en modo dual se incrementa al aumentar el porcentaje de H<sub>2</sub> usado. La mejora del rendimiento es debido a la mejora de la mezcla de aire y combustible que conduce a una alta velocidad de llama, produciendo una reducción de las irreversibilidades y del nivel de inquemados, dando como resultado una mejor combustión [97,105].



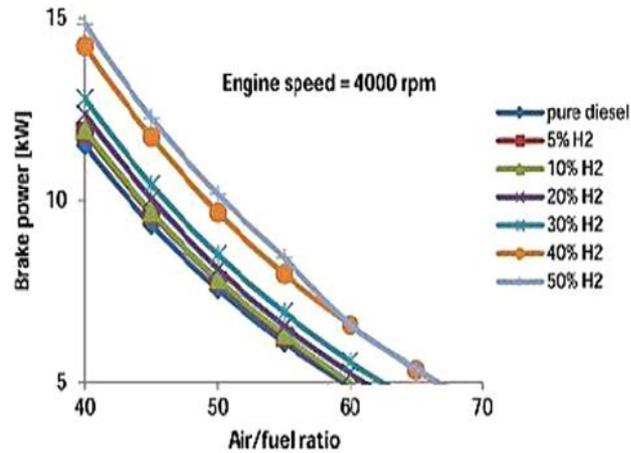
**Fig. 5.5:** Variación de la eficiencia térmica con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> para medias y altas cargas [97].

Relativo a la potencia suministrada, se apunta a que se produce un aumento con la adición de H<sub>2</sub> al motor. Además, otros parámetros como la relación entre aire y combustible y la velocidad del motor afectan a la potencia junto con la cantidad de H<sub>2</sub> [105]. Como refleja la Fig. 5.6, se encontró que para una relación aire-combustible menor de 15 y para un porcentaje de H<sub>2</sub> de entre 5 y 10%, la potencia final aumenta. Y a pesar de que para relaciones de aire y combustible mayores de 15 la potencia final disminuye, esta lo hace más lentamente si se añade H<sub>2</sub> que si se utilizase diésel como combustible único.



**Fig. 5.6:** Potencia del motor con respecto a la relación aire-combustible para diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> y para 1000 rpm [105].

Además, para altas velocidades del motor y relaciones aire-combustible, se obtiene una mayor potencia final cuanto mayor es el porcentaje de H<sub>2</sub> empleado con respecto a la que se obtendría si estuviera operando con el combustible diésel puro, como puede verse en la Fig. 5.7 [105].

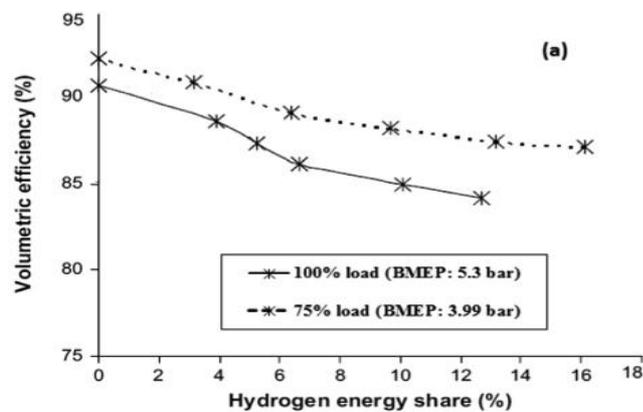


**Fig. 5.7:** Potencia del motor con respecto a la relación aire-combustible para diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> y para 4000 rpm [105].

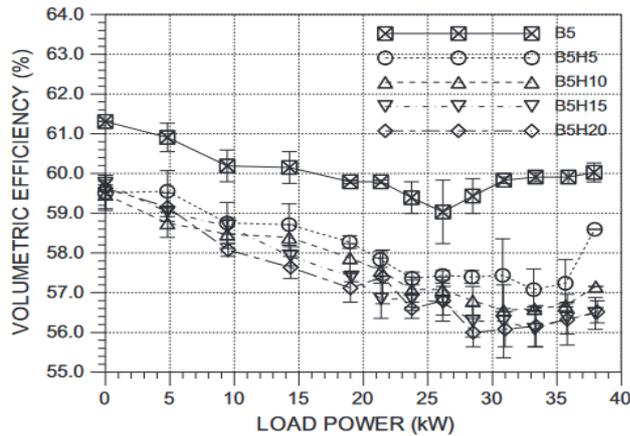
### 5.1.2 Rendimiento Volumétrico

Los artículos que analizan este parámetro apuntan a que el rendimiento volumétrico disminuye con el incremento de la cantidad de H<sub>2</sub> en motores de combustión dual. Esto ocurre ya que con la inyección de H<sub>2</sub> en el colector de admisión, que como se comentó anteriormente es la zona más empleada para inyectar H<sub>2</sub>, se produce una disminución del caudal de aire de entrada.

Además, el porcentaje de carga del motor también contribuye a la disminución de este parámetro. A mayor carga de operación, se produce un incremento en la tasa de liberación de calor lo que conduce a un aumento en la temperatura de admisión, conllevando una disminución de su densidad y por consiguiente del rendimiento volumétrico [97,107,108]. Todo esto queda reflejado en las Fig. 5.8 y 5.9, donde el rendimiento volumétrico disminuye a medida que aumentamos la cantidad de H<sub>2</sub> y su carga de trabajo.



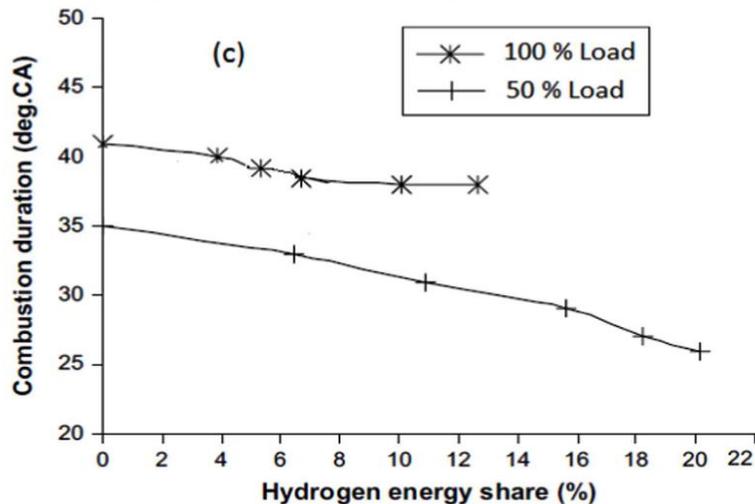
**Fig. 5.8:** Variación del rendimiento volumétrico con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> suministrado [97].



**Fig. 5.9:** Variación del rendimiento volumétrico con respecto a la carga de operación y al porcentaje de H<sub>2</sub> [107].

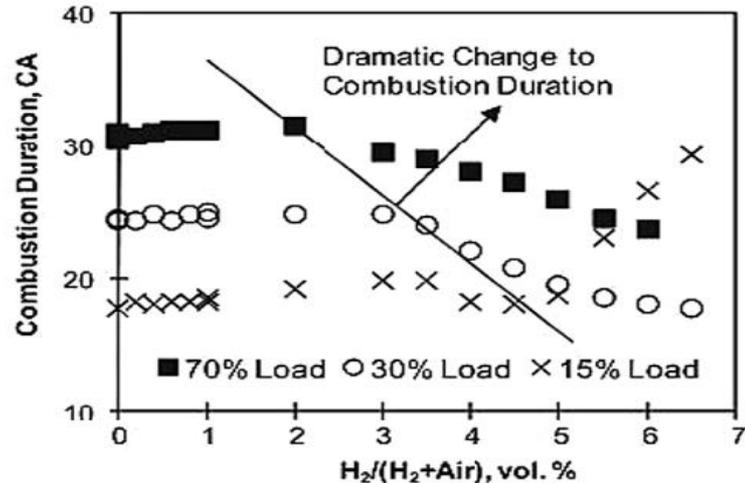
### 5.1.3 Duración de la Combustión

En los motores de CI que emplean el modo dual, la duración de la combustión disminuye a medida que aumentamos el contenido de H<sub>2</sub>, debido a la alta velocidad de llama de este combustible. Además, gracias al incremento de H<sub>2</sub> se produce una gran concentración de radicales libres como O, H y OH a altas temperaturas, lo que conlleva una velocidad de reacción mayor [97,105,106]. Como puede observarse en la Fig. 5.10, para medias y altas cargas la duración de la combustión se reduce de manera gradual al aumentar el porcentaje de H<sub>2</sub> utilizado.



**Fig. 5.10:** Variación de la duración de la combustión con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> para medias y altas cargas [97].

Sin embargo, se ha observado que cuando el motor trabaja a bajas cargas, un aumento de la cantidad de H<sub>2</sub> supone un aumento de la duración de la combustión debido a un comportamiento anormal de la ignición [105,109]. Se puede ver en la Fig. 5.11 que para cargas de trabajo del orden del 15%, si se aumenta el porcentaje de H<sub>2</sub> en la mezcla más allá del 5% volumétrico, se lleva a cabo un aumento considerable de la duración de la combustión produciendo el efecto contrario que al trabajar a medias y altas cargas.



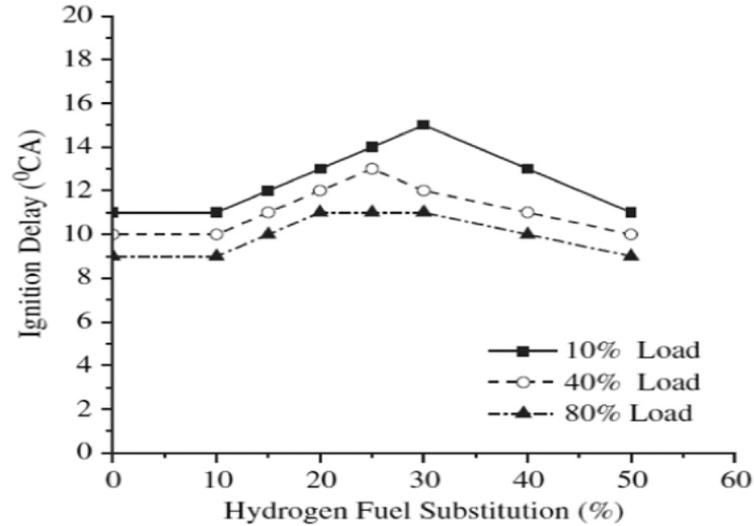
**Fig. 5.11:** Variación de la duración de la combustión con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> y para diferentes cargas de trabajo [105].

#### 5.1.4 Retraso a la Combustión

El retraso a la combustión en motores CI es el tiempo que transcurre entre que se produce la inyección del combustible y se inicia la ignición. Esta demora en el encendido sufre una tendencia fluctuante, inicialmente se produce un aumento del retraso en la combustión para cantidades bajas de H<sub>2</sub> y posteriormente va disminuyendo conforme se va aumentando el porcentaje de H<sub>2</sub> en la mezcla [97,108].

El incremento inicial de la demora en la combustión se debe a la pérdida de presión parcial del O<sub>2</sub> con el aumento de la cantidad de H<sub>2</sub>, y a la disminución de la temperatura en el cilindro como consecuencia del alto calor específico de la carga. Por otro lado, la reducción en el retardo se produce, al igual que en el caso anterior, por el aumento de la concentración de radicales libres (O, H, OH) al aumentar la cantidad de H<sub>2</sub>, que producen una mejora en la velocidad de la reacción [97].

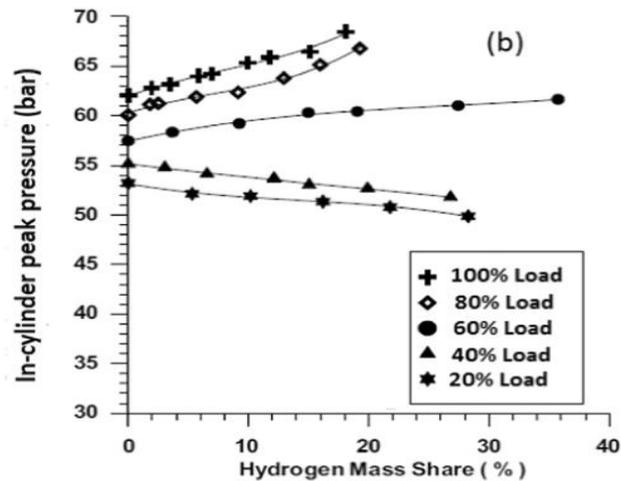
En la Fig. 5.12, puede observarse cómo las diferentes cargas de operación del motor influyen en la cantidad necesaria de H<sub>2</sub> para que se produzca el cambio de tendencia en la demora a la ignición. Por ejemplo, a un 80% de carga el cambio de tendencia se produce con un porcentaje de H<sub>2</sub> del 20%, en cambio si se trabaja a un 10% se produce con una cantidad de H<sub>2</sub> del 30% aproximadamente [97].



**Fig. 5.12:** Variación del retraso a la combustión con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> y para diferentes cargas de trabajo [97].

### 5.1.5 Presión y Temperatura dentro del Cilindro

La presión dentro de este tipo de motores con combustión dual aumenta para altas y medias cargas con la adición de H<sub>2</sub>, sin embargo, experimenta el efecto contrario cuando opera a bajas cargas [97,105,106]. Esto queda reflejado en la Fig. 5.13 donde puede verse que para cargas de 20 y 40%, la presión va decreciendo a medida que se aumenta la cantidad de H<sub>2</sub> y para cargas mayores esta se va incrementando.



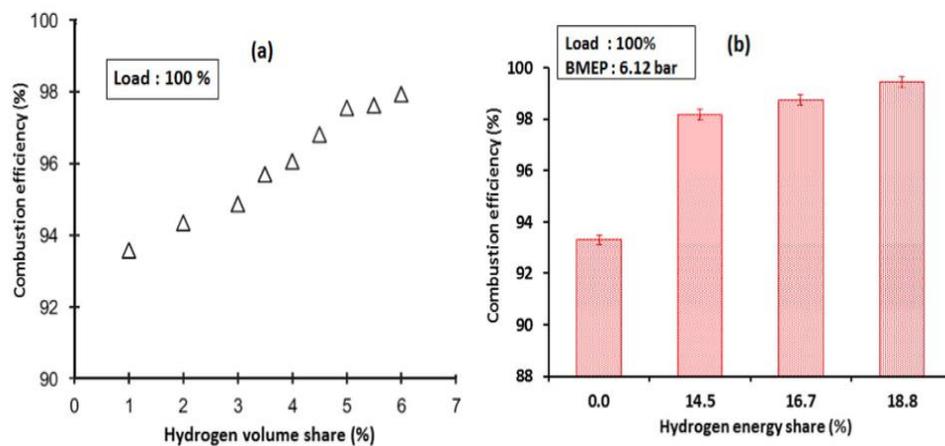
**Fig. 5.13:** Variación de la presión en el interior del cilindro para diferentes cantidades de H<sub>2</sub> y cargas de operación [97].

En cuanto a la temperatura dentro del cilindro, esta aumenta a medida que se aumenta la cantidad de H<sub>2</sub> dentro del motor para cargas altas y medias debido, precisamente, al aumento de la presión como consecuencia de la energía aportada por el H<sub>2</sub> [97].

### 5.1.6 Rendimiento de la Combustión

Como ocurría en parámetros anteriores, a medida que agregamos mayor cantidad de H<sub>2</sub> en el cilindro se produce un aumento de la velocidad de reacción debido al incremento de la temperatura de combustión, ocasionado por la gran concentración de radicales O, H y OH libres que existen. Este aumento de la velocidad de reacción conlleva a una mejora significativa en el rendimiento de la combustión [97,109].

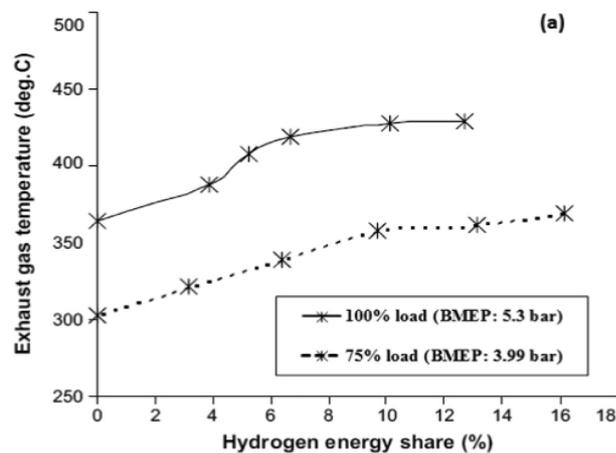
En la Fig. 5.14 se refleja como al incrementar la cantidad de H<sub>2</sub>, la eficiencia en la combustión va aumentando hasta acercarse a valores próximos al rendimiento que alcanzan los motores diésel que es del orden de 99.5% [97].



**Fig. 5.14:** Variación de la eficiencia en la combustión con respecto al porcentaje de H<sub>2</sub> utilizado [97].

### 5.1.7 Temperatura de los Gases de Escape

La temperatura de los gases de escape sube a medida que aumentamos el porcentaje de H<sub>2</sub> empleado ya que este tiene un PCI bastante superior al del diésel, como se reflejó en la Tabla 5.1, lo que conlleva a una rápida combustión y a una alta temperatura de la llama. Todo esto puede observarse en la Fig. 5.15.



**Fig. 5.15:** Variación de la temperatura de los gases de escape con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> empleado [97].

### 5.1.8 Tasa de Liberación de Calor

En un motor que emplea una combustión dual existen dos visiones diferentes acerca de cómo se produce la tasa de liberación de calor, algunos apuntan a que el proceso está compuesto por tres etapas mientras que otros señalan que estaría formado sólo por dos [97,105]:

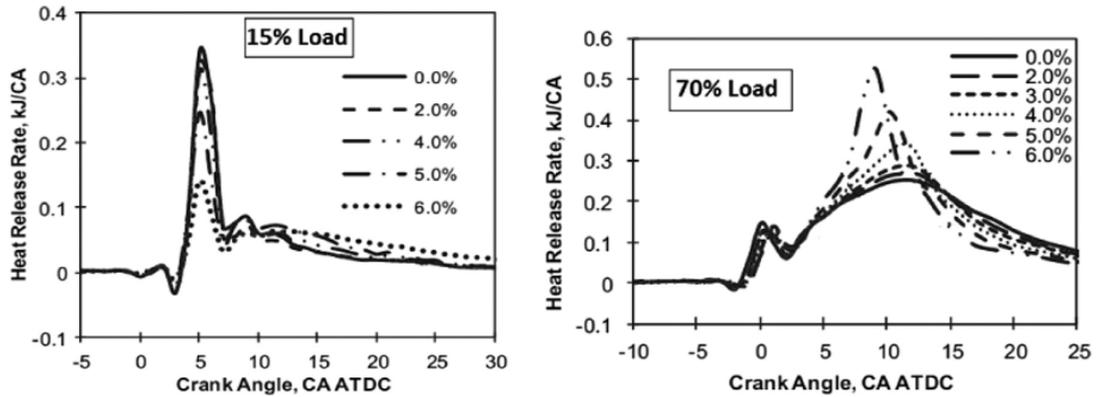
En cuanto al primer punto de vista, estas etapas son:

- En la primera etapa, la energía liberada por la combustión proviene en su mayor parte por el combustible diésel y una menor parte por la mezcla aire-H<sub>2</sub> que se arrastra durante el retraso del encendido.
- La segunda etapa corresponde a la combustión automática de la mezcla aire-H<sub>2</sub> y a la ignición por difusión del combustible diésel restante.
- En la tercera etapa, la energía liberada se produce por la combustión por difusión de las cargas sobrantes de ambos combustibles.

Relativo al segundo punto de vista, estas fases de la combustión son:

- La primera fase se corresponde principalmente con la combustión del diésel e H<sub>2</sub> que son arrastrados por la inyección de diésel.
- La liberación de calor en la segunda fase se debe principalmente a la propagación de la llama desde los centros de ignición hasta toda la cámara de combustión, provocado por la combustión del H<sub>2</sub> remanente.

Cuando se aumenta la cantidad de H<sub>2</sub> empleado en un motor con combustión dual, se ha observado que la tasa de liberación de calor aumenta si se opera a altas cargas y disminuye para cargas bajas [97,105,106]. Esto puede observarse en la Fig. 5.16, donde para una carga de operación del 70% el calor liberado sufre una tendencia creciente al aumentar la cantidad de H<sub>2</sub> mientras que decrece para una carga del 15%.



**Fig. 5.16:** Variación de la tasa de liberación de calor con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> empleado y a la carga de operación [97].

### 5.1.9 Emisiones de CO

En los MCI las emisiones de CO están controladas principalmente por la relación entre aire y combustible y por la temperatura en el interior del cilindro. La formación de este tipo de emisiones es fomentada por la presencia de mezclas ricas, por lo que en motores diésel estas serán bajas ya que trabajan con relaciones de mezclas pobres. Las emisiones de CO son aún más bajas en motores con combustión dual por el desplazamiento del diésel por el H<sub>2</sub> para una misma potencia. Es por ello que las emisiones de CO decrecen con la adición de H<sub>2</sub> para todas las cargas de operación del motor [97,100,105,96,109].

La formación de CO durante la combustión está dada por la Ec. 5.1. Como se ha comentado anteriormente, la adición de H<sub>2</sub> aumenta la concentración de radicales libres como O, H, OH que hace que se incremente la temperatura en el cilindro y como se puede observar en la Ec. 5.2, la constante de formación de CO depende exponencialmente de la temperatura. Es por ello por lo que al aumentar la cantidad de H<sub>2</sub> las emisiones de CO se reducen drásticamente, debido al incremento de temperatura [97,105,109].



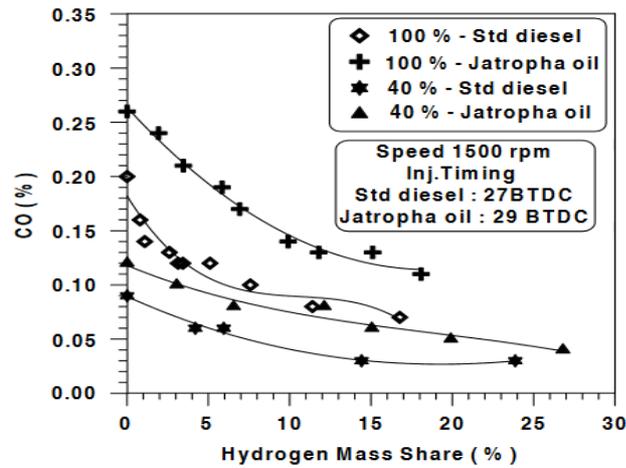
$$k_{f,CO} = 6.76 \times 10^{10} \times e^{(T/1102)} \quad (5.2)$$

Siendo:

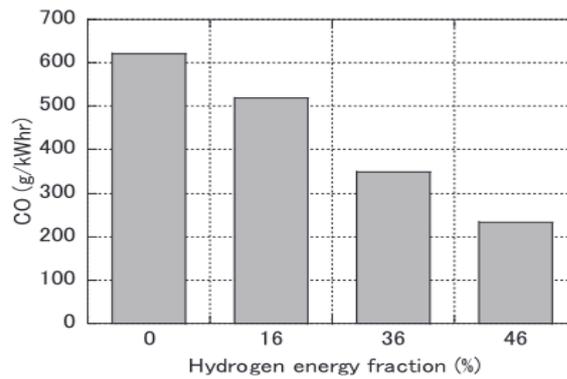
- R: Radical del HC.
- T: Temperatura del cilindro (K).
- $k_{f,CO}$ : Constante de formación de CO.

Como resumen, las emisiones de CO se ven reducidas con la adición de H<sub>2</sub> para cualquier carga de operación del motor por el incremento de la temperatura de combustión que disminuye la constante de formación de CO y por otro lado por el desplazamiento que sufre el combustible

diésel al aumentar la cantidad de H<sub>2</sub>. Todo esto puede verse en las Fig. 5.17 y 5.18:



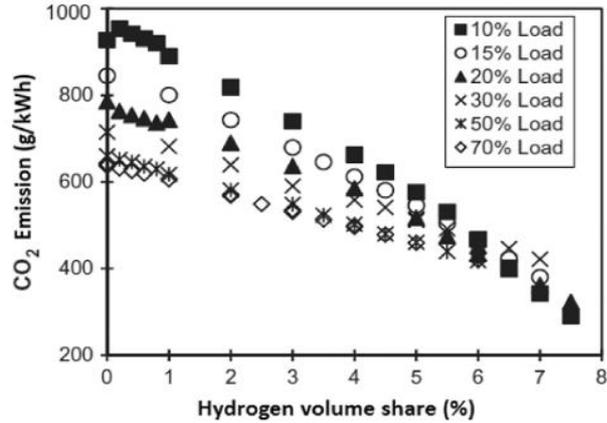
**Fig. 5.17:** Variación de las emisiones de CO con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> y para diferentes cargas de operación [110].



**Fig. 5.18:** Variación de las emisiones de CO con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> para una carga de trabajo determinada [100].

### 5.1.10 Emisiones de CO<sub>2</sub>

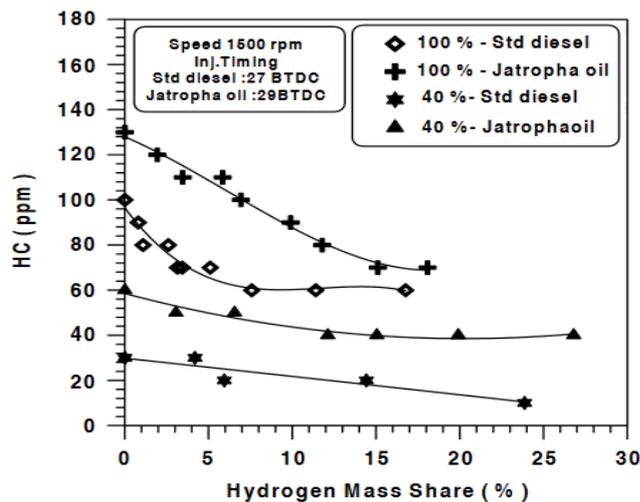
Las emisiones de CO<sub>2</sub> se ven reducidas en motores que emplean combustión dual. Esto se debe, al igual que en el caso anterior, por la sustitución del combustible diésel por H<sub>2</sub> que hace que disminuyan los átomos de carbono a medida que se aumenta la cantidad de H<sub>2</sub> utilizada. La reducción de emisiones se experimenta para cualquier carga de operación del motor [97,98,100]. En la Fig. 5.19 puede verse la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> conforme se incrementa el porcentaje de H<sub>2</sub>:



**Fig. 5.19:** Variación de las emisiones de CO<sub>2</sub> con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> empleado y para diferentes cargas de trabajo [97].

### 5.1.11 Emisiones de HC

Las emisiones de HC son el resultado de una combustión incompleta del combustible provocada por las bajas temperaturas de combustión, que conllevan a la deposición de combustible en las paredes y grietas de la cámara [105]. Se ha confirmado gracias a varios estudios de investigación que las emisiones de HC se reducen en motores de combustión dual al aumentar la cantidad de H<sub>2</sub> para todas las cargas de trabajo. Este descenso de las emisiones se explica gracias al aumento de la temperatura en el interior del cilindro debido a una combustión mejor y más rápida provocada por la adición de H<sub>2</sub> [97]. En la Fig. 5.20 se puede ver como las emisiones de HC disminuyen cuando se aumenta la cantidad de H<sub>2</sub> para todas las cargas:

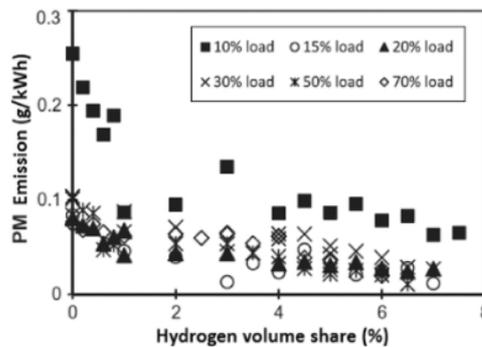


**Fig. 5.20:** Variación de las emisiones de HC con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> y las cargas de trabajo [110].

### 5.1.12 Emisiones de PM y Humos

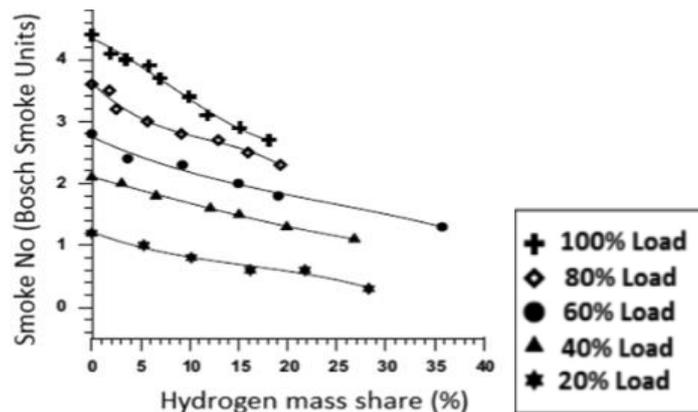
Una mezcla heterogénea de aire y combustible favorece las emisiones de PM y humos en los MCI, así como un aumento en el grado de homogeneidad en la mezcla disminuyen considerablemente las emisiones. Normalmente, estas tienen lugar en zonas de la cámara de combustión donde la cantidad de aire es insuficiente. Además, las emisiones de PM y humos aumentan significativamente si la relación aire-combustible se reduce [97].

Con la adición de H<sub>2</sub> en motores con combustión dual, las emisiones de PM disminuyen para cualquier carga de trabajo. Esto se debe al aumento del grado de homogeneidad de la mezcla aire-combustible gracias al aumento de la cantidad de H<sub>2</sub>, lo que conduce a una mejor combustión y por consiguiente a menores emisiones de PM [97,105]. Todo esto queda reflejado en la Fig. 5.21:



**Fig. 5.21:** Variación de las emisiones de PM con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> y las cargas de trabajo [97].

El humo u hollín son productos visibles de la combustión formados a raíz de un pobre proceso de ignición que se produce cuando la relación C/O supera la unidad. Esta relación crítica disminuye significativamente con la reducción de la temperatura de interior del cilindro. En motores con modo de combustión en el que el H<sub>2</sub> es la única fuente de energía, esta relación se vuelve cero por lo que no produciría emisiones de humo. Sin embargo, en motores con combustión dual estas emisiones se producen debido al combustible diésel, por lo que si disminuimos su cantidad aumentando el porcentaje de H<sub>2</sub> empleado, el resultado sería una reducción de la emisión de humo [97,105]. Todo lo anterior queda representado en la Fig. 5.22:



**Fig. 5.22:** Variación de las emisiones de humos con respecto a la cantidad de H<sub>2</sub> y las cargas de trabajo [97].

### 5.1.13 Emisiones de NO<sub>x</sub>

Los NO<sub>x</sub> generados durante la combustión están formados principalmente por óxidos nítricos (NO), siendo estos los más abundantes con una proporción en torno al 90-95%, y por dióxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), que son los más perjudiciales para la salud y se presentan en una cantidad menor, del 5-10%. La formación de los NO<sub>x</sub> depende principalmente de la temperatura que se alcance en la combustión, a mayor temperatura mayor nivel de emisiones, así como de las condiciones estequiométricas y del tiempo de residencia de la reacción [105].

Se ha concluido que un aumento en la cantidad de H<sub>2</sub> en motores de combustible dual, incrementa la formación de NO<sub>x</sub> para cualquier tipo de operación del motor. Este aumento en las emisiones se produce debido a la quema de un combustible con mayor contenido energético, lo que genera que la adición de H<sub>2</sub> provoque altas velocidades de reacción que conllevan a altas presiones y temperaturas en el cilindro. Gracias a que la combustión de H<sub>2</sub> es posible en una gran gama de relaciones aire-combustible, la ignición de una mezcla rica en aire e H<sub>2</sub> crea la situación ideal para la formación de NO<sub>x</sub> en los motores con combustible dual [100,105].

Además, para motores con velocidad variable, para una carga de trabajo y una cantidad de H<sub>2</sub> fija las emisiones de NO<sub>x</sub> son mayores a bajas que a altas velocidades del motor. Esto se debe a que a altas velocidades el tiempo de residencia de la reacción es menor, lo que contribuye a una reducción de las emisiones [97].

### 5.1.14 Tabla Resumen

En la tabla 5.2 se recoge a modo de resumen los efectos que tiene en los diferentes parámetros del motor el incremento de la cantidad de H<sub>2</sub> [97]:

<b>Tabla. 5.2:</b> Resumen de la combustión en modo dual [97].		
<b>Parámetro</b>	<b>Incremento de H<sub>2</sub> a cargas altas y medias</b>	<b>Incremento de H<sub>2</sub> a cargas bajas</b>
Rendimiento Térmico	Aumenta	Disminuye
Rendimiento Volumétrico	Disminuye	Disminuye
Duración de la Combustión	Disminuye	Aumenta
Retraso a la combustión	Variable	Variable
Presión dentro del cilindro	Aumenta	Disminuye

<b>Tabla. 5.2:</b> Resumen de la combustión en modo dual [97].		
<b>Parámetro</b>	<b>Incremento de H<sub>2</sub> a cargas altas y medias</b>	<b>Incremento de H<sub>2</sub> a cargas bajas</b>
Temperatura dentro del cilindro	Aumenta	Disminuye
Rendimiento de la combustión	Aumenta	Disminuye
Temperatura de los gases de escape	Aumenta	Aumenta
Tasa de liberación de calor	Aumenta	Disminuye
Emisiones de CO	Disminuye	Disminuye
Emisiones de CO <sub>2</sub>	Disminuye	Disminuye
Emisiones de HC	Disminuye	Disminuye
Emisiones de PM/Humo	Disminuye	Disminuye
Emisiones de NO <sub>x</sub>	Aumenta	Aumenta

## **5.2 Métodos de control de las emisiones asociadas al empleo de Hidrógeno en motores con combustión dual**

Como se ha comentado en el apartado anterior, el empleo de H<sub>2</sub> en motores con modo de combustión dual junto con el diésel trae consigo una serie de ventajas como pueden ser la mejora de la eficiencia térmica, un alto rendimiento de la combustión, una disminución de la duración de la ignición, así como una reducción significativa de las emisiones basadas en carbono (CO, CO<sub>2</sub>, HC y PM/humo). Sin embargo, los motores con combustión dual no solventan problemas que ya presentaban los MCI alimentados por diésel y además presentan nuevos desafíos a solucionar como son: el aumento considerable de las emisiones de NO<sub>x</sub>, la posible aparición de detonaciones en el motor (knocking) debido al aumento de presión en el cilindro lo que limita la participación de H<sub>2</sub> y el problema de la autoignición de la mezcla aire-H<sub>2</sub> [97].

A lo largo de este capítulo se van a presentar los principales métodos que hay actualmente para reducir los efectos negativos de la combustión dual con H<sub>2</sub>, para así poder lograr su implementación efectiva en un futuro no muy lejano. Entre ellos se encuentran:

- Recirculación de gases de escape (EGR).
- Inyección de agua.
- Variación de la RC del motor.

### 5.2.1 Recirculación de Gases de Escape

El método EGR es una técnica de pretratamiento efectiva bien establecida en la actualidad para reducir y controlar las emisiones de NOx en motores diésel [111]. Consiste en la recirculación de parte de los gases de escape generados en la combustión hacia el colector de admisión, reduciendo las emisiones de NOx gracias a tres efectos principalmente:

- **Efecto térmico**: La mezcla de gases de escape, formados en su mayor parte por CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y nitrógeno (N<sub>2</sub>), tienen un alto calor específico por lo que al mezclarlo con el aire fresco que entra en la cámara de combustión, la mezcla de admisión aumenta su calor específico lo que se traduce en una disminución de la temperatura de llama [111,112,113].
- **Efecto de dilución**: La recirculación de los gases de escape desplaza el aire fresco que entra en la cámara de combustión, lo que conlleva una menor cantidad de O<sub>2</sub> presente en la mezcla de admisión disponible para llevar a cabo la ignición. Esto provoca una reducción de la relación aire-combustible que afecta sustancialmente a las emisiones contaminantes del motor [111,112,113].
- **Efecto químico**: El vapor de agua contenido en los gases de escape es disociado durante la combustión provocando una disminución de la temperatura de llama que conlleva a su vez una reducción de las emisiones de las NOx [112,113].

Sin embargo, el uso de EGR también tiene efectos negativos, como es el hecho del incremento de PM/humos cuando se opera a medias y altas cargas. Esto causa un aumento de las deposiciones de carbono, un mayor desgaste de las piezas y materiales causadas por la abrasión de estas partículas, así como una disminución de la calidad del aceite. Por lo que se puede concluir que el uso de EGR durante un largo período de tiempo afecta considerablemente en la durabilidad del motor [111].

En cuanto a su utilización en motores de combustión dual, numerosos estudios realizados sobre el tema señalan que gracias a las características propias de la combustión del H<sub>2</sub> se consigue implementar el método EGR en tasas más altas que en motores CI actuales, permitiendo que esta tecnología sea explotada en mayor potencial. Los motores de combustión dual H<sub>2</sub>-diésel y EGR

se complementan entre sí para reducir las emisiones de NOx y PM sin incurrir en inestabilidades de la combustión, lo cual es inalcanzable para motores diésel convencionales. Además, la mejor actuación de esta técnica en combustión dual hace que no sea necesario la implementación de sistemas complejos y costosos de postratamiento de NOx [114].

Uno de los estudios realizados sobre la implementación de EGR en motores de combustión dual con H<sub>2</sub> señala que a cargas moderadas se produce una mejora en la eficiencia térmica del motor, así como una reducción de los humos de aproximadamente el 10% y una disminución de NOx de casi tres veces. Sin embargo, cuando se opera a altas cargas se obtuvo una reducción de NOx cuatro veces mayor, pero con el inconveniente del aumento de los humos. Además, se produjo el aumento de emisiones de CO a la vez que una disminución de CO<sub>2</sub>, lo que se traduce en una disminución total de las emisiones de carbono en comparación con motores diésel. También se observa un pequeño aumento de las emisiones de HC. En general, se puede concluir que con la implementación del método EGR en motores de combustión dual se produce una reducción de las emisiones de NOx con una mejora significativa del rendimiento térmico [115].

## 5.2.2 Inyección de Agua

La adición de agua en motores de combustión dual es el método más efectivo para reducir las emisiones de NOx, así como para ayudar a incrementar la cantidad de H<sub>2</sub> utilizado y evitar knocking en el motor gracias a que se enfrían las fuentes de combustión y se reduce la velocidad de la reacción química [97,116]. Esta disminución de las emisiones se produce, al igual que en el caso de EGR, debido a la reducción de temperatura en el cilindro como consecuencia del aumento del calor específico de la mezcla (efecto térmico), por una menor cantidad de O<sub>2</sub> disponible para la combustión (efecto de dilución) y por la disociación del vapor de agua que introduce radicales OH (efecto químico) [117]. Una de las ventajas de la inyección de agua con respecto al método EGR es que es capaz de reducir las emisiones de NOx para cargas bajas y altas sin un incremento significativo de las emisiones de PM y humo [118].

Actualmente existen diferentes métodos para llevar a cabo la inyección de agua [117,118,119]:

- Emulsión agua-diésel (WDE).
- Inyección de agua directa en el cilindro (DWI).
- Inyección de agua en la entrada del aire de admisión (WI).

El método WDE está definido como una emulsión de agua en el combustible diésel en presencia de aditivos y surfactantes específicos utilizados para estabilizar el sistema [106] o una emulsión mediante tecnología ultrasónica que permite la mezcla de agua con el combustible base

de manera más eficiente [117]. Se ha demostrado que el WDE reduce las emisiones de NO<sub>x</sub>, PM y humos, además de tener efectos positivos en el rendimiento del motor [119]. La reducción de NO<sub>x</sub> se debe a una disminución de la temperatura en el interior del cilindro gracias a los efectos térmicos, de dilución y químicos explicados anteriormente. Asimismo, la adición de agua al combustible mejora considerablemente la atomización de la mezcla gracias a las microexplosiones de las gotas de agua provocadas por la diferencia de volatilidad. Esta mejora en la atomización de la mezcla provoca una combustión más rápida y eficiente [117,119].

Además de las mejoras en las emisiones y en el rendimiento térmico, otra ventaja de este método sería que se puede emplear sin realizar ninguna modificación al motor [117]. Sin embargo, aunque no se necesite ninguna modificación en el propio motor sí que es necesario la implementación de sistemas de producción continua de emulsión de agua en diésel, lo que aumentaría el coste total. Otra desventaja importante es el hecho de que la cantidad de agua en la emulsión es fija y no se puede cambiar para diferentes condiciones de operación del motor, es decir, una emulsión particular de agua y diésel puede ser óptima para una condición de funcionamiento, pero puede ser ineficiente para otras circunstancias [119].

En cuanto al DWI, el agua se suministra directamente en la cámara de combustión por un inyector diferente al que inyecta el combustible, que necesita de una unidad de control para configurar el momento y el lugar correcto de adición de agua para lograr la mayor reducción de emisiones posibles [117,119]. De este modo, se permite controlar el porcentaje de agua y combustible para diferentes condiciones de operación del motor, a diferencia del método WDE. Además, debido a la inyección directa, si se suministra una gran cantidad de agua se puede mantener a niveles bajos el retraso de la combustión obteniéndose una gran reducción de NO<sub>x</sub>. Sin embargo, este método necesita añadir componentes adicionales al motor y un rediseño del sistema de suministro del combustible [118,119].

La WI es el método más fácil de suministrar agua al motor, pudiendo realizarse de dos formas distintas: inyección multipunto de agua durante el colector del aire de admisión e inyección monopunto de agua aguas arriba/abajo del turbocompresor. Ambas estrategias de WI han conseguido la misma reducción de NO<sub>x</sub> e incrementar la relación agua-combustible hasta un 50%. Las principales ventajas de este método son el aumento de la eficiencia volumétrica debido al efecto del enfriamiento del aire de entrada y una distribución de agua homogénea en la cámara de combustión. La mayoría de los estudios han concluido que al aumentar la cantidad de agua se obtiene un incremento leve de PM y un aumento significativo en las emisiones de CO y HC [118,119].

Existen numerosos estudios experimentales que emplean inyección de agua en motores de combustión dual. Estos señalan la importante reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub> con la adición de agua, la desaparición de detonaciones y un significativo aumento de la cuota de participación de H<sub>2</sub> en el motor de combustión dual. Por ejemplo, se descubrió que se podría pasar de un porcentaje de utilización de H<sub>2</sub> del 38% a un 66% si se emplea junto a la cantidad óptima de agua sin ningún tipo de problema adverso en los diferentes elementos del motor [116,120]. Además, con la adición de agua en el colector de admisión, es decir, usando el método WI, junto con el empleo de H<sub>2</sub> se consiguió aumentar la potencia de salida del motor ya que disminuye la temperatura de la mezcla que queda sin quemar [116,121].

### 5.2.3 Variación de la Relación de Compresión del Motor

Reducir la RC se realiza con el objetivo de aumentar el porcentaje de H<sub>2</sub> que se emplea en motores de combustión dual. En la literatura no existen demasiados estudios disponibles que relacionen la RC con la mejora en la cantidad empleada de H<sub>2</sub> [97]. Algunos de ellos han determinado el aumento de la cuota de energía del H<sub>2</sub> de un 19% a un 59% con una reducción de la RC de tan solo tres puntos, así como un incremento de 0,096 Kg/h a 0,138 Kg/h de H<sub>2</sub> con una disminución de 8 puntos la RC [109].

Además de aumentar la cantidad de H<sub>2</sub> que se puede utilizar en motores de combustión dual, reducir la RC trae consigo una disminución de la eficiencia térmica a causa de la reducción de la temperatura en el interior del cilindro que conlleva un menor rendimiento de la combustión [97]. Como se ha visto en el apartado anterior, la inyección de agua no solo reduce las emisiones de NO<sub>x</sub>, si no que también aumenta significativamente la participación energética del H<sub>2</sub>. Es por ello que una acción conjunta de reducción de RC y empleo de técnicas de adición de agua podrían permitir el máximo beneficio en la cantidad de H<sub>2</sub> utilizada [97]. Un estudio determinó el aumento del porcentaje de H<sub>2</sub> de un 19% a un 79% con una reducción de su RC de 3 puntos junto con un consumo de agua de 340 g/kWh [97,122].

En la tabla 5.3 se recoge a modo de resumen como varían los diferentes parámetros del motor de combustión dual operando a altas cargas al utilizar los métodos de inyección de agua y reducción de la RC [97]:

<b>Tabla. 5.3:</b> Resumen de las estrategias de inyección de agua y reducción de la RC para un motor de combustión dual [97].			
<b>Parámetro</b>	<b>Modo combustión dual convencional</b>	<b>Método de inyección de agua</b>	<b>Método de reducción de la RC</b>
Rendimiento térmico	Aumenta	Disminuye	Disminuye
Duración de la combustión	Disminuye	Aumenta	Aumenta
Retraso a la combustión	Disminuye	Aumenta	Aumenta
Presión en el cilindro	Aumenta	Disminuye	Disminuye
Temperatura en el cilindro	Aumenta	Disminuye	Disminuye
Tasa de liberación de calor	Aumenta	Disminuye	Disminuye

<b>Tabla. 5.3:</b> Resumen de las estrategias de inyección de agua y reducción de la RC para un motor de combustión dual [97].			
<b>Parámetro</b>	<b>Modo combustión dual convencional</b>	<b>Método de inyección de agua</b>	<b>Método de reducción de la RC</b>
Emisiones de CO	Disminuye	Aumenta	Aumenta
Emisiones de HC	Disminuye	Aumenta	Aumenta
Emisiones de PM/Humo	Disminuye	Aumenta	Aumenta
Emisiones de NOx	Aumenta	Disminuye	Disminuye

### **5.3 Utilización de Motores de Combustión Dual Diésel-Hidrógeno en Propulsión Marina**

Hoy en día, el mundo se encuentra en la búsqueda de soluciones para frenar las emisiones producidas por los combustibles fósiles. Los retos ambientales se centran sobre todo en el sector transporte, y en particular en el sector marítimo. La propulsión marina se lleva a cabo gracias a grandes motores diésel lentos de 2T que tienen una gran eficiencia térmica (>50%), pero a pesar de ello queman grandes cantidades de combustibles basados en carbono produciendo altos niveles de CO<sub>2</sub> [123].

Para garantizar una movilidad limpia y sostenible, es necesario el empleo de tecnologías alternativas a las convencionales, así como el uso de combustibles bajos en carbono. Como se ha reflejado durante todo el capítulo, el empleo de combustión dual usando H<sub>2</sub> como combustible principal tiene importantes mejoras en muchos aspectos del motor y en la actualidad existen numerosas técnicas para paliar sus inconvenientes. Es por ello por lo que el uso de H<sub>2</sub> en motores diésel 2T es una opción muy viable para reducir o eliminar las emisiones contaminantes y poder así cumplir con las legislaciones actuales y futuras y descarbonizar la propulsión marina [124].

# 6 DESCARBONIZACIÓN DEL SECTOR MARINO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO

---

A lo largo de este capítulo se va a presentar cómo es la situación del transporte marino en la actualidad y a lo largo de los próximos años, así como las diferentes medidas que se exigen para controlar las emisiones producidas por el mismo. También se lleva a cabo una revisión de diferentes proyectos de investigación que analizan cómo varía el comportamiento de los diferentes parámetros de los motores usados en propulsión marina, así como sus emisiones contaminantes con la adición de H<sub>2</sub> en modo dual junto con el diésel.

## 6.1 Transporte Marino en la Actualidad.

El crecimiento poblacional y económico de los últimos años se han convertido en factores importantes que han impulsado la demanda energética mundial, lo que ha conllevado a un desarrollo significativo del comercio marino internacional y a un aumento sustancial del número de buques utilizados. El transporte marítimo internacional, por lo tanto, juega un papel esencial en la economía mundial debido a que transporta casi el 90% de los bienes del mundo y mueve más de 10 mil toneladas anuales de contenedores a granel por los océanos del planeta [125].

Sin embargo, los grandes motores diésel 2T que se utilizan para la propulsión marina queman grandes cantidades de combustibles basados en carbono, que representan el 3% de las emisiones mundiales de GEI. Por otro lado, también tienen un gran impacto en la calidad del aire de las zonas próximas a la costa por las emisiones de NO<sub>x</sub> producidas, ya que casi el 70% de estas se producen dentro de los 400 Km más cercanos a las zonas costeras [126,127].

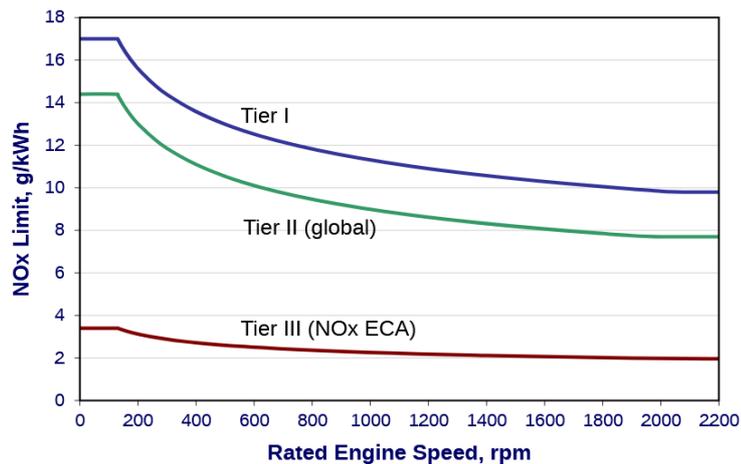
Esta situación de emisiones contaminantes del sector marino pone en peligro tratados globales en materia de emisiones como por ejemplo el Tratado de París del año 2015. El organismo encargado de promover la seguridad marítima y de implementar medidas para la regulación de GEI de los buques, es la Organización Marítima Internacional (OMI) la cual es una agencia de las Naciones Unidas formada por 174 estados miembros. En cuanto a las medidas de la OMI relativas a las emisiones producidas, estas se encuentran recogidas en el “Convenio Internacional para la prevención de la contaminación de los buques”, conocido como MARPOL 73/78. A estas medidas se las conoce comúnmente como Tier I, Tier II y Tier III. La medida Tier I, que se definió en 1997 y entró en vigor en el año 2005, se aplica para motores nuevos de más de 130 kW construidos después del año 2000. En cuanto a las normas Tier II y Tier III, estas fueron adoptadas en el año 2008 con nuevos requisitos en la calidad del combustible, así como nuevos estándares de emisiones de NO<sub>x</sub> para nuevos motores y el cumplimiento de los estándares de NO<sub>x</sub> para la Tier I para motores anteriores al 2000 [128].

En cuanto a las limitaciones en las emisiones de NO<sub>x</sub>, estas se aplican para motores marinos de CI que funcionan con combustible líquido o dual que tengan una potencia de salida superior a

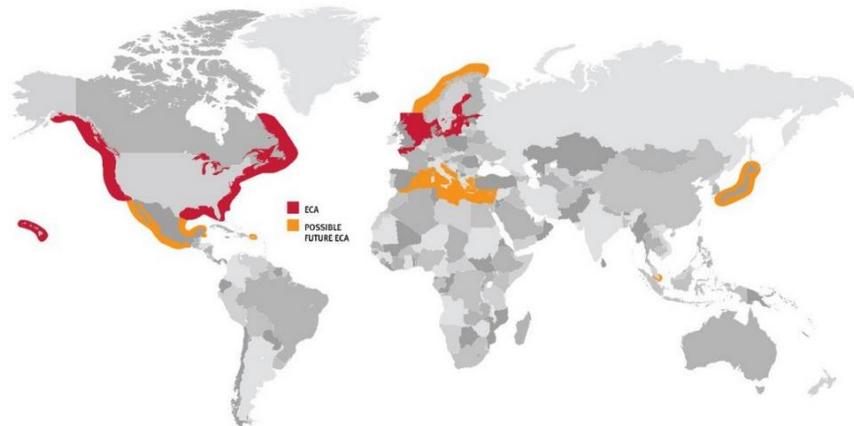
130 kW. Existen dos excepciones, aquellos motores utilizados únicamente para emergencias y aquellos motores de barcos que operan únicamente dentro del estado en el que están abanderados, siempre y cuando estos estén sujetos a una medida de control de NOx alternativa [128].

Los límites en las emisiones de NOx se establecen en función de la velocidad máxima de operación del motor (n, rpm). Estos límites se muestran en la Tabla. 6.1 y se representan gráficamente en la Fig. 6.1. Hay que recalcar que los límites Tier I y Tier II son de aplicación global mientras que los Tier III solo se aplican en Áreas de Control de Emisiones de NOx (ECA), las cuales son áreas donde se establece un control más estricto en cuanto a las emisiones contaminantes y están formadas por el Mar Báltico, Mar del Norte, Mar Mediterráneo y la mayor parte de la costa de Estados Unidos y Canadá tal y como se observa en la Fig. 6.2 [128].

<b>Tabla. 6.1:</b> Límites en las emisiones de NOx recogido en la MARPOL [128].				
<b>Tier</b>	<b>Fecha</b>	<b>Límites de NOx (g/kWh)</b>		
		<b>n &lt; 130</b>	<b>130 ≤ n &lt; 2000</b>	<b>n ≥ 2000</b>
I	2000	17,0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9,8
II	2011	14,4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7,7
III	2016	3,4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1,96



**Fig. 6.1:** Evolución de las normas Tier de la OMI referentes a las emisiones de NOx [128].

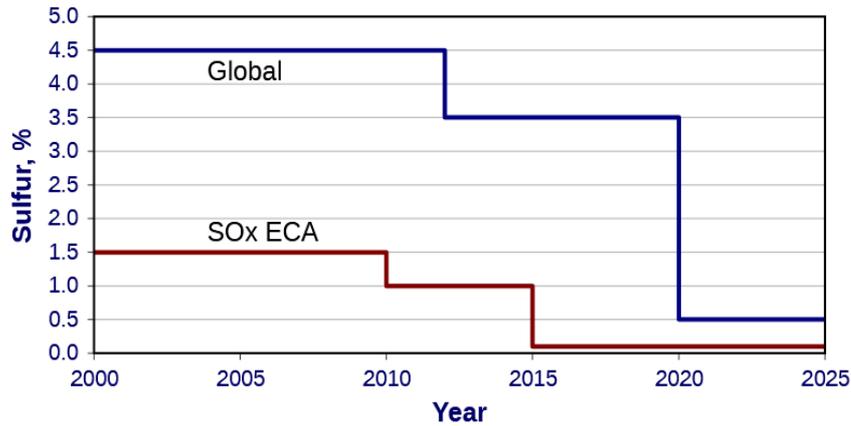


**Fig. 6.2:** Actuales y futuros posibles ECA [129].

Se estima que se cumplan los requisitos de la Tier II con la optimización del proceso de combustión en los motores, como pueden ser la presión y velocidad del combustible, el volumen de compresión del cilindro y la sincronización en las válvulas de escape. Para los estándares Tier III se requieren medidas de control de emisiones de NO<sub>x</sub> vistas anteriormente en el apartado 5, como son el método EGR, la inyección de agua y la variación de la RC del motor [128].

Para controlar las emisiones de SO<sub>x</sub> e indirectamente las emisiones de PM, hay que limitar el contenido de azufre en los combustibles usados en los motores. Estas limitaciones y fechas de implementación se recogen en la Tabla. 6.2 y se representan en la Fig. 6.3:

<b>Tabla. 6.2:</b> Límites en el contenido de azufre en los combustibles marinos recogido en la MARPOL [128].		
<b>Fecha</b>	<b>Límite de azufre en el combustible (% m/m)</b>	
	<b>ECA</b>	<b>Global</b>
2000	1,5%	4,5%
2010	1,0%	
2012		3,5%
2015	0,1%	
2020		0,5%



**Fig. 6.3:** Evolución de las normas Tier de la OMI referentes al contenido de azufre en los combustibles marinos [128].

Durante la última década, la OMI ha ido estableciendo nuevas medidas regulatorias como es la adopción en el año 2011 del Reglamento del Anexo IV de la MARPOL sobre eficiencia energética en los buques. Estas medidas, que entraron en vigor en 2013, fueron las primeras que establecieron estándares regulatorios de CO<sub>2</sub> en cualquier sector mundial, aplicándose de diferentes maneras para buques ya existentes y de nueva construcción [130,131].

Para buques ya existentes, se exigió que todos ellos cuenten con un Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP). Se trata de un plan de gestión para mejorar la eficiencia energética de los barcos a través de medios operativos como aumentar la frecuencia de limpieza del casco o la hélice, optimizar la velocidad del barco, así como elegir diferentes rutas para llegar a un destino o atravesar condiciones climáticas adversas. A través de la herramienta denominada Índice Operacional de Eficiencia Energética (EEOI) desarrollada por la OMI, los operadores de los barcos pueden evaluar el impacto potencial en el medio ambiente de cualquier cambio de gestión energética que realicen, los cuales tienen un incentivo por aumentar dicha eficiencia a fin de reducir el consumo de combustible [130,131].

En cuanto a barcos de nueva construcción, el Reglamento exige el cumplimiento del Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI), el cual adopta un enfoque gradual para establecer mejoras en cuanto a eficiencia de modo que las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyan progresivamente por debajo de una línea de referencia. Estas medidas no dictan cómo se tienen que lograr dichas mejoras, sino que deja la libertad a los constructores y diseñadores de barcos la libertad para innovar y continuar el desarrollo técnico del mismo [130,131].

Durante la primera fase, que abarcó desde enero de 2015 a diciembre de 2019, el EEDI exigió una disminución del 10% de grCO<sub>2</sub>/tonelada-milla por debajo de la línea de referencia pertinente para los buques de nueva construcción, siendo una tonelada-milla el tonelaje transportado por el barco por su distancia recorrida. En la segunda fase, que se extenderá desde enero de 2020 a diciembre de 2024, se añadirá una reducción de otros 10% de grCO<sub>2</sub>/tonelada-milla y en la tercera fase, que debía comenzar en 2025, se exigía otra reducción del 10%, lo cual hace que los buques que se construyan en 2025 deberán ser un 30% más eficientes en términos de emisiones de carbono que los construidos entre el año 2000 y 2010. Sin embargo, en 2020 se votó a favor para que la tercera fase entre en vigor a partir del año 2022 para algunos tipos de buques [130,131].

Además, en 2018 la OMI llevó a cabo la llamada Estrategia Inicial donde establecía su plan para reducir urgentemente las emisiones de GEI del transporte marino. Dicha estrategia establece los siguientes objetivos claves [132,133]:

- Reducir las emisiones de carbono del transporte marítimo internacional un 40% para el año 2030, en comparación con las emisiones de 2008.
- Reducir nuevamente las emisiones de carbono en un 50% para el año 2050, en comparación con las emisiones de 2008.
- Lograr cero emisiones contaminantes lo antes posible en este siglo.

La OMI intentará alcanzar dichos objetivos incluyendo, a las ya mencionadas medidas de eficiencia energética, nuevas medidas aplicables a corto, medio y largo plazo, las cuales están recogidas en la Tabla 6.3 [132,134,135]:

<b>Tabla. 6.3:</b> Resumen de medidas a corto, medio y largo plazo para cumplir con los objetivos de la Estrategia Inicial de la OMI [132,134,135].			
	<b>Corto plazo</b>	<b>Medio plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<b>Cronología</b>	<b>2018-2023</b>	<b>2023-2030</b>	<b>Más de 2030</b>
<b>Medidas</b>	<p>Desarrollar medidas técnicas y operativas de eficiencia energética, como SEEMP Y EEDI.</p> <p>Fomentar incentivos, políticas nacionales y actividades portuarias.</p> <p>Iniciar investigaciones sobre combustibles alternativos y tecnologías innovadoras.</p> <p>Realizar estudios adicionales de emisiones de GEI.</p>	<p>Implementar programa para la adopción efectiva de combustibles alternativos.</p> <p>Medidas operativas de eficiencia energética.</p> <p>Introducir mecanismos innovadores de reducción de emisiones.</p> <p>Mejorar la cooperación técnica desarrollando un mecanismo de retroalimentación para aprender y compartir tecnologías aprendidas.</p>	<p>Continuar con el desarrollo y suministro de combustibles alternativos.</p> <p>Fomentar y facilitar la adopción general de otros posibles mecanismos innovadores de reducción de emisiones.</p>

Uno de los puntos importantes en la agenda de la COP27 celebrada en el año 2022 fue el transporte marítimo internacional ya que se trata de un sector vital para lograr la transición energética mundial. Una de las medidas que se comprometieron a realizar fue la creación de los llamados “corredores marítimos verdes”, que se trata de rutas marinas específicas las cuales están descarbonizadas de extremo a extremo incluyendo tanto transporte terrestre como marítimo [136,137].

La puesta en marcha de estas rutas implica el uso de combustibles o energía de cero emisiones, como el H<sub>2</sub>, la instalación de infraestructura de reabastecimiento de combustible o recarga en los puertos, y el despliegue de embarcaciones con capacidad de cero emisiones para lograr un transporte marítimo más limpio con el medio ambiente en una ruta determinada [136,137].

Estar rutas marítimas de navegación internacional de cero emisiones están un paso más cerca de ser realidad cuando Reino Unido y Estados Unidos acordaron lanzar un rupo de trabajo especial del corredor, el cual consiste en reunir a expertos de la industria, fomentar la investigación y el desarrollo e impulsar otros trabajos y proyectos importantes para que estas iniciativas cobren vida lo antes posible [136,137].

Una de las propuestas que forman parte del paquete legislativo ‘‘Fit for 55’’, cuya finalidad es reducir un 55% como mínimo las emisiones de GEI en la UE para 2030 como exige el PVE, se denomina FuelUE Maritime. Esta medida tiene como objetivo aumentar la utilización de combustibles sostenibles en los buques a fin de disminuir su huella ambiental debido a que, según los últimos datos disponibles de 2018, el transporte marítimo representa un 13,5% de las emisiones del transporte en la UE [138].

El reglamento FuelUE Maritime obligará a los buques de más de 5.000 toneladas brutas, los cuales representan el 90% de CO<sub>2</sub> del sector marítimo, que hagan escala en puertos europeos a las siguientes medidas [138]:

- Reducir la intensidad en las emisiones de GEI en un 6%, 31% y 80% para los años 2030, 2040 y 2050 respectivamente.
- Conectarse a un suministro de electricidad mientras están atracadas en muelle para cubrir sus necesidades en energía eléctrica salvo si utilizan otra tecnología de emisiones cero.

Gracias a la implementación de este reglamento se podrán lograr los siguientes objetivos [166]:

- Aumento de la producción y utilización de combustibles sostenibles para el sector marítimo a precios competitivos.
- Más innovación e inversión en el transporte marino sostenible.
- Un transporte más responsable con el medio ambiente para los ciudadanos de la UE.

Aún con todas estas medidas impuestas por la OMI como por diferentes organizaciones y países, se espera que el transporte marítimo continúe creciendo en los próximos años y décadas. Esto conllevará, a pesar de las mejoras de eficiencia que se produzcan, a un aumento de las emisiones contaminantes [139]. Según el cuarto estudio de los GEI de la OMI del año 2020, empleando sólo acciones para la mejora de eficiencia de los motores de los barcos, estas emisiones pueden aumentar del orden de 50-250% para 2050 teniendo en cuenta diferentes escenarios económicos y energéticos a largo plazo [140].

## 6.2 Descarbonización del Sector Marítimo a través del Uso de Hidrógeno.

En la literatura actual existen diferentes trabajos de investigación que evalúan cómo cambian los parámetros de un motor usado en propulsión marina y sus emisiones contaminantes con la adición de H<sub>2</sub>. Estos trabajos se van a presentar según su año de publicación, de más antiguos a más actuales respectivamente:

Pan y otros. (2014), realizaron el informe llamado “Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine”, cuyo objetivo era estudiar qué efecto tenía en las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, PM y NO<sub>x</sub> la adición de H<sub>2</sub> en un motor diésel marino.

Para realizar el ensayo se utilizó un motor marino MTU/Detroit Diesel 12V-71 TI en buen estado de mantenimiento, cuyas especificaciones se resumen en la Tabla. 6.4 [141]:

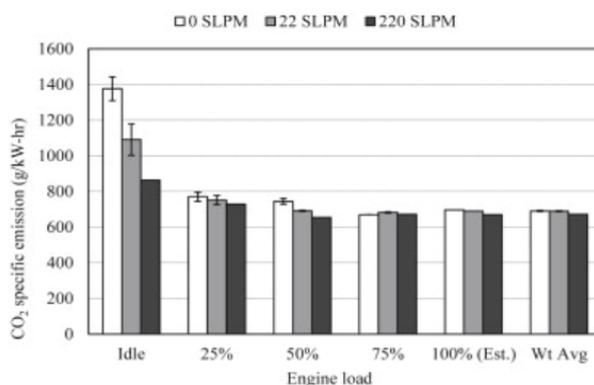
<b>Tabla. 6.4:</b> Especificaciones del motor marino empleado en el ensayo [141].	
<b>Motor</b>	12V-71 TI
<b>Descripción</b>	Turboalimentado, Intercooler
<b>Tipo de motor</b>	2T
<b>Número de cilindros</b>	12
<b>Diámetro y carrera (mm)</b>	114,3 mm x 127 mm
<b>Desplazamiento (cm<sup>3</sup>)</b>	13.961 cm <sup>3</sup>
<b>Potencia nominal de freno (kW)</b>	503
<b>Velocidad (rpm)</b>	2300
<b>Relación de compresión</b>	17 a 1
<b>Peso neto (aprox.) (Kg)</b>	2359

El motor fué probado bajo un ciclo de prueba de cuatro modos ISO 8178-4 E3 tal y como se muestra en la Tabla. 6.5, junto con una carga del 4% para representar el estado al ralentí. Cada punto de carga se probó para tres caudales de H<sub>2</sub>, los cuales fueron 0, 22 y 220 litros estándar por minuto (SLPM). Un caudal de 0 SLPM representa la condición básica del motor, un caudal de 22 SLPM ya es comparable a los productos comerciales existentes y un caudal de H<sub>2</sub> de 220 SLPM es unas diez veces superior a los niveles comerciales recomendados. Este último caudal se llevó a cabo para garantizar que se produjeran efectos medibles mientras se mantenía la composición de H<sub>2</sub> y aire por debajo del límite de inflamabilidad. Para cada una de las pruebas se utilizó diésel con un contenido ultrabajo de azufre, CARB No. 2, donde el motor estaba montado en un dinamómetro de motor con freno de agua [141].

Tabla. 6.5: Modos de prueba del ensayo [141].				
Modo	Potencia		Velocidad	
	kW	%	RPM	%
Ciclo ISO 8178-4 E3	384	100	2053	100
	288	75	1868	91
	192	50	1642	80
	96	25	1293	63
	Ralentí	15	4	657

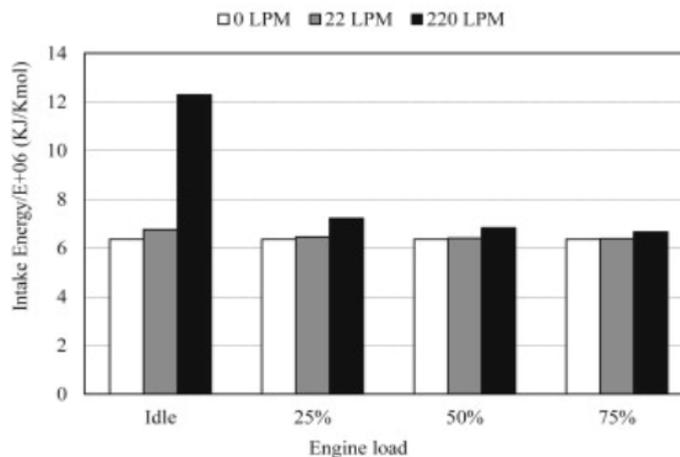
El H<sub>2</sub> se suministraba desde un paquete de seis cilindros de alta presión, cada uno a 150 bar, hasta una presión de salida de 1 bar utilizando para ello un regulador de presión de H<sub>2</sub>. A través de una válvula de control fino se ajustaban los diferentes caudales de H<sub>2</sub> empleados y este era introducido en dos puertos de inyección al motor con el objetivo de mejorar la mezcla de H<sub>2</sub> con el aire de entrada [141].

En cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, los resultados mostraron una disminución del 21% y 37% con una adición de H<sub>2</sub> de 22 y 220 SPLM cuando el motor operaba al ralentí. Al 50% de carga, se reducen en un 7% y un 12% para los mismos caudales de H<sub>2</sub> respectivamente. Con alta carga (75%), se consiguió reducir las en un 3% para un caudal de 220 SLPM de H<sub>2</sub>. Todo esto queda reflejado en la Fig. 6.4 [141]:



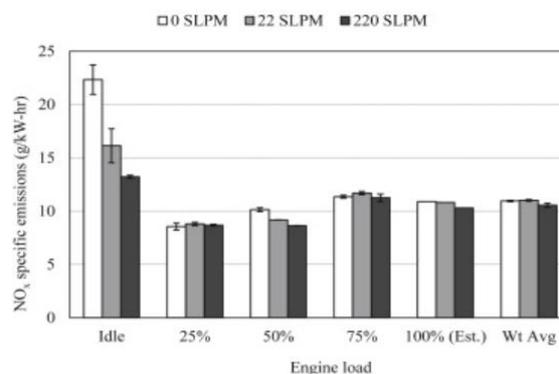
**Fig. 6.4:** Emisiones de CO<sub>2</sub> para cada carga del motor y para diferentes caudales de H<sub>2</sub> [141].

La energía total de entrada al motor se incrementa como consecuencia de suministrar H<sub>2</sub> al aire de admisión. Tal y como muestra la Fig. 6.5, los caudales de H<sub>2</sub> de 22 y 220 SLPM apenas añaden energía a la combustión para cargas superiores a 25%. Sin embargo, para una operación del motor al ralentí, la energía añadida a partir del H<sub>2</sub> se incrementó un 6% y un 93% para 22 y 220 SLPM respectivamente. Esto podría ser una explicación razonable a la disminución observada de las emisiones de CO<sub>2</sub> al ralentí ya que se puede observar como las emisiones se redujeron en un 37% a medida que la energía agregada por el H<sub>2</sub> aumentó en un 93% [141].



**Fig. 6.5:** Energía de admisión del motor con respecto a los caudales de H<sub>2</sub> introducidos [141].

Relativo a las emisiones de NO<sub>x</sub>, estas se muestran en la Fig. 6.6. Como se puede observar, en condiciones de cargar al ralentí las emisiones se redujeron en un 28% y 41% para caudales de H<sub>2</sub> de 22 y 220 SLPM y para una carga del motor del 50% disminuyeron en 10% y 15% para los mismos caudales de H<sub>2</sub>. Además, las emisiones específicas promedio se mantuvieron constantes para un caudal de 22 SLPM y se redujeron en un 4% para uno de 220 SLPM [141].

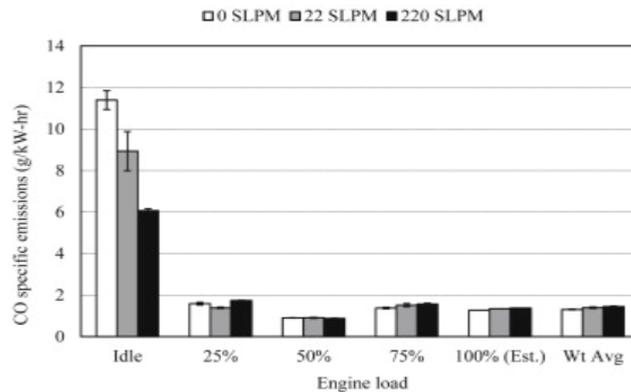


**Fig. 6.6:** Emisiones de NO<sub>x</sub> para cada carga del motor y para diferentes caudales de H<sub>2</sub> [141].

Esta disminución de en las emisiones de NO<sub>x</sub> al suministrar H<sub>2</sub> se puede explicar debido a que el motor funciona en condiciones ultrapobres ( $\phi < 0,5$ ) cuando opera al ralentí, siendo  $\phi$  el dosado relativo definido como la relación estequiométrica aire/combustible entre la relación real aire/combustible. Tal y como se explica en el artículo “The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review” [168], cuando se opera en condiciones de  $\phi < 0,5$  se produce una

combustión más completa lo que da como resultado una disminución significativa de la temperatura de combustión, y por tanto la reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub> [141].

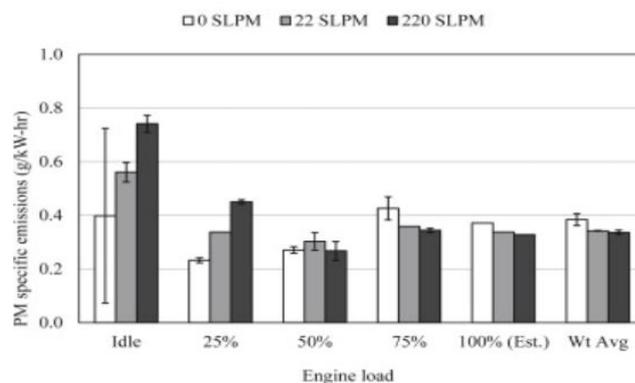
La variación de las emisiones de CO con la adición de H<sub>2</sub> se muestra en la Fig. 6.7. Con una carga del 75%, las emisiones aumentaron un 10% y un 14% con caudales de 22 y 220 SPLM de H<sub>2</sub> respectivamente. Sin embargo, al ralentí las emisiones disminuyeron un 22% y 47%, mientras que las emisiones ponderadas aumentaron un 7% y 11% para los mismos caudales de H<sub>2</sub> [141].



**Fig. 6.7:** Emisiones de CO para cada carga del motor y para diferentes caudales de H<sub>2</sub> [141].

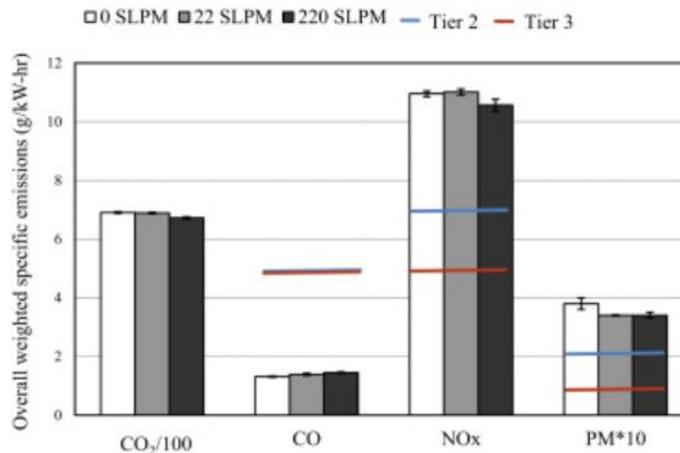
En comparación con la variación de las emisiones de NO<sub>x</sub>, las emisiones de PM muestran una tendencia opuesta tanto al ralentí como al 75% de carga, como se refleja en la Fig. 6.8. Al 75%, las PM disminuyeron un 16% y 19% cuando se suministró 22 y 220 SLPM de H<sub>2</sub> respectivamente. Mientras que al ralentí, las emisiones aumentaron un 41% y 86% para los mismos caudales de H<sub>2</sub>. Considerando que cuando el motor opera al ralentí tiene una combustión ultrapobre, se plantea la hipótesis de que el suministro de H<sub>2</sub> actuó como diluyente que redujo la temperatura de combustión y por consiguiente, aumentaron las emisiones de PM [141].

Sin embargo, las emisiones específicas medias de PM disminuyeron un 11% con el suministro de H<sub>2</sub>. Esto se debe a que las emisiones con una carga del 75% tienen más peso que al ralentí para el cálculo de las emisiones específicas ponderadas [141].



**Fig. 6.8:** Emisiones de PM para cada carga del motor y para diferentes caudales de H<sub>2</sub> [141].

En la Fig. 6.9, se resumen las emisiones medias específicas de los gases y PM junto con valores de certificación Tier I y Tier II para motores. Con caudales de H<sub>2</sub> de 22 y 220 SLPM, las emisiones ponderadas de NO<sub>x</sub> aumentaron un 1% y disminuyeron un 4%, mientras que las emisiones medias de PM se redujeron en un 11 % para ambos caudales de H<sub>2</sub> [141].



**Fig. 6.9:** Emisiones específicas ponderadas de gases y PM junto con valores de certificación Tier I y II bajo el ciclo de prueba E3 [141].

(Nota: Los estándares Tier I y II en las barras de NO<sub>x</sub> representan los NO<sub>x</sub> más los HC)

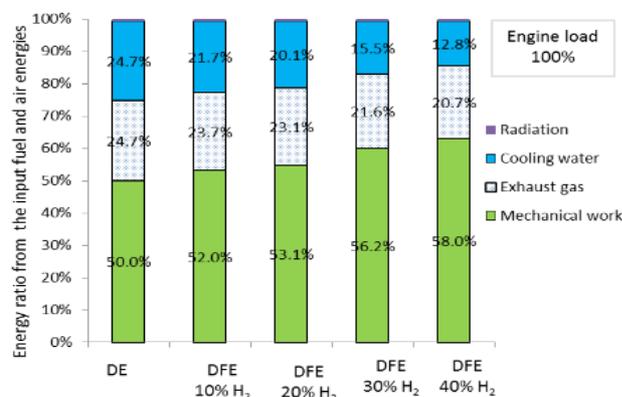
Ammar (2018), realizó un estudio para investigar el efecto que tiene la utilización de H<sub>2</sub> como combustible dual en un motor diésel marino de baja velocidad desde el punto de vista energético, exergético y ambiental, comparando las emisiones de NO<sub>x</sub> con los límites permisibles de la OMI [142].

El motor de estudio fue el Hyundai-MAN B&W 9590 ME-C 10.2 con una potencia máxima de 37.620 kW a 72 rpm y con un peso de 149.320 toneladas, el cual es el motor de propulsión principal del buque portacontenedores Al Dhail. En la Tabla. 6.6, se muestran los parámetros del motor para diferentes cargas de operación:

	9.405	18.810	22.572	28.215	32.617	33.858	37.620
<b>Potencia (kW)</b>	9.405	18.810	22.572	28.215	32.617	33.858	37.620
<b>Carga (%)</b>	25	50	60	75	86.7	90	100
<b>Velocidad (rpm)</b>	45,4	57,1	60,7	65,4	68,7	69,5	72,0
<b>Presión máx. (bar)</b>	96	129	144	163	185	186	184
<b>Consumo específico de combustible (g/kWh)</b>	189,6	175	171,7	169,2	169,2	169,5	171,5

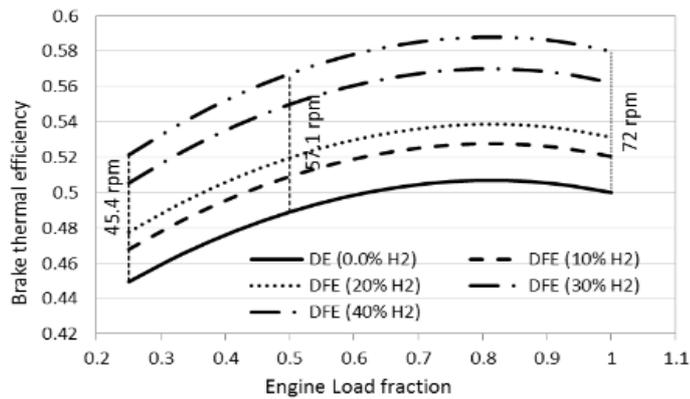
La investigación se realizó utilizando el paquete de software Engineering Equation Solver (EES) con porcentajes de sustitución de H<sub>2</sub> de 10% al 40% y con un fueloil marino con contenido en azufre ultrabajo (ULSFO). Los porcentajes solo aumentan hasta el 40% para evitar problemas de detonación con porcentajes de H<sub>2</sub> superiores al 50%. El análisis energético y exergético se llevó a cabo bajo las hipótesis de estado estacionario y condiciones de gases ideales, así como ignorando las exergías potenciales y cinéticas. En el estudio no se hace mención de cómo se está realizando el almacenamiento de H<sub>2</sub> ni como este se introduce en el motor.

En cuanto al análisis energético, en la Fig. 6.10 se muestra el balance de los diferentes flujos de energía tanto en el motor diésel como en el motor dual con porcentajes de H<sub>2</sub> variando entre el 10% y 40%, todo ello operando a máxima carga. Se puede observar como la eficiencia térmica se va incrementando con el aumento de H<sub>2</sub> empleado debido a la mejora en la combustión que se produce, de un 50% a un 58% [142].



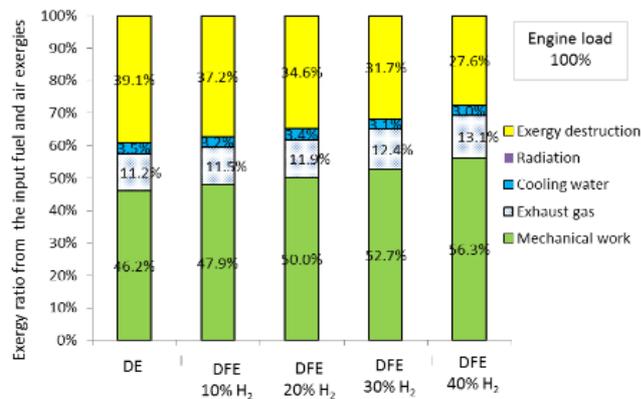
**Fig. 6.10:** Balance energético en el motor diésel y dual empleando diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [142].

En la Fig. 6.11, en cambio, se muestran los efectos del empleo de H<sub>2</sub> y la carga de operación con respecto a la eficiencia térmica del motor de combustión dual. Este rendimiento térmico aumenta con el incremento del porcentaje de H<sub>2</sub> y con cada incremento de la fracción de operación, excepto a plena carga. Esto se debe, al igual que el caso anterior, a que un aumento en la cantidad de H<sub>2</sub> utilizada mejora la energía de combustión del motor. Sin embargo, a una carga del 100% la eficiencia térmica disminuye debido al gran consumo de combustible que se produce en este modo de operación.



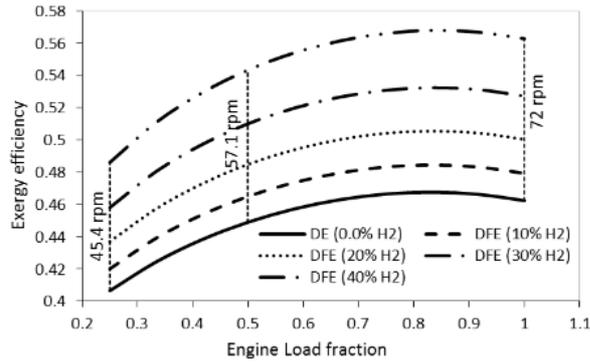
**Fig. 6.11:** Eficiencia térmica del motor dual a diferentes cargas de operación e H<sub>2</sub> empleado [142].

Realizar un análisis exergético en un motor marino ayuda a mejorar su rendimiento a través de la identificación del tipo y la magnitud de las fracciones de energía que se están perdiendo y que pueden ser utilizados por uno de los sistemas de recuperación de calor residual. En la Fig. 6.12, se muestra el balance exergético del motor de estudio operando al 100% de carga y para caudales variables de H<sub>2</sub> del 10% al 40%. La exergía destruida se debe a procesos irreversibles tales como fricción mecánica, transferencia de calor y combustiones pobres, y esta se reduce de un 39,1% para un motor diésel al 37,2%, 34,6%, 31,7% y 27,6% para el motor dual con porcentajes de H<sub>2</sub> del 10%, 20%, 30% y 40%, respectivamente.



**Fig. 6.12:** Balance exergético en el motor diésel y dual empleando diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [142].

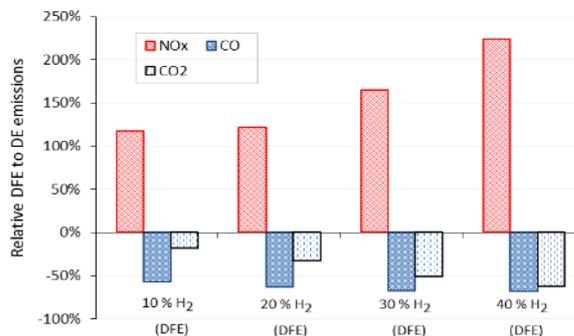
Al igual que en el caso del rendimiento energético, la eficiencia exergética también depende de la carga del motor, así como del porcentaje empleado de H<sub>2</sub>, teniendo ambos una tendencia similar, pero con valores distintos tal y como se muestra en la Fig. 6.13:



**Fig. 6.13:** Eficiencia exergética del motor dual a diferentes cargas de operación e H<sub>2</sub> empleado [142].

Se puede observar como la eficiencia exergética aumenta al incrementar la carga de operación del motor y empleando cada vez más porcentaje de H<sub>2</sub>, lo cual se debe a una mejora en el proceso de combustión. A plena carga, la eficiencia aumentó de un 46,2% a un 47,9%, 50%, 52,7% y 56,2% para el motor dual con porcentajes de adición de H<sub>2</sub> de 10%, 20%, 30% y 40%, respectivamente.

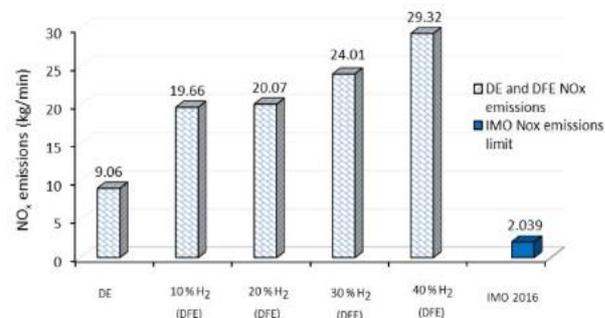
Mediante el análisis ambiental, se estudia la influencia del empleo de H<sub>2</sub> sobre los contaminantes de los gases de escape del motor. Debido al aumento del porcentaje de H<sub>2</sub> empleado en el motor dual, se produce una mejora en la eficiencia de la combustión lo que conlleva a que las emisiones tanto de CO, como de CO<sub>2</sub> disminuyan. En la Fig. 6.14, se puede ver como las emisiones de CO se reducen un 57,3%, 62,6%, 67,0%, 68,3% a la vez que las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen en 18,2%, 32,3%, 51,0% y 61,8% con porcentajes de H<sub>2</sub> del 10%, 20%, 30% y 40%, respectivamente. Por otro lado, esta mejora en la combustión va a generar una mayor temperatura dentro del cilindro y una mayor presión máxima, lo que se traduce en un aumento de las emisiones de NO<sub>x</sub> con el incremento del porcentaje de H<sub>2</sub>. En la Fig. 6.14, también puede verse como estas emisiones aumentan en un 117%, 121%, 165% y 223% para porcentajes de H<sub>2</sub> del 10%, 20%, 30% y 40%, respectivamente.



**Fig. 6.14:** Emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> del motor en modo dual comparado con el motor diésel [142].

Para poder cumplir con la Tier III de la OMI, el motor de estudio al tener una velocidad lenta de 72 rpm en su potencia máxima podría emitir como máximo 3,4 g/kWh de NO<sub>x</sub> tal y como se indicó en la anterior Tabla. 6.1, que, con un cambio en las unidades, supone unas emisiones máximas de NO<sub>x</sub> de 2,039 Kg/min. En la Fig. 6.15, se ilustra cómo tanto el motor diésel como el

motor dual utilizando los diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> tienen unas emisiones de NO<sub>x</sub> que superan con creces los límites de la Tier III de la OMI. Por ejemplo, el motor diésel y el caso dual con 10% de H<sub>2</sub> superan en un 344,3% y 864,2% respectivamente las emisiones de NO<sub>x</sub> permitidas.



**Fig. 6.15:** Efecto de los porcentajes de sustitución de H<sub>2</sub> sobre las emisiones de NO<sub>x</sub> respecto a los límites Tier III de la OMI [142].

Para reducir dichas emisiones, se pueden usar los diferentes métodos vistos en el apartado 5.2. En este estudio, se propone usa la reducción catalítica como postratamiento el cual sería capaz de reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> a 1,9 Kg/min, 2,007 Kg/min, 2,401 Kg/min y 2,932 Kg/min utilizando porcentajes de hidrógeno del 10%, 20%, 30% y 40%, respectivamente. Esto conlleva a que el motor con modo dual empleando un 10% y 20% de H<sub>2</sub> utilizando el método de reducción catalítica como método de postratamiento, sería capaz de cumplir con la normativa Tier III de la OMI relativa a emisiones de NO<sub>x</sub>, mientras que empleando un 30% y 40% no lo lograrían [142].

Radica y otros. (2020), realizaron un análisis para determinar si la adición de H<sub>2</sub> a un motor diésel marino puede reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> por debajo de 3,4 g/kWh, cumpliendo así las restricciones impuestas en la Tier III de la OMI [143].

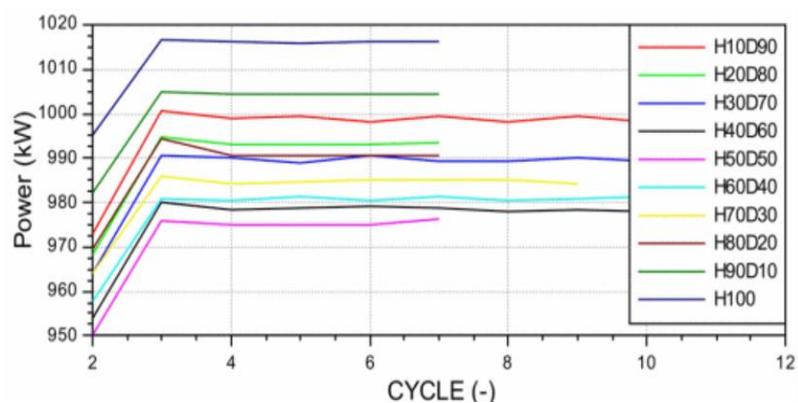
Para ello emplearon el motor diésel marino de velocidad lenta cuyos parámetros están recogidos en la Tabla. 6.7:

**Tabla. 6.7:** Especificaciones del motor marino empleado en el ensayo [143].

Descripción	Turboalimentado
Tipo de motor	Dos tiempos
Número de cilindros	6
Potencia nominal de freno (kW)	8.813
Velocidad (rpm)	103

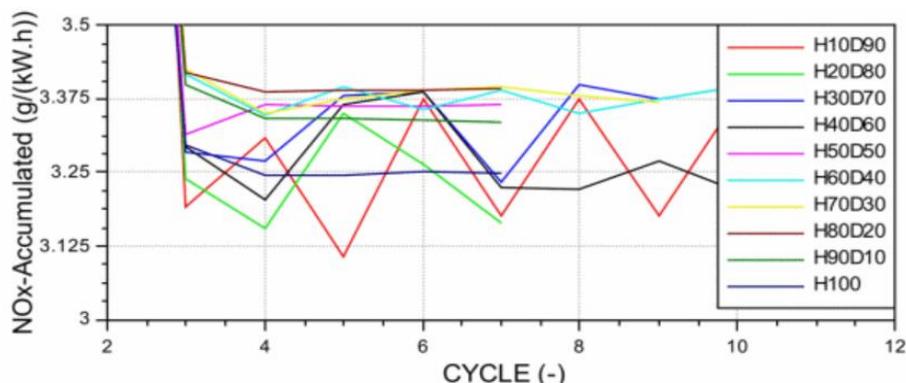
Las simulaciones se realizaron al 75% de la carga del motor, lo que se traduce en una potencia de 6.505 kW a una velocidad de 93,6 rpm y con adición de H<sub>2</sub> en diésel que van desde el 10% a un 90%, además de un el uso único de H<sub>2</sub> como combustible. Hay que recalcar que todos los resultados de esta simulación se han ajustado cambiando la cantidad de combustible usada en cada ciclo, para que de esta manera se alcancen los requisitos Tier III de la OMI en cuanto a emisiones de NO<sub>x</sub> para motores de baja velocidad.

Como se puede observar en la Fig. 6.16, la potencia por cilindro alcanzada varía de 950 kW, la cual se da para un porcentaje de H<sub>2</sub> del 50%, a 1.015 kW que se alcanza con un porcentaje de H<sub>2</sub> del 100%, lo que supone una diferencia del 4% entre la potencia alcanzada más baja y alta. El modelo de motor con diésel como combustible único alcanzaba una potencia de 1.100 Kw por cilindro al 75% de carga.



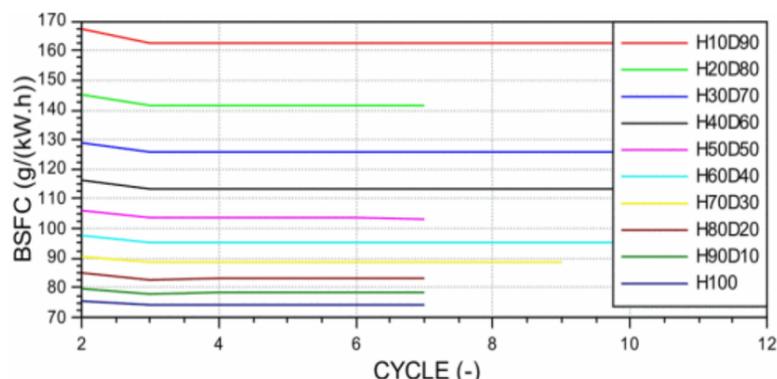
**Fig. 6.16:** Resultados de la potencia alcanzada por el motor empleando distintos combustibles con diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [143].

En la Fig. 6.17 se puede observar como todas las mezclas de combustibles están por debajo del límite máximo de emisiones de 3,4 g/kWh de NO<sub>x</sub> impuesto por la Tier III de la OMI, ya que todas ellas fueron cuidadosamente ajustadas para ello. Como era de esperar, aquel combustible que alcanza menores emisiones de NO<sub>x</sub> es el que tiene un menor porcentaje de H<sub>2</sub>, en este caso del 10%.



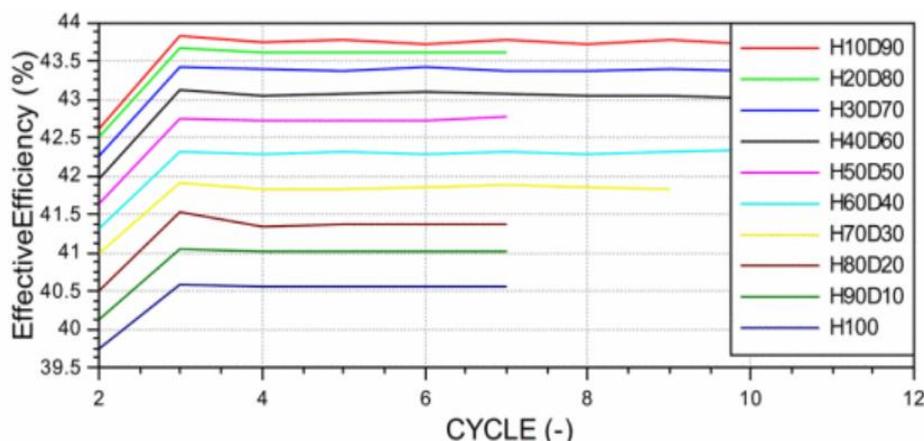
**Fig. 6.17:** Emisiones de NO<sub>x</sub> (g/kWh) empleando distintos combustibles con diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [143].

En cuanto al consumo específico de combustible, se aprecia claramente en la Fig. 6.18 que este será menor cuanto mayor es el porcentaje de H<sub>2</sub> empleado en la mezcla de combustible.



**Fig. 6.18:** Consumo específico de combustible empleando distintos combustibles con diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [143].

Relativo a la eficiencia, la Fig. 6.19 refleja claramente que para lograr emisiones de NO<sub>x</sub> permitidas en la norma, una mayor cantidad de H<sub>2</sub> en el combustible conlleva a un menor rendimiento del motor. El modelo con combustible diésel tuvo una eficiencia del 50%, mientras que aquí se muestra que para lograr las NO<sub>x</sub> permisibles empleando un 100% de H<sub>2</sub> se logra una eficiencia del 40,5%.



**Fig. 6.19:** Eficiencia del motor empleando distintos combustibles con diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> [143].

Serrano y otros. (2021), realizaron el artículo llamado ‘Prediction of hydrogen-heavy fuel combustion process with water addition in an adapted low speed two stroke diesel engine: Performance improvement’, cuyo objetivo era estudiar la viabilidad del uso de H<sub>2</sub> en motores diésel de 2T con un bajo régimen de operación para su utilización en la propulsión marina [146].

Se centra en los efectos que produce la adición de H<sub>2</sub> combinado con la inyección de agua sobre parámetros del motor de combustión dual como son la temperatura y presión en el cilindro, la eficiencia y PME todo ello bajo diversas cargas del motor y diferentes fracciones de agua e H<sub>2</sub>. A su vez, también se estudian dos métodos de suministrar el H<sub>2</sub>; por inyección durante la carrera de compresión del pistón y a través de los puertos de admisión durante la inyección de aire [146].

Para realizar este análisis, previamente se desarrolló un modelo termodinámico completo de un motor diésel 2T, validado con datos de rendimiento del motor, así como su adaptación al modo de combustión H<sub>2</sub>-diésel. Dicho modelo fue desarrollado para el motor diésel MAN B&W 10L67GBE, cuyas principales características se reflejan en la Tabla 6.8:

<b>Tabla. 6.8:</b> Especificaciones del motor utilizado en el estudio experimental [146].	
<b>Motor</b>	MAN B&W 10L67GBE
<b>Tipo</b>	Motor diésel 2T lento
<b>Diámetro y carrera (mm)</b>	670 x 1700
<b>Desplazamiento (cm<sup>3</sup>)</b>	599.361
<b>Potencia Máxima (MW)</b>	16
<b>Velocidad Nominal (rpm)</b>	125
<b>Número de cilindros</b>	10 en línea
<b>Refrigeración</b>	Enfriado hidráulicamente
<b>Combustible</b>	Fueloil pesado con azufre inferior al 1%
<b>Número de turbocompresores</b>	2

Para el análisis del modo dual se emplearon tres condiciones de carga del motor: 100%, 80% y 60% de la potencia nominal en modo diésel con unas fracciones de H<sub>2</sub> de 0,25, 0,50 y 0,80. Cabe recalcar que para cada condición de carga, la energía de la mezcla del modo dual es la misma que la correspondiente al modo diésel. Además, para cada fracción de H<sub>2</sub> se produjo una inyección de agua tal y como muestra la Tabla 6.9:

<b>Tabla. 6.9:</b> Puntos de operación seleccionados para el estudio del modo dual [146].		
<b>Potencia Nominal (%)</b>	<b>Fracción Energética H<sub>2</sub> (Fr)</b>	<b>masa de H<sub>2</sub>O/masa de H<sub>2</sub></b>
100-80-60	0	0
	0,25	0
	0,50	17,78
	0,80	32,00

En la Tabla 6.10 se muestran los resultados de los diferentes parámetros del motor, comparando el modo diésel con el modo dual H<sub>2</sub>-diésel cuando este último opera con la distribución normal de cierre de válvulas de escape (CVE) el cual es +92° después del punto muerto inferior (PMI). En ella se puede observar cómo tanto la PME, el caudal de entrada y la eficiencia del motor disminuyen a medida que se va aumentando la fracción energética de H<sub>2</sub> para las mismas condiciones de operación del motor. Además, los valores obtenidos en el modo dual son inferiores a los que se obtienen con el caso de 0% de H<sub>2</sub>.

Esto se debe a que cuando se emplea el modo dual, tal y como se observa en la Tabla 6.14, se producen fugas de H<sub>2</sub> durante el proceso de eliminación como consecuencia de mantener al mismo tiempo abierta la válvula de escape y los puertos de admisión. Esto genera una disminución en la cantidad de H<sub>2</sub> que puede quemarse, lo que conlleva a una menor potencia en el cilindro y una temperatura de gases de escape más baja, lo que proporciona menos energía en la entrada de la turbina. Todo ello implica una reducción en la velocidad del compresor y por tanto de la PME y del caudal de aire a la entrada.

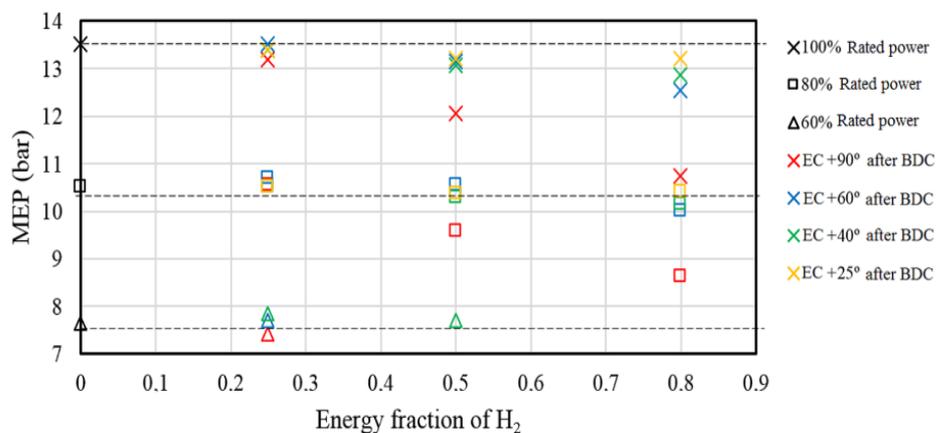
<b>Tabla. 6.10:</b> Comparación de valores obtenidos por el modelo dual con respecto al modo diésel [146].						
	<b>Fracción de H<sub>2</sub></b>	<b>Potencia nominal</b>	<b>Presión media efectiva (bar)</b>	<b>Caudal de entrada</b>	<b>Pérdidas de H<sub>2</sub></b>	<b>Eficiencia</b>
Modo Diésel	0	100%	13,51	8,70	—	49,13
		80%	10,52	7,30	—	47,83
		60%	7,64	5,72	—	46,31
Modo Dual: CVE+92° después del PMI	0,25	100%	13,17	8,68	35%	47,90
		80%	10,54	7,24	35%	47,92
		60%	7,44	5,72	32%	45,10
	0,50	100%	12,05	8,16	36%	43,82
		80%	9,59	6,70	35%	43,60

<b>Tabla. 6.10:</b> Comparación de valores obtenidos por el modelo dual con respecto al modo diésel [146].						
	0,80	100%	10,74	7,50	37%	39,06
		80%	8,65	6,12	36%	39,32

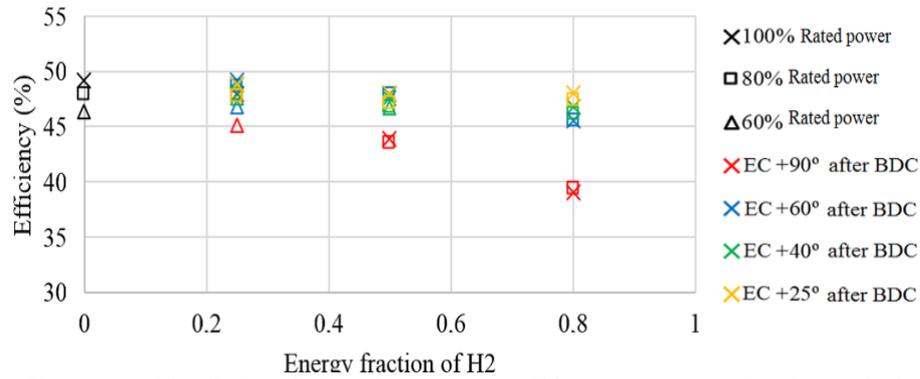
Para corregir la disminución de potencia del motor debido a la pérdida de masa de H<sub>2</sub> a través de la válvula de escape, se propusieron dos soluciones:

1. Un cierre más temprano de la válvula de escape para que se reduzca la cantidad de H<sub>2</sub> que se sale del cilindro sin quemar, debido principalmente a la reducción del tiempo que tiene el H<sub>2</sub> para fugarse. Esta solución no requiere ninguna modificación adicional con respecto al motor original y su implementación es inmediata ajustando la leva de apertura.
2. Inyectar H<sub>2</sub> cuando la válvula de escape se haya cerrado, en cuyo caso no existe posibilidad de fuga de H<sub>2</sub> con los gases de escape. Para esta modificación se requiere un inyector para introducir el H<sub>2</sub> directamente en la cámara de combustión.

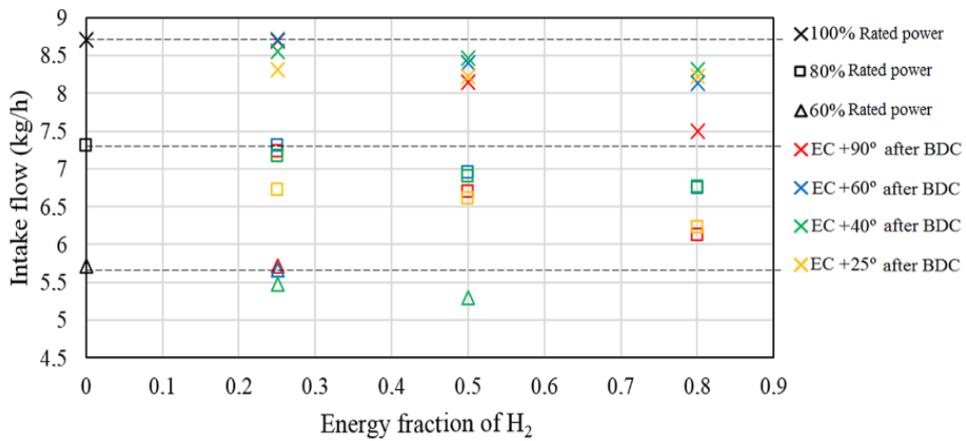
En cuanto a la primera solución, en las Fig. 6.20, Fig. 6.21 y Fig. 6.22 se muestran las variaciones de la PME, el flujo de admisión y el rendimiento del motor para diferentes ángulos de cierre de la válvula de escape. Se puede observar que un cierre más veloz de la válvula produce un aumento de la PME y de la eficiencia, cuanto mayor sea la fracción de H<sub>2</sub> más pronto será necesario cerrar la válvula de escape para mejorar el rendimiento. También se puede ver que cuanto antes se cierre la válvula de escape, mayor será la reducción de flujo másico.



**Fig. 6.20:** Comparación de la PME entre los diferentes casos de cierre de las válvulas de escape [146].



**Fig. 6.21:** Comparación de la eficiencia entre los diferentes casos de cierre de las válvulas de escape [146].



**Fig. 6.22:** Comparación del flujo másico de entrada entre los diferentes casos de cierre de las válvulas de escape [146].

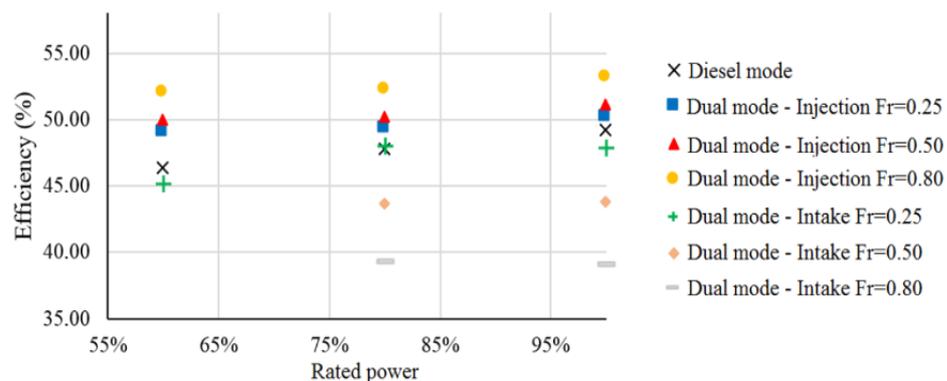
En la Tabla 6.11, se resumen los principales parámetros de salida del motor para los diferentes casos de cierre anticipado de válvulas de escape.

<b>Tabla. 6.11:</b> Comparación de valores obtenidos para los diferentes casos de cierre anticipado de válvulas de escape [146].						
	<b>Fracción de H<sub>2</sub></b>	<b>Potencia nominal</b>	<b>Presión media efectiva (bar)</b>	<b>Caudal de entrada</b>	<b>Pérdidas de H<sub>2</sub></b>	<b>Eficiencia</b>
Modo Dual: CVE+92° después del PMI	0,25	100%	13,17	8,68	35%	47,90
		80%	10,54	7,24	35%	47,92
		60%	7,44	5,72	32%	45,10

<b>Tabla. 6.11:</b> Comparación de valores obtenidos para los diferentes casos de cierre anticipado de válvulas de escape [146].						
	0,50	100%	12,05	8,16	36%	43,82
		80%	9,59	6,70	35%	43,60
	0,80	100%	10,74	7,50	37%	39,06
		80%	8,65	6,12	36%	39,32
Modo Dual: CVE+60° después del PMI	0,25	100%	13,50	8,40	22%	49,10
		80%	10,70	7,3	22%	48,64
		60%	7,72	5,67	20%	46,79
	0,50	100%	13,15	8,40	23%	47,83
		80%	10,55	6,94	22%	47,96
	0,80	100%	12,54	8,14	24%	45,61
		80%	10,02	6,74	23%	45,55
	Modo Dual: CVE+40° después del PMI	0,25	100%	13,41	8,55	15%
80%			10,53	7,16	14%	47,87
60%			7,85	5,46	13%	47,58
0,50		100%	13,09	8,46	15%	47,61
		80%	10,29	6,90	15%	46,78
0,80		100%	12,88	8,31	16%	46,84
		80%	10,17	6,76	15%	46,23
Modo Dual: CVE+25° después del		0,25	100%	13,41	8,31	10%
	80%		10,51	6,72	10%	47,78

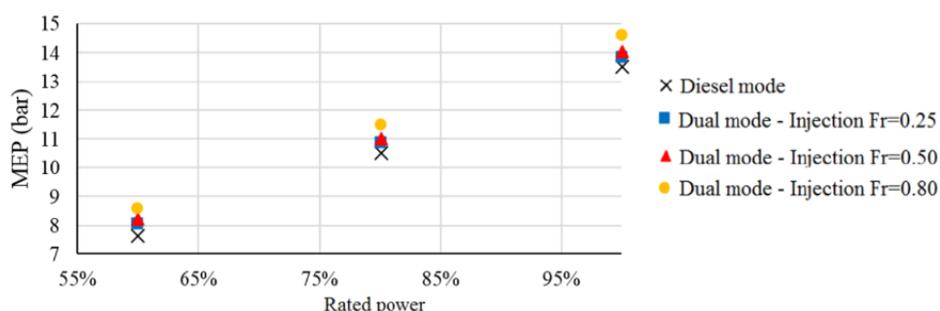
<b>Tabla. 6.11:</b> Comparación de valores obtenidos para los diferentes casos de cierre anticipado de válvulas de escape [146].						
PMI	0,50	100%	13,22	8,22	11%	48,08
		80%	10,38	6,60	10%	47,19
	0,80	100%	13,23	8,23	11%	48,12
		80%	10,42	6,23	10%	47,37

En cuanto al método de inyectar el H<sub>2</sub> una vez que se haya cerrado la válvula de escape para evitar la posibilidad de fuga en el flujo de salida, en la Fig. 6.23 se representa la eficiencia del motor para el caso de referencia, para el funcionamiento en modo dual con inyección de H<sub>2</sub> y el caso de funcionamiento en modo dual con aporte de H<sub>2</sub> con un cierre de válvulas de escape +92° después del PMI. Se puede observar que la inyección de H<sub>2</sub> tras el cierre de válvulas supone una mejora del rendimiento respecto al resto de casos. El efecto es mayor cuanto mayor es la fracción energética aportada por el H<sub>2</sub>, alcanzando los mejores resultados para una fracción de 0,80.



**Fig. 6.23:** Comparación de la eficiencia del motor para los diferentes casos [146].

La Fig. 6.24 muestra la PME para el caso de referencia y el caso de funcionamiento en modo dual con inyección directa de H<sub>2</sub>. Al igual que ocurre con el rendimiento, se produce un aumento de la PME cuanto mayor es la fracción energética de H<sub>2</sub> empleada debido a que tiene lugar una combustión más rápida que en el caso de funcionamiento solo con diésel.



**Fig. 6.24:** Comparación de la PME del motor para el caso de referencia y para inyección directa de H<sub>2</sub> [146].

En la Tabla 6.12, se comparan los valores obtenidos del motor para el caso de referencia y para el modelo de modo dual donde se evitan las fugas de H<sub>2</sub> a través de las válvulas de escape:

<b>Tabla. 6.12:</b> Comparación de valores obtenidos por el modelo de inyección directa con respecto al modo diésel [146].						
	<b>Fracción de H<sub>2</sub></b>	<b>Potencia nominal</b>	<b>Presión media efectiva (bar)</b>	<b>Caudal de entrada</b>	<b>Pérdidas de H<sub>2</sub></b>	<b>Eficiencia</b>
Modo Diésel	0	100%	13,51	8,70	—	49,13
		80%	10,52	7,30	—	47,83
		60%	7,64	5,72	—	46,31
Modo dual: Inyección de H <sub>2</sub>	0,25	100%	13,81	8,99	—	50,23
		80%	10,85	7,69	—	49,33
		60%	8,09	6,09	—	49,04
	0,50	100%	14,05	9,04	—	51,10
		80%	11,05	7,71	—	50,23
		60%	8,24	6,19	—	49,95
	0,80	100%	14,62	9,21	—	53,17
		80%	11,50	7,87	—	52,28
		60%	8,59	6,26	—	52,07

El modelo termodinámico empleado para realizar esta simulación no es capaz de proporcionar datos relativos a las emisiones de partículas y de NO<sub>x</sub>, sin embargo, a través del estudio experimental previo sobre el motor diésel y observando la disminución de la relación aire-combustible cuando se emplea la inyección de H<sub>2</sub>, se espera que estas emisiones se reduzcan a medida que se aumenta la fracción energética del H<sub>2</sub> [146].

Esto es posible gracias a que, por un lado, se reduce el aporte de combustibles fósiles disminuyendo las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y partículas, y, por otro lado, con el aporte de agua se obtienen beneficios con respecto a emisiones de NO<sub>x</sub> observados en el estudio experimental previo del motor diésel convencional [146].

Gholami y otros. (2022), estudiaron el efecto que tiene emplear diferentes porcentajes de H<sub>2</sub> en los diferentes parámetros de un motor marino de propulsión de un transportador de crudo y en las emisiones de CO<sub>2</sub> del mismo frente al motor diésel convencional.

El motor marino ensayado fue el 7RT-flex82T cuyas especificaciones quedan reflejadas en la Tabla. 6.13. La inyección de H<sub>2</sub> se produce a mitad de carrera del pistón y se emplean porcentajes de este del 1 % al 10 % del consumo total de energía en el modo diésel. Se utilizan estos porcentajes de H<sub>2</sub> para mantener la estabilidad del motor en modo dual y para evitar un aumento de NO<sub>x</sub> descontrolado [144].

<b>Tabla. 6.13:</b> Especificaciones del motor marino empleado en el ensayo [144].	
<b>Motor</b>	7RT-flex82T
<b>Descripción</b>	Turboalimentado
<b>Tipo de motor</b>	Dos tiempos
<b>Número de cilindros</b>	7 (en línea)
<b>Diámetro de los cilindros (m)</b>	0,82
<b>Carrera (m)</b>	3,375
<b>Potencia nominal de freno (kW)</b>	31.640
<b>Velocidad (rpm)</b>	80
<b>Presión media efectiva (bar)</b>	19,02

Los resultados del ensayo en cuanto a parámetros del motor y emisiones de CO<sub>2</sub> quedan resumidos en la Tabla. 6.14 con el motor operando a máxima carga:

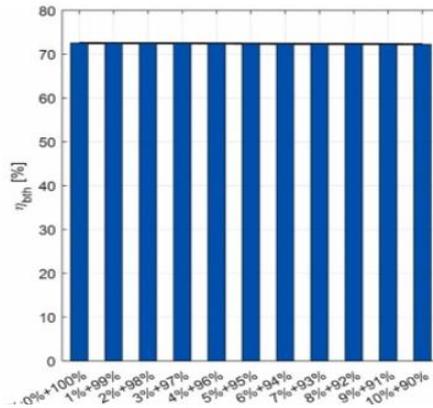
**Tabla. 6.14:** Resultados de la simulación para el modo de combustible dual H<sub>2</sub>-diésel [144].

<b>Porcentajes empleados de H<sub>2</sub> y Diésel</b>	<b>H<sub>2</sub> 0% + DF 100%</b>	<b>H<sub>2</sub> 1% + DF 99%</b>	<b>H<sub>2</sub> 2% + DF 98%</b>	<b>H<sub>2</sub> 3% + DF 97%</b>	<b>H<sub>2</sub> 4% + DF 96%</b>	<b>H<sub>2</sub> 5% + DF 95%</b>
<b>Rendimiento Térmico (%)</b>	72,54	72,51	72,48	72,46	72,43	72,40
<b>Rendimiento Volumétrico (%)</b>	146,66	102,55	102,56	102,56	102,57	102,57
<b>Caudal de H<sub>2</sub> (Kg/s)</b>	0	0,0036	0,0073	0,0109	0,0145	0,0182
<b>Caudal de Diésel (Kg/s)</b>	0,9827	0,9729	0,9631	0,9533	0,9434	0,9336
<b>Consumo específico de combustible (Kg/kWh)</b>	0,1161	0,1154	0,1147	0,1139	0,1132	0,1125
<b>Producción CO<sub>2</sub> (Toneladas/día)</b>	272,21	269,49	266,77	264,06	261,62	258,61
<b>Reducción CO<sub>2</sub> (Toneladas/día)</b>	0	2,71	5,43	8,14	10,88	13,60
<b>Reducción CO<sub>2</sub> (%)</b>	0	0,99	1,99	2,99	3,99	4,99

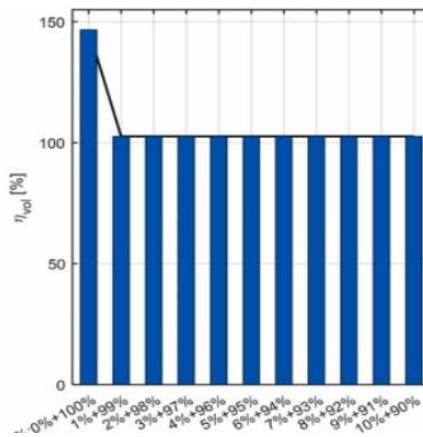
**Tabla. 6.14:** Resultados de la simulación para el modo de combustible dual H<sub>2</sub>-diésel [144].

<b>Porcentajes empleados de H<sub>2</sub> y Diésel</b>	<b>H<sub>2</sub> 6% + DF 94%</b>	<b>H<sub>2</sub> 7% + DF 93%</b>	<b>H<sub>2</sub> 8% + DF 92%</b>	<b>H<sub>2</sub> 9% + DF 91%</b>	<b>H<sub>2</sub> 10% + DF 90%</b>
<b>Rendimiento Térmico (%)</b>	72,37	72,34	72,32	72,29	72,26
<b>Rendimiento Volumétrico (%)</b>	102,58	102,59	102,59	102,60	102,60
<b>Caudal de H<sub>2</sub> (Kg/s)</b>	0,0218	0,0255	0,0291	0,0327	0,0364
<b>Caudal de Diésel (Kg/s)</b>	0,9238	0,9140	0,9041	0,8943	0,8845
<b>Consumo específico de combustible (Kg/kWh)</b>	0,1117	0,1110	0,1103	0,1095	0,1088
<b>Producción CO<sub>2</sub> (Toneladas/día)</b>	255,89	253,18	250,43	247,72	250,01
<b>Reducción CO<sub>2</sub> (Toneladas/día)</b>	16,32	19,03	21,77	24,49	27,20
<b>Reducción CO<sub>2</sub> (%)</b>	5,99	6,99	7,99	8,99	9,99

Como se puede ver en la Tabla. 6.14 y en las Fig. 6.25 y 6.26, al incrementar el porcentaje de H<sub>2</sub> usado, no se observan cambios significativos en la eficiencia térmica ni en la eficiencia volumétrica del motor. Sin embargo, mientras que el valor del rendimiento térmico del motor en modo diésel es prácticamente idéntico a cuando se emplea modo dual, la eficiencia volumétrica en el modo convencional es bastante superior al modo H<sub>2</sub>/diésel en todas las combinaciones. Esto puede ser causado por la reducción de aire que entra en la cámara de combustión debido a la inyección de H<sub>2</sub>.

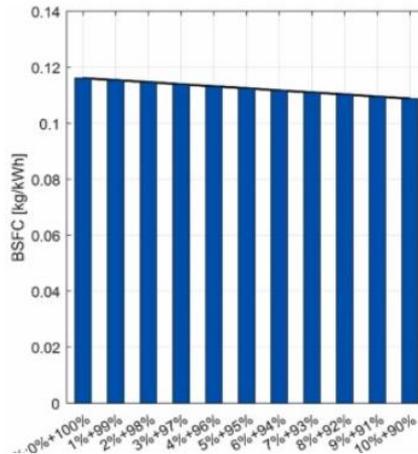


**Fig. 6.25:** Eficiencia térmica del motor para diferentes configuraciones de H<sub>2</sub> inyectado [144].



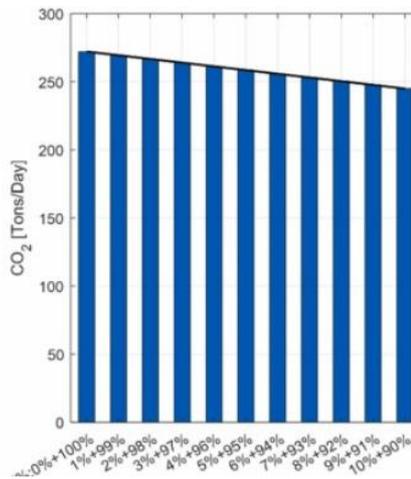
**Fig. 6.26:** Eficiencia volumétrica para diferentes configuraciones de H<sub>2</sub> inyectado [144].

En cuanto al consumo específico de combustible, que puede observarse en la Tabla 6.9 y en la Fig. 6.27, a medida que se aumenta la cantidad de H<sub>2</sub> en el motor, este va disminuyendo como era de esperar debido a que cada vez se emplea una menor cantidad de diésel.

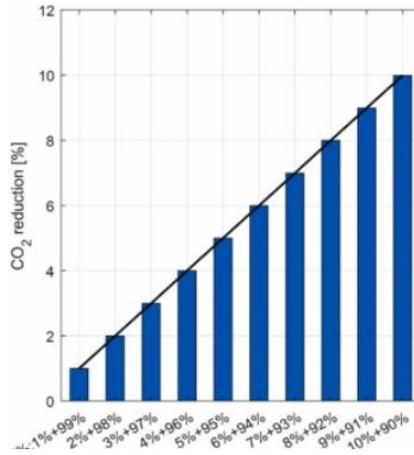


**Fig. 6.27:** Consumo específico de combustible del motor para diferentes configuraciones de H<sub>2</sub> inyectado [144].

Como se explicó en el punto anterior, las emisiones de CO<sub>2</sub> del motor en modo dual provienen únicamente de la combustión del combustible diésel, por lo que al aumentar la cantidad de H<sub>2</sub> se van reduciendo las emisiones de este. Todo esto se refleja tanto en la Tabla 6.9 y en las Fig. 6.28 y 6.29. Por ejemplo, si se emplea un 10% de H<sub>2</sub> se conseguiría una reducción de unas 27 toneladas al día de CO<sub>2</sub> lo que supondría una reducción de casi el 10% de las emisiones que si se emplea el modo diésel convencional.



**Fig. 6.28:** Emisiones de CO<sub>2</sub> del motor en toneladas/día para diferentes configuraciones de H<sub>2</sub> inyectado [144].



**Fig. 6.29:** Reducción de CO<sub>2</sub> del motor para diferentes configuraciones de H<sub>2</sub> inyectado [144].

Mallouppas y otros. (2022), realizaron un estudio experimental con el objetivo de determinar cuáles son las cantidades necesarias de H<sub>2</sub> que logran una reducción sustancial de las emisiones contaminantes en un motor auxiliar marino de servicio pesado. Este estudio se trata de una fase previa del proyecto HYMAR, el cual pretende probar la utilización de una unidad de producción de H<sub>2</sub> para su uso a bordo de los buques [145].

Todas las pruebas se han realizado sobre un motor auxiliar marino denominado Deutz A12L 714 con una potencia a plena carga de 112 kW, cuyas especificaciones restantes se muestran en la Tabla. 6.15. El diésel empleado se trata de un combustible puro sin azufre y apto para altas temperaturas. Por otro lado, el H<sub>2</sub> se almacenaba en un cilindro a una presión de 200 bar equipado con un equipo de retroceso de llama y el punto donde se agregó al aire de entrada fue dentro del colector de admisión, justo después de los filtros de aire [145].

<b>Tabla. 6.15:</b> Especificaciones del motor utilizado en el estudio experimental [145].	
<b>Motor</b>	Deutz A12L 714-Diesel Engine
<b>Año</b>	1966
<b>Diámetro y carrera (mm)</b>	120 x 140
<b>Desplazamiento (cm<sup>3</sup>)</b>	19.000
<b>Relación de compresión</b>	19,2 a 1
<b>Descripción</b>	Aspiración natural, Intercooler, sin EGR
<b>Número de cilindros</b>	12
<b>Potencia nominal (kW)</b>	112
<b>Velocidad (rpm)</b>	1.800

Aunque la potencia máxima del motor es de 112 kW, todas las pruebas se realizaron a una carga del motor del 20% lo que supone una potencia de salida de 24,25 kW. Esto es debido al estado del motor combinado con su antigüedad y ya que a bajas cargas se espera que el efecto del H<sub>2</sub> en la corriente de alimentación sea más significativo. Se emplearon cuatro caudales de H<sub>2</sub> en condiciones estándar, los cuales fueron 5,2 SLPM, 21,2 SLPM, 48,5 SLPM y 77,1 SLPM.

Los resultados preliminares en cuanto a las emisiones contaminantes del motor para cada caudal inyectado de H<sub>2</sub> y para el modo de operación de referencia utilizando sólo combustible diésel se muestra en la Tabla 6.16:

**Tabla. 6.16:** Resultados de la simulación para el modo de combustible dual H<sub>2</sub>-diésel [145].

<b>Parámetros</b>	<b>0 SPLM H<sub>2</sub></b>	<b>5,2 SLPM H<sub>2</sub></b>	<b>21,2 SLPM H<sub>2</sub></b>	<b>48,5 SLPM H<sub>2</sub></b>	<b>77,1 SLPM H<sub>2</sub></b>
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	3,3	3,3	3,2	3,2	3,2
<b>UHC (ppm)</b>	54,7	53,5	51,3	45,9	43,1
<b>NO (ppm)</b>	271	264	253	211	188
<b>Humo (opacidad)</b>	4,5	4,4	4,5	5,1	5,6
<b>H<sub>2</sub> en caudal volumétrico (%)</b>	0	0,113	0,442	1,055	1,681
<b>Aporte energético de H<sub>2</sub> (%)</b>	0	0,62	2,57	5,70	7,77
<b>Fenómenos Knock</b>	No	No	No	No	No

Se puede observar como una mayor cantidad de H<sub>2</sub> condujo a una reducción de UHC y a una ligera disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> para caudales de H<sub>2</sub> superiores a 20 SLPM. Esto se debe, en el caso de los UHC, por una mejor combustión y más rápida provocada por la adición de H<sub>2</sub> que hace que aumente la temperatura en el interior del cilindro y en el caso del CO<sub>2</sub>, la reducción se produce ya que disminuyen los átomos de carbono a medida que se aumenta la cantidad de H<sub>2</sub> utilizada.

También se puede ver una disminución significativa en la concentración de NO, aunque se espera que aumente la concentración total de NO<sub>x</sub>. Según muchos estudios, la temperatura en el interior del cilindro y la velocidad de llama deberían haber aumentado con la adición de H<sub>2</sub>, y por lo tanto las emisiones de NO deberían haber aumentado. Sin embargo, en este estudio se observa todo lo contrario a pesar de que no se empleó ningún sistema de reducción de NO<sub>x</sub> como EGR. Esto podría atribuirse a la pequeña cantidad de H<sub>2</sub> empleada en combinación con las condiciones operativas de baja carga del motor, que hacen que no aumente significativamente la temperatura de combustión que favorece la formación de NO.

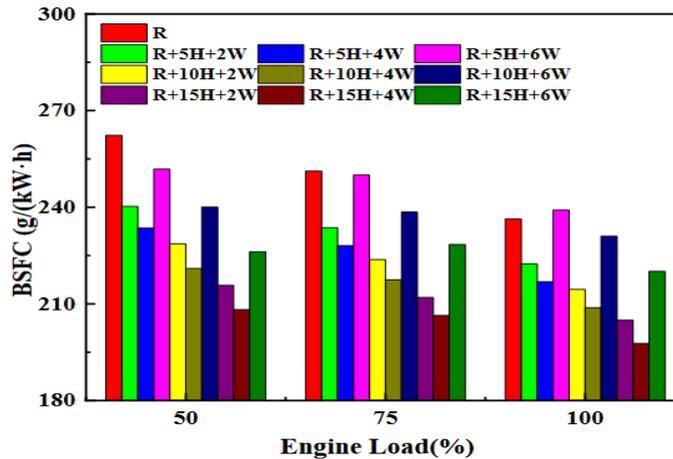
En cuanto a la producción de humo u hollín, esta aumentó con el incremento del caudal de H<sub>2</sub>. Puede explicarse a que se necesite una mayor cantidad de H<sub>2</sub> para afectar de forma significativa en la relación %, y, por tanto, disminuir la formación de hollín.

Tan y otros. (2023), realizaron una investigación cuyo propósito era determinar las mejores características de rendimiento, combustión y emisiones de un motor empleado en propulsión marina alimentado con biodiésel, en concreto el éster metílico de colza (RME), H<sub>2</sub> y agua [147].

Dicho experimento se llevó a cabo en el motor diésel marino 4190ZLC-2, cuyas principales características se recogen en la Tabla 6.17. Se empleó una carga del motor de un 25%, 50% y 100% de la potencia nominal, unas fracciones energéticas de H<sub>2</sub> de 5%, 10% y 15%, y fracciones en peso de agua de 2%, 4% y 6% [147].

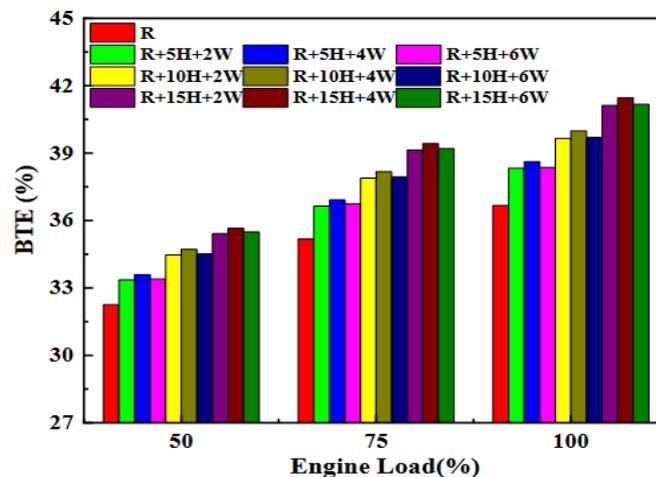
<b>Tabla. 6.17:</b> Especificaciones del motor marino empleado en el ensayo [147].	
<b>Motor</b>	4190ZLC-2
<b>Descripción</b>	Turboalimentado
<b>Tipo de motor</b>	Cuatro tiempos
<b>Número de cilindros</b>	Cuatro (en línea)
<b>Diámetro de los cilindros (mm)</b>	190
<b>Carrera (mm)</b>	210
<b>Potencia nominal de freno (kW)</b>	300
<b>Velocidad (rpm)</b>	1000
<b>Relación de Compresión</b>	14

En la Fig. 6.30, se puede observar cómo varía el consumo específico de combustible para diferentes cargas del motor y para diferentes porcentajes de combustibles mezclados. Este disminuye con el aumento de carga y con la fracción energética de H<sub>2</sub> ya que se produce una combustión más completa, alcanzando un mínimo de 197,75 g/kWh para unas mezclas de combustibles de R+15H+4W y para una carga del 100%. Sin embargo, el consumo específico de combustible fluctúa dependiendo del porcentaje de agua, disminuyendo con un 4% de agua y aumentando con un 6% [147].



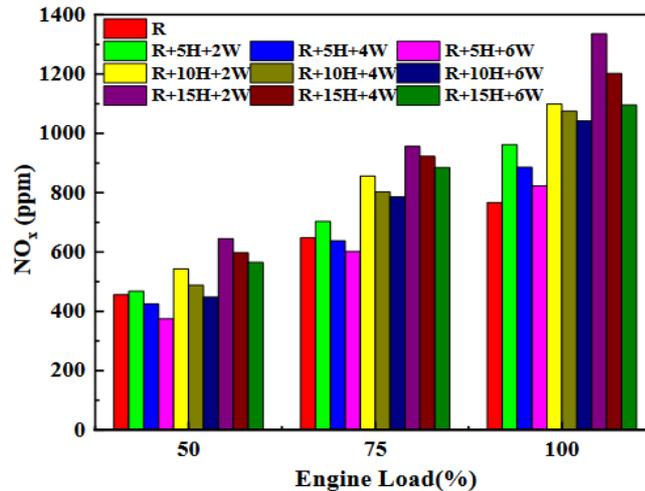
**Fig. 6.30:** Consumo específico de combustible para diferentes cargas del motor y diferentes mezclas de combustible [147].

Con respecto a la eficiencia del motor, esta aumenta con el incremento de carga y con el porcentaje de H<sub>2</sub> empleado debido a que se produce una alta velocidad de la llama que contribuye a una combustión completa del combustible. Al 100% de carga y para una mezcla de combustibles de R+15H+4W, se alcanza un máximo en el rendimiento del motor de 41,46%. En cuanto a la adición de agua, esta da como resultado un ligero aumento de la eficiencia debido, como en el caso anterior, a una mejora en la combustión dentro del cilindro [147]. Todo ello queda reflejado en la Fig. 6.31:



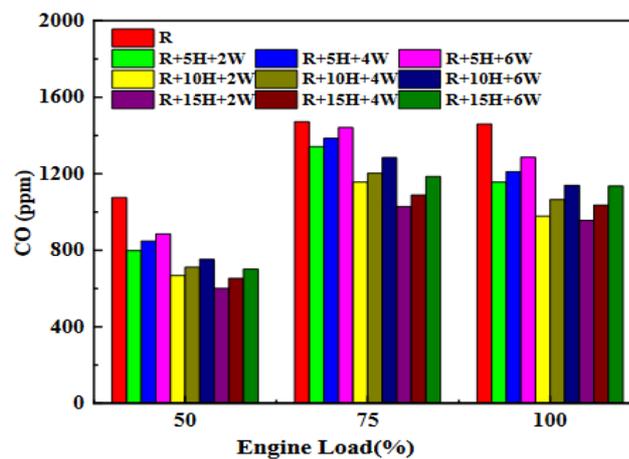
**Fig. 6.31:** Rendimiento para diferentes cargas y diferentes mezclas de combustible [147].

Relativo a las emisiones de NO<sub>x</sub>, estas se muestran en la Fig. 6.32. Se puede ver como un aumento de la carga del motor como de la fracción energética de H<sub>2</sub> conducen a una mayor emisión de NO<sub>x</sub>, debido a que se produce un aumento en la temperatura del cilindro, alcanzando un máximo de 1336 ppm para un 100% de carga y una distribución de mezcla de R+15H+2W. Sin embargo, con el aumento de adición de agua se reducen las emisiones de NO<sub>x</sub> ya que se reduce la temperatura en la cámara de combustión. En concreto, las emisiones disminuyen para R+15H+6W un 21,90% con respecto a R+15H+2W, todo ello para un 100% de carga del motor [147].



**Fig. 6.32:** Emisiones de NOx para diferentes cargas del motor y diferentes mezclas de combustible [147].

Las emisiones de CO para diferentes mezclas de combustibles y cargas del motor se muestran en la Fig. 6.33. Se puede observar como un aumento de la carga y de la cantidad de agua empleada provoca un incremento en las emisiones de CO. Sin embargo, la adición de H<sub>2</sub> reduce significativamente las emisiones de CO principalmente debido a que el contenido de carbono del combustible se reduce cuando aumenta la fracción energética del H<sub>2</sub>. Por ejemplo, al 100% de carga y en comparación con el componente RME puro, las emisiones de CO de R+5H+2W, R+10H+2W y R+15H+2W se reducen en un 20,82%, 33,01% y 34,93% respectivamente [147].



**Fig. 6.33:** Emisiones de CO para diferentes cargas del motor y diferentes mezclas de combustible [147].

La solución ideal de este artículo es agregar agua e H<sub>2</sub> al biodiésel para obtener un mayor rendimiento y un menor consumo específico de combustible, así como menores emisiones de NOx y CO. Por lo tanto, se determina gracias a una optimización multiobjetivo que la solución óptima para los parámetros de entrada al motor son un 74,69% de carga, un 15% de fracción energética de H<sub>2</sub> y un 2,5% de adición de agua [147]. Los resultados del rendimiento, consumo específico,

NOx y CO en base a los parámetros óptimos de entrada se reflejan en la Tabla 6.18:

<b>Tabla. 6.18:</b> Resultados óptimos de parámetros del motor [147].	
<b>Consumo específico (g/kWh)</b>	208,31
<b>Rendimiento (%)</b>	39,22
<b>Emisiones de NO<sub>x</sub> (ppm)</b>	941,21
<b>Emisiones de CO (ppm)</b>	1073,4

En la Tabla 6.19, se puede observar un resumen de la potencia y condiciones de operación del motor ensayado, de la forma de inyección y almacenamiento de H<sub>2</sub>, así como las principales conclusiones de los trabajos de investigación que evalúan cómo cambian los parámetros de un motor usado en propulsión marina y sus emisiones contaminantes con la adición de H<sub>2</sub>.

**Tabla. 6.19:** Resumen de los trabajos de investigación.

Referencia	Potencia nominal máxima	Forma de inyección y almacenado de H <sub>2</sub>	Condiciones de operación del motor	Conclusiones principales
[141]	503 kW a 2300 rpm	<p>En el colector de admisión para mejorar la mezcla con el aire de entrada.</p> <p>En 6 cilindros de alta presión, cada uno a 150 bar, hasta una presión de salida de 1 bar.</p>	<p>Cinco modos de carga: 100%, 75%, 50%, 25% y al ralentí (4%).</p> <p>Cada punto de carga se probó para tres caudales de H<sub>2</sub>: 0, 22 y 220 SLPM.</p>	<p>Para una operación del motor al ralentí, la adición de H<sub>2</sub> de 22 y 220 SLPM produjo unas reducciones significativas en las emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, sin embargo, las PM se vieron incrementadas.</p> <p>Para operaciones del motor de alta carga, no se producen reducciones tan importantes en las emisiones como en el caso al ralentí debido a que el combustible diésel se convierte en la principal fuente de energía. Aun así, se produjeron disminuciones para un caudal de H<sub>2</sub> de 220 SLPM en las emisiones ponderadas de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PM mientras que las emisiones medias de CO aumentaron.</p>
[142]	37 MW a 72 rpm	No se especifica.	<p>Varios modos de carga del motor que van desde el 25% hasta el 100% con porcentajes de sustitución de H<sub>2</sub> del 10%, 20%, 30% y 40%.</p>	<p>Los parámetros energéticos y exergéticos están influenciados por la carga del motor y el porcentaje de sustitución de H<sub>2</sub>. Tanto el rendimiento energético como exergético aumentan con la carga del motor y con el incremento del uso de H<sub>2</sub> en comparación con el motor diésel.</p> <p>Desde el punto de vista medioambiental, las emisiones de CO y CO<sub>2</sub> se reducen y las emisiones de NO<sub>x</sub> aumentan a medida que se incrementa el contenido de energía del H<sub>2</sub>.</p> <p>El motor de combustible dual con porcentajes de H<sub>2</sub> del 10% y 20% cumplirá con la normativa Tier III de la OMI en cuanto a emisiones de NO<sub>x</sub> después de utilizar el sistema de reducción catalítica selectiva.</p>

**Tabla. 6.19:** Resumen de los trabajos de investigación.

[143]	9 MW a 103 rpm.	No se especifica.	Un único modo de carga, 75% (6.505 kW), y con adición de H <sub>2</sub> que va desde el 10% a un 90%, además de un el uso único de H <sub>2</sub> como combustible.	La utilización de H <sub>2</sub> como combustible dual junto con el diésel se puede emplear para lograr unas emisiones de NO <sub>x</sub> que permitan cumplir la normativa Tier III de la OMI. Sin embargo, esto se lograría a costa de disminuir el rendimiento del motor a medida que se aumenta la cantidad de H <sub>2</sub> .
-------	-----------------	-------------------	---	---

**Tabla. 6.19:** Resumen de los trabajos de investigación.

[144]	31 MW a 80 rpm	A mitad de carrera del pistón.  No se especifica cómo se almacena.	Porcentajes de H <sub>2</sub> del 1% al 10% para una carga del motor al 100%.	El uso de H <sub>2</sub> como combustible dual en un motor de 2T lento puede lograr el mismo rendimiento térmico que empleando únicamente diésel, pero el principal efecto es que reduce significativamente las emisiones de CO <sub>2</sub> a medida que se agrega más cantidad de H <sub>2</sub> al motor.  Por otra parte, el rendimiento volumétrico disminuye para todos los porcentajes añadidos de H <sub>2</sub> con respecto al modo diésel.
[145]	112 kW a 1.800 rpm	En el colector de admisión, justo después de los filtros de aire.  En un cilindro a una presión de 200 bar equipado con un equipo de retroceso de llama	Un único modo de operación: 20% (24,25 kW).  Se probó para cuatro caudales de H <sub>2</sub> : 5,2 SLPM, 21,2 SLPM, 48,5 SLPM y 77,1 SLPM.	A medida que se aumenta el caudal de H <sub>2</sub> empleado se observa una disminución de UHC y una ligera disminución de las emisiones de CO <sub>2</sub> para caudales de H <sub>2</sub> superiores a 20 SLPM. También se puede ver una disminución significativa en la concentración de NO, aunque se espera que aumente la concentración total de NO <sub>x</sub> . En cuanto a la producción de humo u hollín, esta aumentó con el incremento del caudal de H <sub>2</sub> .

**Tabla. 6.19:** Resumen de los trabajos de investigación.

<p>[146]</p>	<p>16 MW a 125 rpm</p>	<p>Dos métodos: a través de los puertos de admisión durante la inducción de aire y por inyección cuando la válvula de escape está completamente cerrada.</p> <p>No se especifica cómo se almacena.</p>	<p>Tres modos de carga: 100%, 80% y 60%.</p> <p>Cada punto de carga se probó para tres fracciones energéticas de H<sub>2</sub>: 0,25, 0,50 y 0,80.</p> <p>El H<sub>2</sub> se combina con la inyección de agua.</p>	<p>El uso de H<sub>2</sub> como combustible dual combinado con la inyección de agua en motores diésel lentos de 2T es factible, por lo que puede considerarse un buen candidato como combustible verde utilizado en propulsión marina.</p> <p>Debido a las características de este tipo de motores se necesita realizar dos estrategias para mejorar el rendimiento del mismo: un cierre más temprano de la válvula de escape o inyectar el H<sub>2</sub> cuando la válvula esté completamente cerrada.</p> <p>En el caso de suministrar el H<sub>2</sub> junto con el aire de admisión, es necesario adelantar el cierre de la válvula de escape, siendo el mejor resultado una PME de 13,41 bar y una eficiencia del 49% al 100% de la potencia nominal.</p> <p>La inyección de H<sub>2</sub> puede mejorar la alta eficiencia de un motor diésel de 2T, alcanzando más del 53%. Esto sugiere que es una alternativa factible a la FC y otras tecnologías menos contaminantes que aún están lejos de ser competitivas.</p> <p>El cambio al modo dual de combustión con inyección de H<sub>2</sub> reducirá las emisiones de CO<sub>2</sub> en aproximadamente 0,79 tonelada/MWh a máxima potencia, lo que se traduce en aproximadamente una reducción de 70 tonelada/año de CO<sub>2</sub> para un uso medio típico del motor empleado en esta simulación.</p>
--------------	------------------------	--	---	--

**Tabla. 6.19:** Resumen de los trabajos de investigación.

[147]	300 kW a 1000 rpm	En el colector de admisión para mejorar la mezcla con el aire de entrada con el aire.  No se especifica cómo se almacena.	Tres modos de carga: 100%, 75% y 50%.  Cada punto de carga se probó para tres fracciones energéticas de H <sub>2</sub> : 5%, 10% y 15%.  Cada punto de carga se probó para tres fracciones en peso de agua: 2%, 4% y 6%.	El uso de H <sub>2</sub> como combustible dual en un motor de 4T junto con la adición de agua tuvo un efecto significativo en la mejora del consumo específico de combustible y el rendimiento, así como una disminución en las emisiones de NO <sub>x</sub> y CO.
-------	-------------------------	---	--	--

Con respecto a los proyectos que han llevado a cabo los principales fabricantes de tecnología marina, se destaca que a finales de 2022 la empresa Wärtsilä junto con WEC Energy Group realizaron con éxito las pruebas de mezcla de H<sub>2</sub> con un motor diésel sin modificar. Se empleó un motor Wärtsilä 50SG para alimentar a una central eléctrica de 55 MW, convirtiéndose así en el motor operado comercialmente más grande que jamás haya funcionado con una mezcla de H<sub>2</sub> como combustible [148].

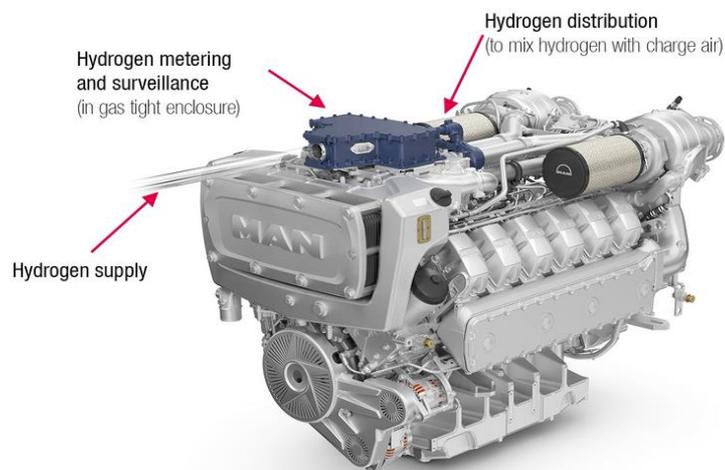
Los resultados también mostraron que el H<sub>2</sub> se puede operar de forma segura con la tecnología de motores diésel lentos actuales. Se logró una carga del motor del 75% con una mezcla del 25% en volumen de H<sub>2</sub>, aunque también se demostró que se puede alcanzar una carga del 100% si se opera con un porcentaje de H<sub>2</sub> del 17%. En cuanto a parámetros del motor, se consiguieron claras mejoras en la eficiencia de este y una disminución de las emisiones de GEI al mismo tiempo que se cumple con la normativa relativa a las emisiones de NO<sub>x</sub> y además tienen planes para desarrollar en el año 2026 un concepto de motor que funcione con un 100% de H<sub>2</sub> puro. Este motor empleado para suministrar energía a una central eléctrica puede utilizarse para la propulsión de barcos ayudando de esta manera a la disminución de emisiones contaminantes del sector marino [148].

Las empresas Volvo Penta y CMB.TECH han colaborado para desarrollar motores de H<sub>2</sub> y diesel en combustión dual para aplicaciones marinas, impulsando de esta manera el ferry de H<sub>2</sub>, el cual se puede observar en la Fig. 6.34. Los motores Volvo Penta con la tecnología de combustión dual impulsan actualmente el ferry llamado Hydro Bingo que opera frente a las costas de Japón. Tiene la capacidad para hasta 80 pasajeros y una autonomía de 120 Km, y cuando se emplea un 20% de H<sub>2</sub> en la combustión se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> en más del 50% incluida una disminución del 28% de NO<sub>x</sub> en comparación con los ferrys propulsados únicamente con diésel [149].



**Fig. 6.34:** Ferry Hydro Bingo impulsado por combustión dual diésel-H<sub>2</sub> [149].

A mediados de 2022 el fabricante de motores marinos MAN puso en funcionamiento dos motores con la capacidad de operar con la mezcla de diésel e H<sub>2</sub>. Se trata de la adaptación de los motores marinos diésel MAN D2862 LE448 de doce cilindros en uve, los cuales solo han tenido que adaptar el sistema de inyección de H<sub>2</sub> el cual se puede observar en la Fig. 6.35 [150]:



**Fig. 6.35:** Motor marino diésel MAN D2862 LE448 adaptado para operar con una adición de H<sub>2</sub> [150].

La mezcla de H<sub>2</sub> no afecta al comportamiento del motor incluso operando al 100% de la carga, haciendo que la potencia máxima de salida de 760 kW sea la misma. Lo que si se consigue con la combustión dual es una reducción de un 50% de media de las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta un máximo de 80% dependiendo de las condiciones de operación, haciendo que estos motores cuenten con la certificación Tier III de la OMI [150].

Otra de las ventajas de este motor de propulsión es que sus mantenimientos y revisiones son prácticamente iguales a uno exclusivamente de diésel, ya que toma como base un motor diésel convencional. Estos dos motores ya se están utilizando en la actualidad en la embarcación Hydrocat 48, la cual se puede observar en la Fig. 6.36, dedicada al transporte de personas en alta mar, principalmente en el sector eólico marino [151].



**Fig. 6.36:** Embarcación Hydrocat 48 propulsada por combustión dual diésel- H<sub>2</sub> [151].

A finales de marzo de 2023, el operador noruego Norled puso en funcionamiento el primer ferry del mundo propulsado por H<sub>2</sub> líquido como fuente de energía principal, conocido como MF Hydra, con una capacidad para transportar 80 coches y 300 pasajeros, el cual se puede observar en la Fig. 6.37. El buque utiliza casi 4 toneladas de H<sub>2</sub> líquido que se almacenan en tanques de 80 m<sup>3</sup> situados en la parte superior del ferry. Se propulsa gracias a dos FC de 200 kW cada una y propulsores Schottel impulsados por generadores de 40 kW. Según sus fabricantes, el MF Hydra debería de ser capaz de reducir las emisiones de carbono en un 95% cada año [152,153].



**Fig. 6.37:** Ferry MF Hydra propulsado por H<sub>2</sub> líquido [154].

Como se ha podido observar, en los últimos años se ha producido un aumento en el número de buques que utilizan motores alimentados por combustibles alternativos al diésel, como pueden ser el G.N.L. el CH<sub>3</sub>OH, etc., para cumplir con las normas actuales y futuras en materia de emisiones impuestas por la OMI. El H<sub>2</sub>, empleado como combustible marino de forma dual en motores diésel de 2T de bajas velocidades, se presenta como una de las soluciones para abordar los desafíos del transporte marítimo relacionados con la descarbonización y con los objetivos planteados de 2030 y 2050. La utilización extensiva de este combustible en su forma limpia requiere un desarrollo de la infraestructura necesaria para su desarrollo sostenible en el presente y en el futuro.

# 7 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

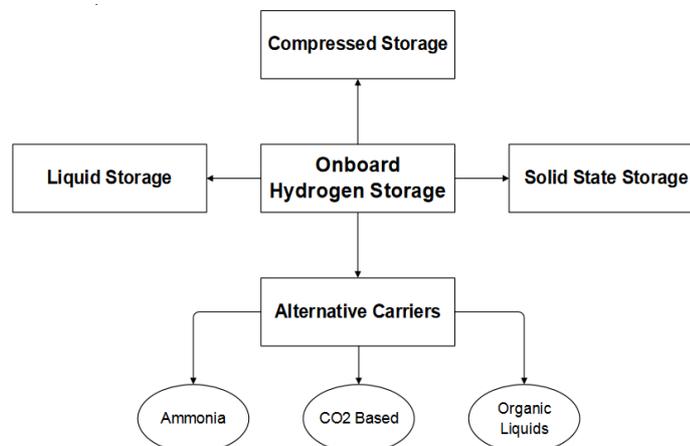
En este capítulo se lleva a cabo una revisión con el propósito de dar una perspectiva objetiva de las ventajas y desventajas, así como de los principales desafíos y obstáculos que conlleva el almacenamiento de H<sub>2</sub> a bordo de buques marítimos.

## 7.1 Introducción

El principal cuello de botella más crucial para el empleo de H<sub>2</sub> como combustible marino no es que la mayor parte se produzca a partir de combustibles fósiles, ya que cada año existen más proyectos dedicados a obtener H<sub>2</sub> por vías renovables, ni tampoco lo es que su empleo en modo dual en grandes motores diésel genere más emisiones de NO<sub>x</sub> que el modo convencional, debido a que existen diferentes técnicas para reducir estas emisiones. El principal desafío es, sin duda, su almacenamiento a bordo de los buques marítimos [155,156].

Como se explicó en el apartado 4.2, el H<sub>2</sub> tiene un alto contenido energético de 120 MJ/kg, siendo esta casi tres veces mayor que la de los HC líquidos. Sin embargo, es un gas tan ligero en condiciones atmosféricas que su densidad volumétrica es bastante baja, lo que se traduce en que almacena menor cantidad de energía por volumen que otros vectores energéticos como la gasolina o el G.N., haciendo que sea un gas difícil de almacenar [155,156].

Para hacer frente a este bajo contenido de energía volumétrica, existen varias tecnologías que permiten concentrar el H<sub>2</sub> para hacer más eficiente su almacenamiento. Como se vió en el apartado 4.2 y como se refleja en la Fig. 7.1, hoy en día las principales soluciones para almacenar H<sub>2</sub> son comprimirlo, licuarlo o hacer que forme parte de un compuesto sólido. Además, existe una cuarta técnica innovadora como es almacenar H<sub>2</sub> en portadores alternativos físicos/químicos [155,156,157].



**Fig. 7.1:** Técnica de almacenamiento de H<sub>2</sub> a bordo de los buques [157].

El almacenamiento de H<sub>2</sub> para aplicaciones marítimas es más complejo y muestra diferentes desafíos que el almacenamiento de H<sub>2</sub> para aplicaciones estacionarias o automotrices. Por ejemplo, mientras que en el almacenamiento estacionario a gran escala existe la posibilidad de entrada de energía externa para liberar el H<sub>2</sub> del soporte o para mantener unas condiciones ideales, para el transporte marino se necesitan grandes cantidades de H<sub>2</sub> que se almacenan en un buque totalmente aislado. Sin embargo, el almacenamiento en barcos está menos restringido por requisitos de peso y volumen en comparación con las industrias automovilísticas, y también se pueden controlar con mayor seguridad algunos parámetros como las temperaturas alcanzadas en buques grandes que en un vehículo de pasajeros mucho más pequeño [155].

## 7.2 Principales Métodos de Almacenamiento de Hidrógeno

Tres de las cuatro técnicas para almacenar H<sub>2</sub> para su utilización en aplicaciones marinas ya fue explicado en el apartado 4.2, como son H<sub>2</sub> comprimido, H<sub>2</sub> líquido a temperaturas criogénicas e H<sub>2</sub> formando parte de la composición molecular de un compuesto sólido. Este punto se va a centrar en proporcionar información sobre el almacenamiento de H<sub>2</sub> en portadores alternativos físicos/químicos, como son aquellos basados en CO<sub>2</sub>, en líquidos orgánicos y en NH<sub>3</sub>.

### 7.2.1 Basado en Amoniaco

El NH<sub>3</sub> es una de las sustancias químicas más producidas a nivel mundial con más de 150 millones de toneladas al año, siendo clave en la producción de fertilizantes representando más del 80% del consumo mundial. Resulta de la combinación de H<sub>2</sub> y con N<sub>2</sub> del aire a través de un proceso industrial llamado Haber-Bosch. El NH<sub>3</sub> puede servir tanto como combustible en sí mismo como un portador de H<sub>2</sub>, generando H<sub>2</sub> con la reacción inversa de Haber-Bosch para lo cual se necesitan altas temperaturas (>>450°C) y una purificación extensa del H<sub>2</sub> para eliminar del todo el NH<sub>3</sub> [155,157].

Cuando se utiliza como portador, el NH<sub>3</sub> tiene una gran capacidad de almacenamiento de H<sub>2</sub> del 18% en peso en estado líquido a 10 bar. Este tipo de almacenamiento a base de NH<sub>3</sub> es una buena opción para los buques por sus ventajas de fácil manejo y porque se puede producir sin emitir CO<sub>2</sub> [155,157].

### 7.2.2 Basado en CO<sub>2</sub>

El CH<sub>3</sub>OH y el ácido fórmico se consideran portadores de H<sub>2</sub> alternativos en la industria marítima, diferenciándose del NH<sub>3</sub> por sus propiedades químicas. Por un lado, el ácido fórmico tiene una capacidad de almacenamiento de H<sub>2</sub> del 4,4% en peso, siendo esta relativamente baja comparada con otros métodos. La producción de ácido fórmico a partir de la hidrogenación de CO<sub>2</sub> ha aumentado en los últimos años, pero las altas presiones necesarias para conseguir la separación del CO<sub>2</sub> sigue siendo un problema. Sin embargo, la ventaja más importante del ácido fórmico es el sencillo proceso de deshidrogenación a temperaturas más bajas en comparación con el CH<sub>3</sub>OH o el NH<sub>3</sub> [155,157].

Por otro lado, el CH<sub>3</sub>OH tiene una capacidad de almacenamiento de H<sub>2</sub> del 12,5% en peso, siendo la forma más común de obtener CH<sub>3</sub>OH verde mediante la hidrogenación de CO<sub>2</sub>. Para obtener H<sub>2</sub>, la deshidrogenación del CH<sub>3</sub>OH se lleva a cabo principalmente mediante reformado con vapor, termólisis u oxidación, con unas temperaturas de alrededor de 230°C y unas presiones de 5 MPa [155,157].

### 7.2.3 Basado en Líquidos Orgánicos

Los portadores de H<sub>2</sub> basados en líquidos orgánicos se basan en la hidrogenación y deshidrogenación de compuestos para almacenar H<sub>2</sub>. Estos compuestos tienen una densidad de almacenamiento de H<sub>2</sub> moderada entre el 5% y el 7,2% en peso, lo que se traduce en el almacenamiento de entre 50 y 60 gramos de H<sub>2</sub> por litro [155,157].

La ventaja de este método en comparación con los otros es su fácil manejo en términos de compresión y puede resultar en una técnica prometedora para el almacenamiento de H<sub>2</sub> en barcos. La hidrogenación y deshidrogenación de los líquidos orgánicos son procesos exotérmicos y endotérmicos, respectivamente. Durante la hidrogenación, el calor producido debe eliminarse para asegurar el equilibrio mientras que, por el contrario, durante la deshidrogenación se debe suministrar energía térmica para eliminar el H<sub>2</sub> del portador. Por lo tanto, el uso de líquidos orgánicos para buques como portador de H<sub>2</sub> requiere una producción de calor sostenible y también un sistema de gestión del calor adecuado para proporcionar continuidad y eficiencia del almacenamiento de H<sub>2</sub> [155,157].

## 7.3 Comparación entre los Principales Métodos de Almacenamiento de Hidrógeno

En este apartado se van a revisar las ventajas y desventajas de cada uno de los diferentes métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub> para su uso a bordo de los buques marítimos. Los criterios por los cuales van a ser evaluados son: seguridad, aplicabilidad, eficiencia energética y fiabilidad, cada uno de ellos estimados en tres niveles, débil, moderado y bueno, tal y como se observa en la Tabla. 7.1 [155,157]:

<b>Tabla. 7.1:</b> Evaluación de niveles y su descripción [157].	
<b>Nivel</b>	<b>Descripción</b>
+	Débil
++	Moderado
+++	Bueno

### 7.3.1 Seguridad

En primer lugar, hay que abordar que, en general, el H<sub>2</sub> tiene un mal nombre cuando se trata de seguridad. Es un combustible con una alta inflamabilidad y un bajo punto de ignición, lo que da como resultado un combustible fácilmente inflamable. Además, el H<sub>2</sub> es la molécula más pequeña que existe por lo que puede filtrarse fácilmente a través de juntas y grietas en cualquier tubería o sistema de almacenamiento, aunque esta alta difusión también es parte de una de sus principales ventajas. Asimismo, es un gas inodoro e invisible y no tóxico, pero puede causar asfixia al reemplazar el O<sub>2</sub> en el aire a altas concentraciones. Por todo ello, su uso y almacenamiento deben de ser una de las principales precauciones en cuanto a seguridad en una zona de alto riesgo como son los barcos [155].

Cuando se almacena en forma de gas comprimido a altas presiones, la liberación de H<sub>2</sub> debe controlarse para evitar su fuga y causar riesgo de explosión. Sin embargo, el almacenamiento en este tipo de tanques es bastante seguro ya que se diseñan para soportar presiones de 150-700 bar, tal y como se vió en el apartado 4.2 [155,157].

Al almacenar H<sub>2</sub> como un líquido criogénico, como este se encuentra a una temperatura de -253°C, se deben de utilizar los materiales adecuados para soportar dichas temperaturas y evitar que no se vuelvan frágiles. Si el H<sub>2</sub> criogénico se vierte, puede ser especialmente peligroso ya que pueden provocar fracturas en el casco del buque, además, se pueden formar nubes de vapor que se encuentran aún a muy bajas temperaturas causando graves peligros al personal que se encuentra a bordo, aumentando los riesgos de asfixia y explosión [155,157] .

En cuanto al almacenamiento de H<sub>2</sub> formando moléculas de compuestos sólidos, la mejor práctica consiste en disponer a los portadores de H<sub>2</sub> lejos del aire y la humedad. Si no, el H<sub>2</sub> podría liberarse y causar riesgos de asfixia y explosiones como en los casos anteriores [155,157].

El NH<sub>3</sub> parece ser un candidato viable para el almacenamiento de H<sub>2</sub> como portador, sin embargo, posee una gran desventaja como es su alta toxicidad. Esta toxicidad proviene de la alta afinidad del NH<sub>3</sub> por el agua, pudiendo causar graves quemaduras en la piel [155,157].

El ácido fórmico es uno de los productos químicos más producidos, por lo que el manejo y almacenamiento de este líquido es bien conocido. Los tanques y las bombas de este portador de H<sub>2</sub> están disponibles a gran escala y pueden adaptarse para convertirse en un combustible marino. Sin embargo, el ácido fórmico sigue siendo un producto corrosivo que causa quemaduras en la piel y ojos, por lo que debe de controlarse en espacios cerrados del buque para que el aire no esté contaminado [155,157].

Relativo al CH<sub>3</sub>OH, este es muy soluble en agua y se biodegrada rápidamente por lo que los vertidos de CH<sub>3</sub>OH en los buques no supone un riesgo tan grave en comparación con, por ejemplo, los vertidos de H<sub>2</sub> criogénico o de NH<sub>3</sub>. Aun así, este producto sigue siendo tóxico y plantea riesgos de incendio, por lo que será necesario un control adicional del contenido de CH<sub>3</sub>OH en los espacios confinados de la sala de motores del buque y en la zona de almacenamiento el mismo [155,157].

Los portadores de H<sub>2</sub> basados en líquidos orgánicos cuentan con un punto de ignición y una temperatura de autoencendido altos, lo cual significa bajos riesgos asociados a incendios y explosiones.

## 7.3.2 Aplicabilidad

Se va a evaluar la aplicabilidad de los diferentes métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub> en función de dos principales criterios: su facilidad para abastecer a los buques (bunkering) y la disponibilidad de su uso a bordo del mismo. En cuanto a la primera de ellas, la infraestructura de abastecimiento y su expansión global son una necesidad absoluta para la industria naviera, sin embargo, también es un problema común para todos los métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub> debido a la poca madurez comercial de este combustible. Por otro lado, en cuanto a la disponibilidad de almacenamiento a bordo, es importante considerar el volumen y el peso adicional para la selección del sistema de almacenamiento de H<sub>2</sub>. En esta perspectiva, la capacidad de almacenamiento por peso y volumen es importante para su fácil utilización a bordo de los buques [155,157].

### 7.3.2.1 Abastecimiento de Combustible

En la industria del transporte marítimo, normalmente el abastecimiento de los buques se suele llevar a cabo mediante tres sistemas [158]:

1. Pipe-to-ship (PTS): Se suministra el combustible desde una terminal ubicada en los muelles hasta los depósitos de los buques.
2. Ship-to-ship (STS): Se lleva a cabo haciendo que un barco de bunkering navegue junto a otro buque al cual se le va a suministrar el combustible.
3. Truck-to-ship (TTS): Se realiza suministrando el combustible a los buques desde camiones cisterna que se sitúan en los muelles.

En cuanto al almacenamiento de H<sub>2</sub> comprimido, una cuestión relevante es el tiempo de abastecimiento, el cual es bastante lento ya que es propio de un gas de baja densidad como en este caso. Un gran buque marítimo requeriría un gran número de toneladas de H<sub>2</sub> para su funcionamiento, y dicho abastecimiento a ese ritmo conlleva varias semanas o una cantidad muy alta de boquillas. Otro método es hacer uso de tanques de H<sub>2</sub> de 6 a 12 metros que son cargados a los barcos. Esta podría ser una opción para pequeños barcos como ferrys, pero para los grandes buques el tiempo que se necesitaría para cargar y descargar dichos tanques sería demasiado elevado [155,157].

La mayor parte de la investigación y desarrollo en cuanto al uso y almacenamiento de H<sub>2</sub> líquido se encuentran en la industria aeroespacial. El mayor problema con este tipo de almacenamiento es la baja temperatura a la cual debe tener lugar el proceso de abastecimiento de

combustible, con el riesgo de que se produzca la evaporación de H<sub>2</sub>. Dado que el proceso de licuación del H<sub>2</sub> es un proceso donde se consume mucha energía, conviene reducir la pérdida de este en forma de vapor para mantener la eficacia del proceso lo más alta posible. Por tanto, se requieren materiales específicos de aislamiento para que en el tanque se mantenga un flujo de calor mínimo [155,157].

Antes de que los puertos puedan suministrar a los buques suficiente H<sub>2</sub> a temperaturas criogénicas para su funcionamiento, se tendrá que construir una infraestructura totalmente nueva. Por lo que el desarrollo de un puerto de H<sub>2</sub> líquido sigue siendo un reto importante para que pueda ser utilizado globalmente como combustible marino [155,157].

Antes de la utilización del fueloil, el carbón era el combustible utilizado en la propulsión marina, por lo que, aunque existen precedentes de portadores de energía sólidos, la manipulación de los portadores de H<sub>2</sub> en estado sólido son significativamente diferentes a la del carbón. Principalmente, existen dos métodos para abastecer a un buque empleando portadores sólidos de H<sub>2</sub>: los portadores cargados pueden suministrarse al barco bombeados como una solución o como polvos, siempre lejos del aire y la humedad, o bien es posible llevar el H<sub>2</sub> en forma pura a bordo y dejar que reaccione con los portadores en el tanque de almacenamiento [155,157].

Tanto el NH<sub>3</sub> como el CH<sub>3</sub>OH son dos de las sustancias químicas más producidas del mundo, por lo que ambas cuentan con infraestructuras ampliamente desarrolladas que permiten transportarlas y lo que las hace muy apropiadas para su posterior abastecimiento a los barcos [155,157].

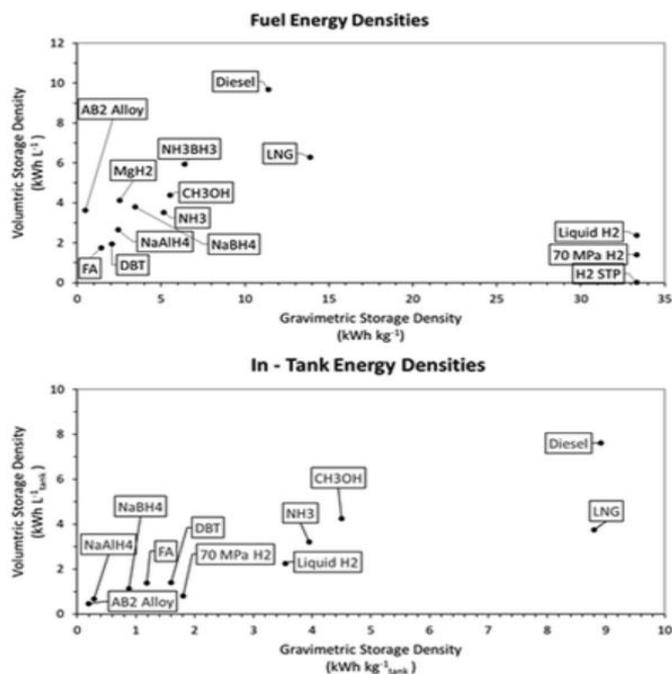
Dado que el ácido fórmico puro es corrosivo, para que la industria marítima pueda emplear este portador de H<sub>2</sub> tendrá que desarrollarse una nueva infraestructura de abastecimiento a los barcos, la cual permita soportar la naturaleza corrosiva de dicha sustancia [155,157].

Las propiedades de los líquidos orgánicos son muy similares a los combustibles empleados actualmente en propulsión marina, lo cual resulta beneficioso a la hora de desarrollar nuevos elementos de abastecimiento ya que la mayoría de ellos pueden ser utilizados. Sin embargo, el principal inconveniente del uso de líquidos orgánicos es que estos no son un combustible propio en sí, sino simplemente un portador de H<sub>2</sub>. Esto significa que una vez que los tanques se hayan descargado, deberán de almacenarse en el barco. Actualmente, la descarga de tanques desde los buques a instalaciones de tierra no es una práctica estándar, por lo que se deberán desarrollar nuevos protocolos para este proceso [155,157].

### **7.3.2.2 Disponibilidad de Uso a Bordo**

Un aspecto muy importante por considerar entre los diferentes sistemas es su densidad energética y volumétrica a la hora de almacenar H<sub>2</sub>, ya que esto determinará qué espacio de almacenamiento necesitan los barcos, así como los requisitos de peso y el tiempo de abastecimiento [155,157].

En la Fig. 7.2, se representan tanto las densidades energéticas y volumétricas neta de los diferentes métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub>, como las densidades energéticas y volumétricas de los mismos cuando estos están almacenados en los tanques adecuados [155].



**Fig. 7.2:** Densidades energéticas y volumétricas de los diferentes métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub>: A) la densidad energética y volumétrica neta de los combustibles y B) la densidad energética y volumétrica bruta del combustible cuando está almacenado en tanques.

Se puede observar cómo los combustibles de HC siguen siendo superiores al H<sub>2</sub> en términos de densidades de almacenamiento de energía, incluso con las restricciones de volumen y peso de los tanques. También se aprecia una disminución en la densidad energética del H<sub>2</sub> comprimido y líquido cuando se le agrega el peso del tanque. Este peso extra es necesario para mantener el combustible en las condiciones adecuadas para ambos procesos, a 700 bar y -253°C respectivamente [155].

En cuanto al almacenamiento de H<sub>2</sub> en líquidos orgánicos, este sistema sigue siendo casi el doble en términos de densidad volumétrica que el almacenamiento de H<sub>2</sub> comprimido más avanzado. Además, dicha densidad también está cerca de la del H<sub>2</sub> líquido, pero con la ventaja de que la primera es estable a temperatura ambiente, no como ocurre con el H<sub>2</sub> criogénico [155].

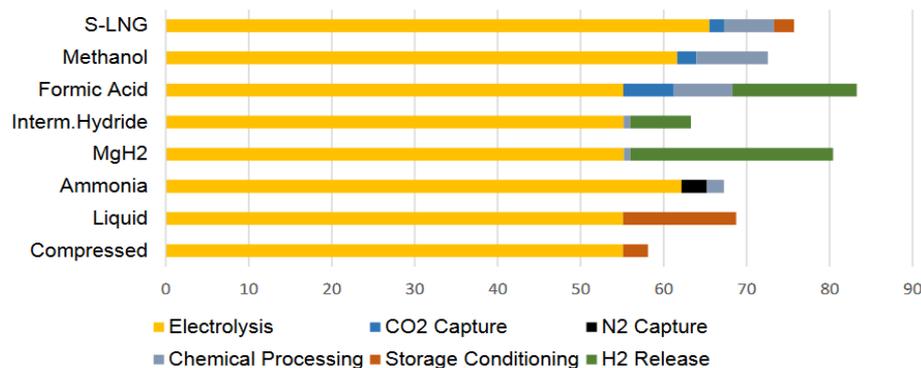
De entre todos los sistemas de almacenamiento de H<sub>2</sub>, el ácido fórmico es el que presenta una menor densidad tanto energética como volumétrica. En cambio, cuando el combustible ya se encuentra en los tanques de almacenamiento, el ácido fórmico está a la par con los líquidos orgánicos para la capacidad de almacenamiento volumétrico, mostrando además una mayor capacidad de almacenamiento por litro que el H<sub>2</sub> comprimido. Esto deja en claro la importancia del peso del tanque con respecto a la capacidad de almacenar energía de un compuesto puro [155].

La Fig. 7.2 también muestra una comparación entre los portadores de H<sub>2</sub> líquidos y los portadores sólidos (NaBH<sub>4</sub>, NaAlH<sub>4</sub> y AB<sub>2</sub>). En términos de densidad volumétrica, todos los portadores sólidos son superiores a los líquidos, sin embargo, el peso adicional de los tanques necesarios para el almacenamiento de H<sub>2</sub> en compuestos sólidos hace que se reduzca dicha eficiencia volumétrica, incluso por debajo de los portadores líquidos [155].

A pesar de todas las comparaciones entre los distintos métodos, las densidades tanto en peso como en volumen siempre van a ser inferiores a las de los combustibles basados en el carbono como el diésel. Esto significa que cambiar el combustible marino por H<sub>2</sub>, en cualquiera de sus formas de almacenamiento, siempre aumentará tanto el peso como el volumen requerido a bordo de los buques [155].

### 7.3.3 Eficiencia Energética

En este apartado se comparan los diferentes métodos en función de su eficiencia energética, la cual se evalúa desde el punto de vista de la energía de producción y almacenamiento necesaria para todo el proceso. Van Hoecke y otros. (2021), analizaron la energía necesaria para cada uno de los métodos para producir y almacenar 1 kg de H<sub>2</sub>, cuya resolución puede observarse en la Fig. 7.3 [155].



**Fig. 7.3:** Comparación de energía para los diferentes métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub> [157].

De la Fig. 7.3, queda en claro que el almacenamiento de H<sub>2</sub> comprimido incluso a 700 bar es el método más eficaz en cuanto a eficiencia energética de almacenar H<sub>2</sub> [157].

### 7.3.4 Fiabilidad

El principal parámetro para evaluar la fiabilidad de los sistemas de almacenamiento es la experiencia que tienen en la industria marítima. De esta manera, el almacenamiento de H<sub>2</sub> en estado líquido, así como el almacenamiento a través de portadores como CH<sub>3</sub>OH y NH<sub>3</sub>, son las mejores opciones. Sin embargo, el abastecimiento de H<sub>2</sub> líquido todavía requiere infraestructuras nuevas, seguras y extendidas por todo el mundo. Por lo tanto, el CH<sub>3</sub>OH y el NH<sub>3</sub> se posicionan como los mejores en términos de fiabilidad para la industria marina [157].

En la Tabla. 7.2 se realiza una clasificación de todos los sistemas de almacenamiento de H<sub>2</sub> que se han analizado, en función de sus ventajas e inconvenientes para cada uno de los criterios empleados:

**Tabla. 7.2:** Comparación de los diferentes métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub> [157].

Técnica de almacenamiento	Seguridad	Aplicabilidad	Eficiencia energética	Fiabilidad
H <sub>2</sub> comprimido	++	++	+++	++
H <sub>2</sub> Líquido	+++	++	++	++
Estado Sólido	+++	+	++	+++
Basado en NH <sub>3</sub>	++	+++	++	+++
Basado en CO <sub>2</sub>	++	+	+	++
Basado en Líquidos Orgánicos	+++	+	+	++

## 7.4 Conclusiones

Tal y como se ha reflejado a lo largo de este capítulo, queda claro que todas las técnicas actuales de almacenamiento de H<sub>2</sub> a bordo para su uso en propulsión marina presentan tantas ventajas como desventajas. Hoy en día, no hay una solución mágica para el problema del almacenamiento, no existe ningún método que combine una alta seguridad a bordo, una alta densidad energética y volumétrica, una baja cantidad de energía para su almacenamiento y unas infraestructuras ya existentes y maduras. Por lo tanto, desarrollar una tecnología de almacenamiento de H<sub>2</sub> segura, consistente, compacta y rentable es una de las barreras técnicamente más desafiantes que existen en la actualidad para el uso generalizado del H<sub>2</sub> como combustible marino.

# 8 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS AL HIDRÓGENO

---

El principal objetivo del sector marino de reducir las emisiones contaminantes está en el reemplazo de las fuentes de energía actuales que se usan en la propulsión de los barcos, como son el LSFO y el gasoil marino (MGO). Estos combustibles aun teniendo bajos contenidos en azufre de acuerdo con las regulaciones, como todos los combustibles fósiles generan grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, siendo el principal responsable de las emisiones en el sector marítimo [159,160].

Para cumplir con los desafíos impuestos por la OMI de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2050 en un 50%, el sector debe cambiar las fuentes de energías actuales por otras más limpias y sostenibles. Además del H<sub>2</sub>, existe una serie de combustibles marinos alternativos que con su uso se pueden cumplir las restricciones actuales y futuras, como son, por ejemplo, los biocombustibles, el G.N.L, G.L.P, NH<sub>3</sub> y CH<sub>3</sub>OH.

Cada uno de estos combustibles tiene sus propias ventajas y desafíos y su uso en la propulsión de barcos depende de factores como pueden ser su producción y disponibilidad, su viabilidad económica y de las emisiones que producen.

Otros parámetros importantes por considerar de estos nuevos combustibles son la densidad energética y volumétrica, sus costes energéticos y de capital, así como diferentes aspectos relacionados con la seguridad como pueden ser la inflamabilidad y toxicidad del combustible.

En la Fig. 8.1, se pueden ver las diferencias entre los principales combustibles marinos en términos de su densidad energética y volumétrica y su almacenamiento, que pueden determinar cuales de ellos son más aptos para ciertos tipos de barcos y operaciones. Con respecto al combustible usado en la actualidad, el MGO, todos los demás tienen una menor densidad volumétrica en especial el H<sub>2</sub>, lo que se traduce en que se necesita un mayor tamaño de almacenamiento para lograr la misma producción de energía. En cuanto a la densidad por unidad de masa, se puede observar que tanto la del CH<sub>3</sub>OH como la del NH<sub>3</sub> son inferiores a la del MGO, sin embargo, el H<sub>2</sub> y el G.N.L tienen una densidad energética superior. Esto quiere decir que los dos primeros son más pesados y los dos segundos más ligeros que el diésel. Esto también queda reflejado en la Fig. 8.2 [159,161]:

Fuel type	LHV (MJ/kg)	Volumetric energy density (GJ/m <sup>3</sup> )	Storage pressure (bar)	Storage temperature (°C)
MGO	42.7	36.6	1	120
LNG	50	23.4	1	-162
Methanol	19.9	15.8	1	20
Liquid ammonia	18.6	12.7	1	-34
			8.6	20
Liquid H <sub>2</sub>	120	8.5	1	-253
Compressed H <sub>2</sub>	120	7.5	700	20

Fig. 8.1: Comparación entre diferentes combustibles marinos [159].

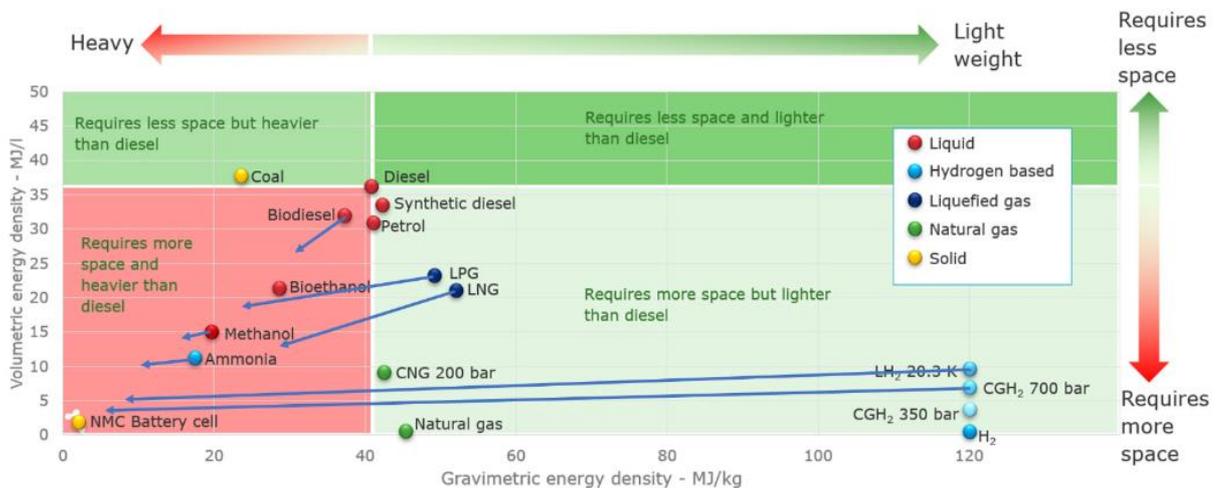


Fig. 8.2: Densidades energéticas y volumétricas para diferentes fuentes marinas [161].

En términos de costes energéticos, los que tienen unos precios más bajos y competitivos son el G.N.L, G.L.P y el CH<sub>3</sub>OH, mientras que el H<sub>2</sub> y el NH<sub>3</sub> son muchos más altos y tienen unos rangos de precios más amplios [161].

En la Fig. 8.3 se presenta un esquema con los diferentes parámetros de los combustibles marinos reflejando que ventajas y desafíos tiene cada uno de ellos. Se puede observar como los que están basados en combustibles fósiles tienen el único inconveniente de las emisiones locales y de GEI, siendo incompatibles para lograr la descarbonización del sector. Aquellos que son sostenibles y renovables tienen la ventaja de producir bajas emisiones contaminantes, sin embargo, tienen inconvenientes como su pobre densidad energética y tienen que lograr mejorar aspectos como su disponibilidad de almacenamiento y su disposición comercial.

Fuel	HFO + scrubber	Low sulphur fuels	LNG	Methanol	LPG	HVO (advanced biodiesel)	Ammonia	Hydrogen	Fully electric
Parameters	Fossil (without CCS)					Bio	Renewable		
Energy density	Green	Green	Light Green	Light Green	Light Green	Green	Yellow	Orange	Red
Technological maturity	Light Green	Light Green	Light Green	Yellow	Yellow	Green	Orange	Orange	Yellow
Local emissions	Orange	Orange	Light Green	Light Green	Light Green	Orange	Yellow	Green	Green
GHG emissions	Red	Red	Orange	Orange	Orange	Light Green	Green	Green	Green
Bunkering availability	Green	Green	Light Green	Yellow	Yellow	Red	Orange	Red	Orange
Commercial readiness	Green	Green	Green	Light Green	Light Green	Yellow	Orange	Red	Yellow/Red

**Fig. 8.3:** Ventajas e inconvenientes de cada combustible marino [160].

Nota: La producción de G.N.L, CH<sub>3</sub>OH y G.L.P en esta tabla solo se tiene en cuenta por fuentes fósiles, sin embargo, si se realiza por métodos renovables sus emisiones de GEI serán menores.

## 8.1 Biocombustibles.

Son derivados de fuentes orgánicas como residuos y biomasa y pueden estar en forma líquida o gaseosa. En cuanto a los biocombustibles líquidos, estos se pueden aprovechar utilizando dos enfoques. El primero de ellos requiere mezclar biocombustibles de primera generación con fuentes fósiles para disminuir las cantidades de emisiones contaminantes, sin embargo, estos generan problemas de sostenibilidad relacionadas con el uso de la tierra y cuestiones socioeconómicas. El segundo enfoque implica el uso de biocombustibles de segunda generación como sustitutos de los actuales combustibles para el transporte marítimo, proporcionando unas mayores reducciones de emisiones de GEI de hasta un 70%-100% con respecto al MGO [159,160].

Los biocombustibles líquidos más prometedores desde el punto de vista de GEI de su ciclo de vida son el aceite vegetal hidrogenado (HVO), el éster metílico de ácidos grasos (FAME) y el dimetiléter (DME). Su uso está limitado por la ausencia de infraestructura global y de instalaciones de abastecimiento de estos combustibles, aunque el HVO puede distribuirse por las líneas de MGO/HFO existentes, así como de normas específicas para la industria marítima. Es por ello que su uso en la propulsión de barcos está muy limitado hoy en día [160].

Sin embargo, a inicios de 2021 la empresa Ocean Network Express llevó a cabo la prueba con éxito del uso de biocombustibles para abastecer al buque llamado M/V MOL Experience, en colaboración con con el armador Mitsui O.S.K. Lines y el pionero en biocombustibles sostenibles

GoodFuels. El biocombustible empleado fue una mezcla con combustibles convencionales, lo que le permitió al buque realizar una travesía desde Europa y Estados Unidos. Los biocombustibles desarrollados por GoodFuels se fabrican a partir de aceites residuales, están libres de SO<sub>x</sub> y ofrecen una reducción de CO<sub>2</sub> del 80%-90% frente a los combustibles fósiles equivalentes. Se trata de un paso importante que demuestra la viabilidad y la posible utilización de estos combustibles alternativos al H<sub>2</sub> en los próximos años [162].

En cuanto a los biocombustibles en forma gaseosa, aquellos que pueden ser utilizados para abastecer a los barcos son el biogás comprimido (CBG) y el biogás licuado (LCB). Un ejemplo del uso de CBG en la industria marítima es el viaje de prueba entre Suecia y Finlandia del buque Viikki, que empleó un 100% de este combustible sostenible. El barco, desarrollado por ESL Shipping Oy, fue diseñado originalmente para funcionar con G.N.L. pero con una serie de modificaciones mínimas fue posible alimentarlo con combustible renovable. Se estima que con el uso de CBG se redujo en un 85% las emisiones de CO<sub>2</sub> de su ciclo de vida en comparación con los combustibles fósiles [163].

### **Ventajas:**

- Fácil integración en motores diésel actuales.
- Se pueden usar tanto en forma dual junto con otro combustible fósil o como combustible único.
- El abastecimiento de combustible en los puertos puede utilizar la infraestructura de G.N.L., lo que hace la implementación más barata.
- Los buques que utilizan G.N.L. pueden cambiar a LCB como combustible directo.

### **Desventajas:**

- El crecimiento de la materia prima utilizada en la producción de biocombustibles puede generar problemas con el uso de la tierra pudiendo impactar en la seguridad alimentaria global.
- Limitaciones de la capacidad de almacenamiento requerida para el CBG.
- Solo se pueden considerar para embarcaciones de corta distancia, ya que para buques de larga distancia se necesita una gran capacidad de almacenamiento.

## **8.2 Metanol.**

Empleado en cientos de productos químicos, el metanol también se utiliza como combustible alternativo en el sector del transporte marino. Actualmente, la mayor parte del CH<sub>3</sub>OH se produce a partir de G.N. y carbón, aunque también se puede producir a través de desechos agrícolas y de biomasa recolectada de forma sostenible para obtener biometanol, además de a través de fuentes de energía renovables e H<sub>2</sub> verde. El uso de este combustible reduce las emisiones de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> hasta un 60% en comparación con el HFO y disminuye en un 95% las partículas emitidas, además se beneficia de una infraestructura de transporte y almacenamiento ya existente [159,160].

Un ejemplo de la utilización de este combustible alternativo en el sector marítimo es el desarrollo iniciado en 2021 por parte de la empresa Maersk de portacontenedores libres de emisiones alimentados con  $\text{CH}_3\text{OH}$ , el cual se puede observar en la Fig. 8.4. A mediados de 2023 realizó una travesía desde Corea del Sur hasta Europa, donde el 14 de septiembre se nombró oficialmente la embarcación. Operará en rutas por el mar Báltico con una longitud de 172 metros de largo y una capacidad para 2.100 contenedores [159,164].



**Fig. 8.4:** Portacontenedor fabricado por Maersk alimentado con  $\text{CH}_3\text{OH}$  [164].

### **Ventajas:**

- Se puede implementar en el transporte marítimo con relativa facilidad ya que es empleado en multitud de sectores.
- El uso de biometanol es 100% renovable.

### **Desventajas:**

- Dificultades para obtener fuentes de carbono sostenibles con las que producir metanol.
- El  $\text{CH}_3\text{OH}$  verde tiene altos costes de producción.

### 8.3 Amoniaco.

Hoy en día más del 80% del  $\text{NH}_3$  producido se emplea en la agricultura como fertilizante, aunque también se puede utilizar como combustible para la propulsión de barcos siendo uno de los combustibles alternativos más prometedores para alcanzar los objetivos de emisiones de los próximos años. Se obtiene mediante la conversión de  $\text{H}_2$  y  $\text{N}_2$  utilizando altas temperaturas y catalizadores, sin embargo, más del 90% de su producción depende de combustibles fósiles como el G.N. y una producción sostenible requiere abundantes fuentes renovables. Sin embargo, actualmente su empleo como combustible marino necesita más investigación y desarrollo [159,160].

#### Ventajas:

- Tiene una infraestructura de producción y transporte ya existente debido a la industria agrícola.
- El  $\text{NH}_3$  verde es neutro en carbono y tiene una de las mayores eficiencias comparadas con otros combustibles alternativos.

#### Desventajas:

- La demanda global de  $\text{NH}_3$  en múltiples sectores puede causar problemas de escalabilidad.
- Tiene un alto coste de producción y es altamente tóxico, lo que requiere medidas especiales de almacenamiento y seguridad.

### 8.4 Gas Natural Licuado.

Entre los combustibles marinos alternativos, el G.N.L es el más empleado hoy en día con más de 400 buques propulsados por este combustible y otros más de cien por convertir. Su principal componente es el metano y debe almacenarse en tanques aislados que ocupan de tres a cuatro veces el volumen del fueloil para proporcionar cantidades equivalentes de energía, debido a su temperatura de ebullición de  $-162^\circ\text{C}$ . Como combustible marino no genera  $\text{SO}_x$  y tiene unas bajas emisiones de  $\text{NO}_x$ .

## **Ventajas:**

- Tiene una infraestructura de suministro bien establecida, una alta densidad energética y actualmente se emplea en numerosos buques a nivel mundial.
- Tiene un contenido en azufre menor que el HFO.

## **Desventajas:**

- Genera menos emisiones contaminantes que el HFO, pero aun así tiene significativamente más emisiones que los combustibles alternativos bajos en carbono.
- Emplea recursos no renovables.

## **8.5 Combustibles Sintéticos.**

También conocidos como e-fuels, son aquellos que se obtienen a partir de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. El primer paso es obtener H<sub>2</sub> verde a partir del proceso de la electrólisis separando las moléculas de H<sub>2</sub>O, siendo la energía necesaria para llevarla a cabo procedente de fuentes renovables, como la solar o la eólica. El segundo paso consiste en obtener CO<sub>2</sub> de la atmósfera o de una instalación industrial, compensando de esta forma las emisiones de este gas cuando se utiliza como fuente de energía en el vehículo. Finalmente, este gas de síntesis formado por H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> se transforma en hidrocarburos líquidos sintéticos, como la gasolina o el gasoil, a través de un proceso químico conocido como Fischer-Tropsch [165,166,167].

## **Ventajas:**

- Tienen propiedades fisicoquímicas prácticamente idénticas a las de su equivalente derivado del petróleo lo que los hace compatibles con los motores de los vehículos actuales.
- Su uso no contribuye al aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, ya que el gas generado durante su combustión se compensa con el CO<sub>2</sub> capturado durante su proceso de obtención.
- Permite el desarrollo de nuevas tecnologías en tecnologías claves de bajas emisiones como lo son la CCUS y la producción de H<sub>2</sub> renovable.

## **Desventajas:**

- Si bien no aportan más CO<sub>2</sub> a la atmósfera, si que desprenden en su combustión NO<sub>x</sub> y CH<sub>4</sub>, responsable del aumento de la temperatura y de la mala calidad del aire en las ciudades.
- Tienen una eficiencia en su producción extremadamente baja, en torno al 16%. Esto sumado a la gran estructura necesaria para su producción, hacen que el precio por litro de combustible se estime en 3-4€.

## **8.6 Etanol.**

Actualmente, el bioetanol es el combustible más producido y empleado a nivel mundial. Tiene unas propiedades de combustión similares al metanol, con menores emisiones contaminantes que los combustibles marinos convencionales y cuenta además con una infraestructura de transporte y almacenamiento más desarrollada que G.N., H<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>, debido a que permanece en estado líquido en condiciones atmosféricas [168].

Se puede producir mediante la hidratación de etileno o a través de la fermentación de azúcares. Hoy en día casi la mayor parte de etanol deriva de la biomasa, destacando los tres grupos más importantes de materias primas: amiláceas y azucaradas como maíz y caña de azúcar, celulósicas como por ejemplo residuos agrícolas, pasto y madera y por último materias primas procedente de algas [168].

Sin embargo, al igual que ocurre con los demás combustibles alternativos a los fuelóleos marinos convencionales, requieren para su almacenamiento a bordo mayor peso y volumen debido a su baja densidad volumétrica. Además, también existen algunos problemas de compatibilidad debido a la corrosión de algunos materiales [168].

En 2023, la empresa energética conocida por su producción de etanol denominada Raízen y el fabricante de motores marinos Wartsila firmaron un acuerdo para investigar y promover el etanol como combustible marino en los planes de descarbonización de las empresas navieras [169,170].

## **Ventajas:**

- Es el combustible más producido a nivel mundial y cuenta con una infraestructura desarrollada de transporte y almacenamiento.

- Produce menores emisiones contaminantes que los combustibles marinos convencionales.

### **Desventajas:**

- Para su almacenamiento a bordo de los buques se requiere un mayor volumen y peso que los combustibles tradicionales.
- Presenta problemas de compatibilidad con algunos materiales debido a su corrosión.

# 9 CONCLUSIONES

---

Este capítulo concluye el trabajo de fin de grado con las conclusiones globales que se han obtenido tras realizar esta revisión bibliográfica.

## 9.1 Conclusiones Globales

Tras la finalización de este trabajo, se ha evidenciado lo siguiente:

### Capítulo 3

- La temperatura del planeta se está incrementando, alcanzando una media anual en el año 2022 de 1,15 °C superior al promedio preindustrial (1850-1900).
- En 2021, se registraron máximos históricos con un aumento de las fracciones molares de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, y N<sub>2</sub>O, del 149%, 262% y 124% respectivamente, con respecto a la época preindustrial.
- La acumulación de GEI en la atmósfera provocadas por la actividad humana a raíz de la revolución industrial, son el principal responsable del aumento de la temperatura en el planeta.
- Es necesario cambiar de un sistema basado en combustibles fósiles a uno basado en fuentes de energía renovables, llevando a cabo una descarbonización del sector energético mundial ya que este es el responsable de más del 70% de las emisiones de GEI.
- Gracias a sus características fisicoquímicas, el H<sub>2</sub> se presenta como una opción muy viable para ayudar a conseguir la descarbonización del sector energético, contribuyendo a obtener un planeta libre de emisiones.
- En la actualidad, existen cada vez más proyectos tanto internacionales como nacionales a lo largo de toda la cadena de valor del H<sub>2</sub>.

## Capítulo 4

- Más del 95% de todo el H<sub>2</sub> que se produce mundialmente se obtiene a través de métodos que emplean combustibles fósiles, liberando emisiones contaminantes en el proceso.
- A pesar de que la producción de H<sub>2</sub> renovable basada en la electrólisis es muy baja, esta aumenta considerablemente año tras año, lo que refleja un crecimiento muy positivo de esta tecnología.
- Algunos de los métodos de producción de H<sub>2</sub> renovable son: electrólisis, termólisis, fotoelectrocatalisis y fotobiólisis.
- Hoy en día, las principales soluciones para el almacenamiento de H<sub>2</sub> son comprimirlo, licuarlo, hacer que forme parte de un compuesto sólido o almacenarlos en grandes depósitos geológicos naturales para su empleo en aplicaciones estacionarias.
- Se pueden resumir en tres las aplicaciones finales del H<sub>2</sub>: su uso directo para diferentes procesos industriales, en FC y en MCI.

## Capítulo 5

- Las características fisicoquímicas del H<sub>2</sub> lo hacen muy adecuado para su empleo en motores CI.
- El H<sub>2</sub> se suele emplear en motores CI como combustible dual junto con el diésel, usándolo como combustible principal o pudiendo variar el porcentaje de la energía aportada por cada combustible.
- El empleo de H<sub>2</sub> en motores con modo de combustión dual junto con el diésel trae consigo una serie de ventajas como pueden ser la mejora de la eficiencia térmica, un alto rendimiento de la combustión, una disminución de la duración de la ignición, así como una reducción significativa de las emisiones basadas en carbono (CO, CO<sub>2</sub>, HC y PM/humos)

- Los motores con combustión dual no solventan problemas que ya presentaban los MCI alimentados por diésel y además presentan nuevos desafíos a solucionar como son: el aumento considerable de las emisiones de NOx, la posible aparición de detonaciones en el motor (knocking) y el problema de la autoignición de la mezcla aire-H<sub>2</sub>.
- Entre los principales métodos que hay actualmente para reducir los efectos negativos de la combustión dual con H<sub>2</sub> se encuentran: el método EGR, la inyección de agua y la variación de la RC del motor.

## Capítulo 6

- El transporte marítimo internacional juega un papel esencial en la economía mundial debido a que transporta casi el 90% de los bienes del mundo y mueve más de 10 mil toneladas anuales de contenedores a granel por los océanos del planeta.
- Los grandes motores diésel 2T que se utilizan para la propulsión marina queman grandes cantidades de combustibles basados en carbono, que representan el 3% de las emisiones mundiales de GEI. Por otro lado, también tienen un gran impacto en la mala calidad del aire de las zonas próximas a la costa debido a las emisiones de NOx que producen.
- El organismo encargado de promover la seguridad marítima y de implementar medidas para la regulación de GEI de los buques, es la OMI.
- A las medidas de la OMI relativas a las emisiones producidas se las conoce comúnmente como Tier I, Tier II y Tier III.
- La OMI exige el cumplimiento de una serie de medidas a corto, medio y largo plazo que permitan cumplir los objetivos de la Estrategia Inicial de 2018, reduciendo urgentemente las emisiones de GEI del transporte marino.
- En la literatura actual existen pocos trabajos de investigación que ensayen el comportamiento de los motores diésel marinos actuales con la adición de H<sub>2</sub>, por lo que sería interesante seguir indagando en esta línea para desarrollar motores de propulsión marina que empleen cada vez más porcentaje de H<sub>2</sub> o incluso que operen con un 100% del mismo.

- Los trabajos de investigación concluyen que el uso de H<sub>2</sub> como combustible dual en motores diésel lentos de 2T es factible, ya que tiene mejoras en algunos aspectos del motor como el rendimiento térmico e importantes mejoras en cuanto a emisiones contaminantes. A su vez, permite cumplir con la normativa Tier impuesta por la OMI, por lo que el H<sub>2</sub> puede considerarse un buen candidato como combustible verde utilizado en propulsión marina.
- Hoy en día existen pequeñas embarcaciones como ferrys que emplean motores marinos con la tecnología de combustión dual H<sub>2</sub>-diésel.

## Capítulo 7

- Actualmente, el principal desafío que presenta el uso de H<sub>2</sub> para propulsión marina es su almacenamiento.
- Debido a su baja densidad volumétrica en condiciones atmosféricas, hace que almacene menor cantidad de energía por volumen que otros vectores energéticos como la gasolina o el G.N.
- Hoy en día las principales soluciones para almacenar H<sub>2</sub> son comprimirlo, licuarlo, hacer que forme parte de un compuesto sólido o almacenar H<sub>2</sub> en portadores alternativos físicos/químicos, como NH<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>OH, ácido fórmico y líquidos orgánicos.
- Cambiar el combustible marino por H<sub>2</sub>, en cualquiera de sus formas de almacenamiento, siempre aumentará tanto el peso como el volumen requerido a bordo de los buques.
- Es necesario desarrollar una tecnología de almacenamiento de H<sub>2</sub> segura, consistente, compacta y rentable para conseguir un uso generalizado del H<sub>2</sub> como combustible marino.

## Capítulo 8

- Para reducir las emisiones producidas por la industria marítima, además del H<sub>2</sub>, existen otros combustibles alternativos con opciones potenciales de ser utilizados para la propulsión de barcos en un futuro cercano.

- Algunos de estos combustibles alternativos son los biocombustibles, G.N.L., amoníaco, metanol, e-fuels y etanol, entre otros.

# REFERENCIAS

---

- [1] *State of the Global Climate*. (2022). World Meteorological Organization.  
[https://library.wmo.int/viewer/66214/download?file=Statement\\_2022.pdf&type=pdf&navigator=1](https://library.wmo.int/viewer/66214/download?file=Statement_2022.pdf&type=pdf&navigator=1)
- [2] *Climate-related risk and financial stability*. (2021). European Central Bank.  
<https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/ecb.climateriskfinancialstability202107~87822fae81.en.pdf>
- [3] Ritchie, H. (2020). *Emissions by sector*.  
<https://ourworldindata.org/emissions-by->
- [4] *Net zero by 2050*. (2021). IMF.  
<https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2021/09/infographic-series-net-zero-2050-IEA-report>
- [5] *Origen de las COP*. (s.f.). Iberdrola.  
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contra-cambio-climatico/origen-cop-naciones-unidas-conferencias>
- [6] *El acuerdo de París*. (2022). Naciones Unidas.  
<https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- [7] *COP 26 Glasgow, Reino Unido*. (2021). Iberdrola.  
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contra-cambio-climatico/cop26>
- [8] *COP 26*. (2022). Naciones Unidas.  
<https://www.un.org/es/climatechange/cop26>
- [9] *El sector marítimo en la COP 27*. (2022). Turbo Internacional.  
<https://turbointernacional.com/es/el-sector-maritimo-en-la-cop27/>
- [10] *COP 27: Iberdrola en la Cumbre del Clima 2022*. (2022). Iberdrola.  
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contra-cambio-climatico/cop27>
- [11] *Summary Report 6–20*. (2023). IISD Earth Negotiations Bulletin.  
<https://enb.iisd.org/es/sharm-el-sheikh-climate-change-conference-cop27-summary>

[12] *El cambio climático y la sostenibilidad del crecimiento: Iniciativas internacionales y políticas europeas*. (2022). Banco de España.

<https://www.bde.es/f/webbde/SES/Secciones/Publicaciones/PublicacionesSeriadas/DocumentosOcasionales/22/Fich/do2213.pdf>

[13] *Pacto Verde Europeo*. (2023). Consejo de la Unión Europea.

<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>

[14] *Objetivo 55*. (2023). Consejo de la Unión Europea.

<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

[15] Vivanco, B. (2022). *Analysis of the European Strategy for Hydrogen*.

[https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/140432/TFG4027\\_Vivanco%20Martin.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/140432/TFG4027_Vivanco%20Martin.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[16] *Hydrogen Roadmap Europe : A Sustainable Pathway for the European Energy Transition*. (2016). Publications Office of the European Union.

<https://data.europa.eu/doi/10.2843/341510>

[17] *Emisiones de aviones y barcos: datos y cifras*. (2022). Noticias Parlamento Europeo.

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20191129STO67756/emisiones-de-aviones-y-barcos-datos-y-cifras-infografia>

[18] Bailey, M., & Bailey, M. (2020). Ovako and Linde trial hydrogen-powered steel heating. *ChemicalEngineering*.

<https://www.chemengonline.com/ovako-and-linde-trial-hydrogen-powered-steel-heating/>

[19] Roca, J. A. (2021). HERO, el catalizador de hidrógeno a calor que podría ayudar a descarbonizar la industria alimentaria. *El Periódico de la Energía*.

<https://elperiodicodelaenergia.com/hero-el-catalizador-de-hidrogeno-a-calor-que-podria-ayudar-a-descarbonizar-la-industria-alimentaria/>

[20] *Hydrogen Research & Development Australia*. (2022). Star Scientific.

<https://starscientific.com.au/applications/>

[21] *Net Zero by 2050 – Analysis*. (2021). IEA.

<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

[22] *Hydrogen Insights 2023*. (2023). Hydrogen Council.

<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/05/Hydrogen-Insights-2023.pdf>

[23] *HyDeal Ambition*. (2022). HyDeal.  
<https://www.hydeal.com/hydeal-ambition>.

[24] *Renewable energy hub in Australia*. (2022). BP Australia.  
[https://www.bp.com/en\\_au/australia/home/who-we-are/reimagining-energy/decarbonizing-australias-energy-system/renewable-energy-hub-in-australia.html](https://www.bp.com/en_au/australia/home/who-we-are/reimagining-energy/decarbonizing-australias-energy-system/renewable-energy-hub-in-australia.html)

[25] *Leading the way in delivering green hydrogen at Giga-Scale*. (2023). InterContinental Energy.  
<https://intercontinentalenergy.com/western-green-energy-hub>

[26] *Green Hydrogen from Central Asia*. (2023). HyrAsia Connecting for a bigger good.  
<https://hyrasia.energy/>

[27] *AquaVentus Förderverein E.V.* (2023). AquaVentus Förderverein e.V.  
<https://aquaventus.org/en/>

[28] *H<sub>2</sub> Magallanes: nuevo proyecto de hidrógeno verde en Chile*. (2021). Asociación Chilena del Hidrógeno.  
<https://h2chile.cl/h2-magallanes-nuevo-proyecto-de-hidrogeno-verde-en-chile/>

[29] Doedee, V. (2021). Saudi Arabia's plan to rule the \$700 billion hydrogen market from a marine perspective. *Mr. Sustainability*.  
<https://www.mr-sustainability.com/stories/2021/saudi-arabias-plan-to-rule-700-billion-hydrogen-market-maritime>

[30] *Global Hydrogen Review 2022*. (2022). IEA.  
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>

[31] *Varenes Carbon Recycling: A biofuel plant for a green economy*. (2023). Recyclage Carbone Varenne.  
<https://rcv-vcr.com/>

[32] *Lufthansa supports world's first production plant for CO<sub>2</sub>-neutral, synthetic aviation fuels*. CleanTech Hub, Lufthansa Group. (2021). CleanTech Hub, Lufthansa Group.  
<https://cleantechhub.lufthansagroup.com/en/focus-areas/alternative-fuels-and-emissions/atmosfair.html>

[33] *Hamburg H<sub>2</sub>: Working towards the production of zero-carbon emissions steel with hydrogen*. (2019). ArcelorMittal.  
<https://corporate.arcelormittal.com/climate-action/decarbonisation-technologies/hamburg-h2-working-towards-the-production-of-zero-carbon-emissions-steel-with-hydrogen>

- [34] *BMW iX5 Hydrogen defies the extreme cold.* (2022). BMW Group.  
<https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2022/bmw-ix5-hydrogen.html>
- [35] Biogradlija, A., & Biogradlija, A. (2022). *Changan dreams of being the Tesla of hydrogen.*  
<https://energynews.biz/changan-dreams-of-being-the-tesla-of-hydrogen/>
- [36] *Jaguar Land Rover to develop hydrogen-powered defender fuel cell prototype.* (2021). JLR Media Newsroom. (2021). JLR Media Newsroom.  
<https://media.jaguarlandrover.com/news/2021/06/jaguar-land-rover-develop-hydrogen-powered-defender-fuel-cell-prototype>
- [37] *Great Wall Motors to launch an independent brand for Fuel-Cell Passenger Vehicles.* (2022). FuelCellsWorks.  
<https://fuelcellsworks.com/news/great-wall-motors-to-launch-independent-brand-for-fuel-cell-passenger-vehicles/>
- [38] O'Brien, L. (2022). *West Midlands to launch UK's largest hydrogen bus fleet after securing £30m government funding.*  
<https://www.expressandstar.com/news/local-hubs/birmingham/2022/03/28/west-midlands-to-launch-uks-largest-hydrogen-bus-fleet-after-securing-30m-government-funding/>
- [39] *Kansai Airport launches a hydrogen shuttle bus service.* (2022). VINCI.  
[https://www.vinci.com/vinci.nsf/en/news-update/pages/kansai\\_airport\\_launches\\_a\\_hydrogen\\_shuttle\\_bus\\_service\\_japan\\_052022.htm](https://www.vinci.com/vinci.nsf/en/news-update/pages/kansai_airport_launches_a_hydrogen_shuttle_bus_service_japan_052022.htm)
- [40] Breslin, J. (2022). *Wrightbus to supply German city of Cologne with 60 hydrogen buses.*  
<https://www.belfasttelegraph.co.uk/business/northern-ireland/wrightbus-to-supply-german-city-of-cologne-with-60-hydrogen-buses/41696266.html>
- [41] *Cologne to operate the biggest fleet of hydrogen Solaris buses.* (2022). Solaris.  
<https://www.solarisbus.com/en/press/cologne-to-operate-the-biggest-fleet-of-hydrogen-solaris-buses-1787>
- [42] *Daimler Truck North America and Cummins collaborate to drive hydrogen fuel cell trucks forward in North America.* (2022). Cummins Newsroom.  
<https://www.cummins.com/news/releases/2022/05/11/daimler-truck-north-america-and-cummins-collaborate-drive-hydrogen-fuel>
- [43] Rodriguez, C. (2022). *Hyzon Motors Hyzon Media | Latest news, updates, articles and coverage.*  
<https://www.hyzonmotors.com/in-the-news/hyzon-motors-and-hiringa-energy-advance-partnership-to-decarbonize-heavy-road-transport-in-new-zealand>

[44] Company, H. M. (2022). *Hyundai Motor's XCIENT Fuel Cell Heavy-Duty trucks to hit German roads.*

<https://www.hyundai.com/worldwide/en/company/newsroom/hyundai-motor%E2%80%99s-xcient-fuel-cell-heavy-duty-trucks-to-hit-german-roads-0000016873?minDate=00000000000&selectedVal=&year=0&searchKey=&type=RES&type=IMG&selection=&pageNo=1&maxDate=20220802202745&rowCount=15&latest=true&listPageUrl=release.all>

[45] *Switzerland embraces XCIENT Fuel Cell, world's 1st mass produced fuel cell heavy-duty truck.* (2020). Hyundai Motor Group.

<https://www.hyundaimotorgroup.com/tv/CONT0000000000002630>

[46] *Whistle blows in Germany for world's first hydrogen train fleet.* (2022). France 24.

<https://www.france24.com/en/live-news/20220824-whistle-blows-in-germany-for-world-s-first-hydrogen-train-fleet>

[47] Frangoul, A. (2022). *Hydrogen-powered train a step closer to passenger service in Germany.*

<https://www.cnn.com/2022/03/16/hydrogen-powered-train-a-step-closer-to-passenger-service-in-germany.html>

[48] *A new ambitious project for the ORECA group: Hydrogen Combustion Engines.* (2022). Groupe Oreca - The motorsport company.

[https://www.oreca.com/en/news\\_oreca/new-ambitious-project-oreca-group-hydrogen-combustion-engines/](https://www.oreca.com/en/news_oreca/new-ambitious-project-oreca-group-hydrogen-combustion-engines/)

[49] *China's first hydrogen internal combustion engine powered heavy Truck.* (2022). China Trucks.

[https://m.chinatrucks.com/news/10114.html?utm\\_campaign=China%20Clean%20Energy%20Syndicate%20&utm\\_medium=email&utm\\_source=Revue%20newsletter](https://m.chinatrucks.com/news/10114.html?utm_campaign=China%20Clean%20Energy%20Syndicate%20&utm_medium=email&utm_source=Revue%20newsletter)

[50] Geerts, E., & Geerts, E. (2022). *US research project to develop hydrogen combustion engine for rail.*

<https://www.railtech.com/rolling-stock/2022/11/16/us-research-project-to-develop-hydrogen-combustion-engine-for-rail/?gdpr=deny>

[51] Aviation, H. (2022). *Project «Green Fuels Hamburg» for carbon-neutral aviation.*

<https://www.hamburg-aviation.de/en/detail/details/news/project-green-fuels-hamburg-for-carbon-neutral-aviation.html>

[52] *Global Hydrogen Review 2022.* (2022). IEA.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>

- [53] *TUG Project leads the way for 1 MW+ hydrogen-burning engines.* (2019). Riviera. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/tug-project-leads-the-way-for-hydrogen-burning-mw-engines-56680>
- [54] Vaidya, P. (2022). *Essar to build UK'S first refinery-based hydrogen furnace in £45 million investment.* <https://www.essar.com/essar-to-build-uks-first-refinery-based-hydrogen-furnace-in-45-million-investment/>
- [55] Kalyan. (2021). *Gas turbine to operate on 100% hydrogen in an Australian project.* <https://www.turbomachinerymag.com/view/gas-turbine-to-operate-on-100-hydrogen-in-australian-project>
- [56] *Análisis del Censo de Proyectos.* (2023). Agencia Española del Hidrógeno. [https://www.aeh2.org/wp-content/uploads/2023/07/AeH2\\_Informe-Censo-de-Proyectos.pdf](https://www.aeh2.org/wp-content/uploads/2023/07/AeH2_Informe-Censo-de-Proyectos.pdf)
- [57] *Hoja de Ruta del Hidrógeno. Una apuesta por el hidrógeno renovable.* (2020). Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. [https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/hoja\\_de\\_ruta\\_del\\_hidrogeno.pdf](https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf)
- [58] *Implementing fuel cells and Hydrogen technologies in PORTS.* (2018). Centro Nacional del Hidrógeno. <https://www.cnh2.es/cnh2/h2ports/>
- [59] *Desarrollo de tecnología fotoelectroquímica para la producción de hidrógeno.* (2020). REPSOL S.A. [https://www.repsol.com/imagenes/global/es/proyecto-sun2hy-cofinanciado-feder\\_tcm13-212744.pdf](https://www.repsol.com/imagenes/global/es/proyecto-sun2hy-cofinanciado-feder_tcm13-212744.pdf)
- [60] *Proyecto SeaFuel.* (2021). SeaFuel. <https://www.seafuel.eu/es/el-proyecto/>
- [61] *Acerca del proyecto GreenHysland.* (2021). GreenHysland. <https://greenhysland.eu/acerca-de-green-hysland/>
- [62] Alcalde, S. (2022). *Estos son los principales proyectos para producir hidrógeno verde en España.* [https://www.nationalgeographic.com.es/economia-circular/estos-son-principales-proyectos-para-producir-hidrogeno-verde-espana\\_18710](https://www.nationalgeographic.com.es/economia-circular/estos-son-principales-proyectos-para-producir-hidrogeno-verde-espana_18710)
- [63] Automoción, M. C. (2023). *El proyecto de hidrógeno verde de IVECO recibirá 27 millones de euros.* <https://www.mcautomocion.es/proyecto-poseidon-iveco/>

[64] *El Gobierno concede ayudas de 74 millones a cuatro proyectos de hidrógeno en España.* (2023). Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.

[https://www.miteco.gob.es/es/prensa/230110\\_ndpeigobiernoconcede74millonesdeeurosacuatroproyectosdehidrogenoenespana\\_tcm30-550162.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/230110_ndpeigobiernoconcede74millonesdeeurosacuatroproyectosdehidrogenoenespana_tcm30-550162.pdf)

[65] *The Future of Hydrogen.* (2019). IEA.

[https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The\\_Future\\_of\\_Hydrogen.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf)

[66] Palacios, M. P. (2020). *Procesos de obtención de hidrógeno y sus posibilidades presentes y futuras.*

<https://es.linkedin.com/pulse/procesos-de-obtenci%C3%B3n-hidr%C3%B3geno-y-sus-posibilidades-manuel>

[67] Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F., & Servili, S. (2008). *Hydrogen production through sorption-enhanced steam methane reforming and membrane Technology: a review.* Energy, 33(4), 554-570.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.10.018>

[68] Garcia, G., Arriola, E., Chen, W., & De Luna, M. D. (2021). *A Comprehensive review of hydrogen production from methanol Thermochemical Conversion for Sustainability.* Energy, 217, 119384.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119384>

[69] Pal, D. B., Chand, R., Upadhyay, S., & Mishra, P. (2018). *Performance of Water Gas Shift Reaction Catalysts: A review.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 93, 549-565.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.003>

[70] Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., & Dincer, I. (2021). *A Comprehensive Review on Hydrogen production from coal gasification: Challenges and opportunities.* International Journal of Hydrogen Energy, 46 (50), 25385-25412.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088>

[71] González, A. (2019). *Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno.*

[http://www2.udg.edu/Portals/88/proc\\_industrials/5%20-%20Otros%20Combustibles-Hidrogeno.pdf](http://www2.udg.edu/Portals/88/proc_industrials/5%20-%20Otros%20Combustibles-Hidrogeno.pdf)

[72] Cao, L., Yu, I. K., Xiong, X., Tsang, D. C., Zhang, S., Clark, J. H., Hu, C., Ng, Y. H., Shang, J., & Ok, Y. S. (2020). *Biorenewable hydrogen production through biomass Gasification: A review and future prospects.* Environmental Research, 186, 109547.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109547>

- [73] Al Messer, M. y otros (2015). *Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis*. [https://www.researchgate.net/profile/Hamid-Naseem/publication/273125977\\_Hydrogen\\_Production\\_by\\_Water\\_Electrolysis\\_A\\_Review\\_of\\_Alkaline\\_Water\\_Electrolysis\\_PEM\\_Water\\_Electrolysis\\_and\\_High\\_Temperature\\_Water\\_Electrolysis/links/54f81010cf28d6dec9fec25/Hydrogen-Production-by-Water-Electrolysis-A-Review-of-Alkaline-Water-Electrolysis-PEM-Water-Electrolysis-and-High-Temperature-Water-Electrolysis.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hamid-Naseem/publication/273125977_Hydrogen_Production_by_Water_Electrolysis_A_Review_of_Alkaline_Water_Electrolysis_PEM_Water_Electrolysis_and_High_Temperature_Water_Electrolysis/links/54f81010cf28d6dec9fec25/Hydrogen-Production-by-Water-Electrolysis-A-Review-of-Alkaline-Water-Electrolysis-PEM-Water-Electrolysis-and-High-Temperature-Water-Electrolysis.pdf)
- [74] *What is an Electrolyzer and What is it Used for?* (2023). Accelera. <https://www.cummins.com/news/2020/11/16/electrolyzers-101-what-they-are-how-they-work-and-where-they-fit-green-economy>
- [75] Albistur, A. (2022). *Diseño y evaluación de electrolizadores basado en membrana de intercambio aniónico (AEM)*. [https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/43529/Ainhua\\_Albistur\\_Ahechu\\_TFM.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/43529/Ainhua_Albistur_Ahechu_TFM.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [76] *Ciclos termoquímicos de división del agua: una tecnología prometedora para convertir la luz solar y el calor residual en hidrógeno verde*. (2022). CIC energiGUNE. <https://cicenergigune.com/es/blog/twsc-ciclos-termoquimicos-division-agua-convertir-luz-solar-y-calor-residual-hidrogeno-verde>
- [77] *Hydrogen production: thermochemical water splitting*. (s. f.). Energy.gov. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- [78] De Benito, J. L. (2021). *Fotoelectrocatalisis, la nueva tecnología para producir hidrógeno verde*. Hidrógeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/fotoelectrocatalisis-tecnologia-para-producir-hidrogeno-verde/>
- [79] SEDIGAS. Asociación Española del Gas. (s. f.). *Sunrgyze, un proyecto pionero para la generación de hidrógeno renovable*. SEDIGAS. <https://www.sedigas.es/new/gas-actual/articulo-reportaje/sunrgyze-un-proyecto-pionero-para-la-generacion-de-hidrogeno-renovable>
- [80] Pérez, I. (2020). *Producción de Hidrógeno a Alta Temperatura*. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/93255/fichero/TFG-3255+P%C3%89REZ+POZUELO%2C+ISABEL+MAR%C3%8DA.pdf>
- [81] Oliveira, J. (2022). *Puesto en servicio el Suiso Frontier, el primer buque de transporte de hidrógeno líquido (LH2)*. <https://vadebarcos.net/2022/02/19/puesto-en-servicio-el-suiso-frontier-el-primer-buque-de-transporte-de-hidrogeno-liquido-lh2/>

- [82] Pezzi, S. (2022). *Del gris al verde, los colores del hidrógeno*. Good New Energy. <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores>
- [83] Pérez, A. (2022). *Las mil caras del hidrógeno: del color marrón al dorado*. elEconomista.es. <https://www.economista.es/energia/noticias/11813705/06/22/Las-mil-caras-del-hidrogeno-del-color-marron-al-dorado.html>
- [84] Morante, J y otros (2021). *Hidrógeno Vector energético de una economía descarbonizada*. [https://www.researchgate.net/publication/355477614\\_Hidrogeno\\_Vector\\_energetico\\_de\\_una\\_economia\\_descarbonizada](https://www.researchgate.net/publication/355477614_Hidrogeno_Vector_energetico_de_una_economia_descarbonizada)
- [85] Oliveira, J. (2022). *Puesto en servicio el Suiso Frontier, el primer buque de transporte de hidrógeno líquido (LH2)*. <https://vadebarcos.net/2022/02/19/puesto-en-servicio-el-suiso-frontier-el-primer-buque-de-transporte-de-hidrogeno-liquido-lh2/>
- [86] De Aragón, E. P. (2023). *La aragonesa Calvera diseña el mayor tube trailer de hidrógeno del mundo*. El Periódico de Aragón. <https://www.elperiodicodearagon.com/aragon/2023/02/09/aragonesa-calvera-disena-mayor-tubo-82710146.html>
- [87] *The European Hydrogen Backbone (EHB) Initiative*. (2022). European Hydrogen Backbone. <https://ehb.eu/>
- [88] *Oportunidades del hidrógeno para la cogeneración*. (2021). Interempresas. <https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/356794-Oportunidades-del-hidrogeno-para-la-cogeneracion.html>
- [89] Rodríguez, J. (2021). *Cogeneración con hidrógeno, cada vez más cerca*. El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/cogeneracion-con-hidrogeno-cada-vez-mas-cerca/>
- [90] Hernández, I. A. (2021). *El camino hacia la descarbonización de las centrales térmicas en Canarias*. El Diario. [https://www.eldiario.es/canariasahora/energia/camino-descarbonizacion-centrales-termicas-canarias\\_1\\_7935488.html](https://www.eldiario.es/canariasahora/energia/camino-descarbonizacion-centrales-termicas-canarias_1_7935488.html)
- [91] *Estrategia de la generación gestionable de Canarias (edición v1)*. (2022). Dirección General de Energía del Gobierno de Canarias. [https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/images/Documentos/Estudios/D4\\_Estrategia\\_Generaci%C3%B3n\\_Gestionable.pdf](https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/images/Documentos/Estudios/D4_Estrategia_Generaci%C3%B3n_Gestionable.pdf)

[92] *Endesa ya no generará más electricidad con fuel en las islas Baleares - Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias.* (2022). Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias.

<https://www.energias-renovables.com/panorama/endesa-ya-no-generara-mas-electricidad-con-20220905>

[93] Cappelletti, A., & Martelli, F. (2017). *Investigation of a pure hydrogen fueled gas turbine burner.* International Journal of Hydrogen Energy, 42(15), 10513-10523.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.104>

[94] Gahleitner, G. (2013). *Hydrogen from Renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications.* International Journal of Hydrogen Energy, 38 (5), 2039-2061.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.010>

[95] Roca, J. A. (2023). *Proyecto HyFlexPower: generan electricidad con una turbina tras mezclar 70% de gas y 30% de hidrógeno.* El Periódico de la Energía.

<https://elperiodicodelaenergia.com/proyecto-hyflexpower-generan-electricidad-a-partir-de-hidrogeno-en-una-planta-francesa-de-smurfit-kappa/>

[96] *H2PORTS - CLEAN HYDROGEN PARTNERSHIP.* (2022). H2PORTS.

<https://h2ports.eu/>

[97] Chintala, V., & Subramanian, K. (2017). *A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 70, 472-491.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.247>

[98] Teoh, Y. H., How, H. G., Le, T. D., Nguyen, H. T. T., Loo, D. L., Rashid, T., & Sher, F. (2023). *A review on production and implementation of hydrogen as a green fuel in internal combustion engines.* Fuel, 333, 126525.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126525>

[99] Reşitoğlu, İ. A., Altinişik, K., & Keskin, A. (2014). *The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems.* Clean Technologies and Environmental Policy, 17 (1), 15-27.

<https://doi.org/10.1007/s10098-014-0793-9>

[100] Dimitriou, P., & Tsujimura, T. (2017). *A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel.* International Journal of Hydrogen Energy, 42 (38), 24470-24486.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232>

- [101] Frankel, A. (2022). *Volvo boss predicts the death of diesel*. Autocar.  
<https://www.autocar.co.uk/car-news/motor-shows-geneva-motor-show/volvo-boss-predicts-death-diesel>
- [102] Chintala, V., & Subramanian, K. (2014). *Assessment of maximum available work of a hydrogen fueled compression ignition engine using exergy analysis*. *Energy*, 67, 162-175.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.094>
- [103] *EU CO<sub>2</sub> emission standards for passenger cars and light-commercial vehicles*. (2014). International Council On Clean Transportation.  
[https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate\\_EU-95gram\\_jan2014.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_EU-95gram_jan2014.pdf)
- [104] Shadidi, B., Najafi, G., & Yusaf, T. (2021). *A review of hydrogen as a fuel in internal combustion engines*. *Energies*, 14 (19), 6209.  
<https://doi.org/10.3390/en14196209>
- [105] Alrazen, H. A., Talib, A., Adnan, R., & Ahmad, K. A. (2016). *A review of the effect of hydrogen addition on the performance and emissions of the compression – ignition engine*. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 54, 785-796.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.088>
- [106] Liew, C., Li, H., Nuszowski, J., Liu, S., Gatts, T., Atkinson, R. J., & Clark, N. N. (2010b). *An experimental investigation of the combustion process of a heavy-duty diesel engine enriched with H<sub>2</sub>*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (20), 11357-11365.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.023>
- [107] De Morais, A. M., Justino, M. A. M., Valente, O. S., De Morais Hanriot, S., & Sodré, J. R. (2013). *Hydrogen impacts on performance and CO<sub>2</sub> emissions from a diesel power generator*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (16), 6857-6864.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.119>
- [108] Varuvel, E. G., Nagarajan, G., & Nagalingam, B. (2008). *Studies on dual fuel operation of rubber seed oil and its bio-diesel with hydrogen as the inducted fuel*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(21), 6357-6367.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.021>
- [109] Chintala, V., & Subramanian, K. (2015). *Experimental investigations on effect of different compression ratios on enhancement of maximum hydrogen energy share in a compression ignition engine under dual-fuel mode*. *Energy*, 87, 448-462.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.014>

- [110] Kumar, M. S. (2003). *Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine*. International Journal of Hydrogen Energy. [https://doi.org/10.1016/s0360-3199\(02\)00234-3](https://doi.org/10.1016/s0360-3199(02)00234-3)
- [111] Agarwal, D., Singh, S. K., & Agarwal, A. K. (2011). *Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine*. Applied Energy, 88 (8), 2900-2907. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.066>
- [112] Maiboom, A., Tauzia, X., & Hetet, J. (2008). *Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine*. Energy, 33 (1), 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.08.010>
- [113] Hountalas, D. T., Mavropoulos, G. C., & Binder, K. (2008). *Effect of exhaust gas recirculation (EGR) temperature for various EGR rates on heavy duty DI diesel engine performance and emissions*. Energy, 33 (2), 272-283. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.07.002>
- [114] Banerjee, R., Roy, S., & Bose, P. K. (2015). *Hydrogen-EGR synergy as a promising pathway to meet the PM–NOX–BSFC trade-off contingencies of the diesel engine: A Comprehensive Review*. International Journal of Hydrogen Energy, 40 (37), 12824-12847. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.098>
- [115] Govindan, N. (2010). *An experimental investigation on hydrogen fuel injection in intake port and manifold with different EGR rates*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/44024825\\_An\\_experimental\\_investigation\\_on\\_hydrogen\\_fuel\\_injection\\_in\\_intake\\_port\\_and\\_manifold\\_with\\_different\\_EGR\\_rates](https://www.researchgate.net/publication/44024825_An_experimental_investigation_on_hydrogen_fuel_injection_in_intake_port_and_manifold_with_different_EGR_rates)
- [116] Chintala, V., & Subramanian, K. (2014). *Hydrogen energy share improvement along with NOX (oxides of nitrogen) emission reduction in a hydrogen dual-fuel compression ignition engine using water injection*. Energy Conversion and Management, 83, 249-259. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.075>
- [117] Serrano, J. J., Aguilar, F. J. J., Lora, A. T., Modesto-López, L. B., Gañán-Calvo, A. M., & López-Serrano, J. (2019). *Experimental analysis of NOX reduction through water addition and comparison with exhaust gas recycling*. Energy, 168, 737-752. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.136>
- [118] Tauzia, X., Maiboom, A., & Shah, S. R. (2010). *Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine*. Energy, 35 (9), 3628-3639. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.007>

- [119] Şahin, Z., Tuti, M., & Durgun, O. (2014). *Experimental investigation of the effects of water adding to the intake air on the engine performance and exhaust emissions in a DI automotive diesel engine*. *Fuel*, 115, 884-895.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.080>
- [120] Mathur, H. B., Das, L., & Patro, T. (1993). *Hydrogen-fuelled diesel engine: performance improvement through charge dilution techniques*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18 (5), 421-431.  
[https://doi.org/10.1016/0360-3199\(93\)90221-u](https://doi.org/10.1016/0360-3199(93)90221-u)
- [121] Prabhukumar, G. P., Swaminathan, S., Nagalingam, B., & Gopalakrishnan, K. V. (1987). *Water induction studies in a hydrogen-diesel dual-fuel engine*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 12(3), 177-186.  
[https://doi.org/10.1016/0360-3199\(87\)90151-0](https://doi.org/10.1016/0360-3199(87)90151-0)
- [122] Chintala, V., & Subramanian, K. (2016). *Experimental investigation of hydrogen energy share improvement in a compression ignition engine using water injection and compression ratio reduction*. *Energy Conversion and Management*, 108, 106-119.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.069>
- [123] Serrano, J. J., Aguilar, F. J. J., & Lopez, A. J. (2021). *Prediction of hydrogen-heavy fuel combustion process with water addition in an adapted low speed two stroke diesel engine: performance improvement*. *Applied Thermal Engineering*, 195, 117250.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117250>
- [124] Fernández-Ríos, A., Santos, G., Pinedo, J. L., Santos, E., Ruiz-Salmón, I., Laso, J., Lyne, A., Ortiz, A., Ortiz, I., Irabien, A., Aldaco, R., & Margallo, M. (2022). *Environmental sustainability of alternative marine propulsion technologies powered by hydrogen - a life cycle assessment approach*. *Science of The Total Environment*, 820, 153189.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153189>
- [125] Ampah, J. D., Yusuf, A. A., Afrane, S., Jin, C., & Liu, H. (2021). *Reviewing Two decades of Cleaner Alternative Marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector*. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128871.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128871>
- [126] *Decarbonising Maritime Transport: The EU perspective*. European Parliament. (2020). European Parliament.  
[https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS\\_BRI\(2020\)659296](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2020)659296)
- [127] Endresen, Ø., Sjørgård, E., Sundet, J. K., Dalsøren, S. B., Isaksen, I. S. A., Berglen, T. F., & Gravir, G. (2003). *Emission from international sea transportation and environmental impact*. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D17).  
<https://doi.org/10.1029/2002jd002898>

[128] *IMO Marine Engine Regulations*. (2023). Emission Standards. <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php>

[129] *El Convenio MARPOL 73/78*. (2022). Ingeniero Marino. [https://ingenieromarino.com/el-convenio-marpol-7378/#326-Anexo VI Reglas para Prevenir la Contaminacion Atmosferica Ocasionada por los Buques](https://ingenieromarino.com/el-convenio-marpol-7378/#326-Anexo_VI_Reglas_para_Prevenir_la_Contaminacion_Atmosferica_Ocasionada_por_los_Buques)

[130] Beth Bradley. (2020). *Decarbonisation and Shipping: International Maritime Organization Ambitions and measures*. Hill Dickinson. <https://www.hilldickinson.com/insights/articles/decarbonisation-and-shipping-international-maritime-organization-ambitions-and>

[131] *Improving the energy efficiency of ships*. (2022). OMI. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx>

[132] *La labor de la OMI para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero*. (2023). OMI. <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>

[133] Mallouppas, G., & Yfantis, E. A. (2021). *Decarbonization in Shipping Industry: A review of research, technology development, and innovation proposals*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), 415. <https://doi.org/10.3390/jmse9040415>.

[134] Ampah, J. D., Yusuf, A. A., Afrane, S., Jin, C., & Liu, H. (2021). *Reviewing Two decades of Cleaner Alternative Marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector*. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128871>

[135] *IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships*. (2023). OMI. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IMO-Strategy-on-reduction-of-GHG-emissions-from-ships.aspx>

[136] Torres, J. D. (2022). *El medio ambiente y las rutas marítimas: punto clave en la cumbre climática COP 27*. INTERWORLD GROUP. <http://www.iwglogistics.com/iwg/medio-ambiente-las-rutas-maritimas-punto-clave-la-cumbre-climatica-cop-27/>

[137] *Importante compromiso marítimo en la Cumbre Climática COP 27*. (2022). FullAvanteNews. <https://fullavantenews.com/importante-compromiso-maritimo-en-la-cumbre-climatica-cop27/?lang=es>

[138] *Infografía - «Objetivo 55»: promover la utilización de combustibles más ecológicos en los sectores marítimo y de la aviación.* (2023). Consejo de la Unión Europea.  
<https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/fit-for-55-refueu-and-fueu/>

[139] *How hydrogen can help decarbonise the maritime sector.* (2021). Hydrogen Europe.  
[https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/How-hydrogen-can-help-decarbonise-the-maritime-sector\\_final.pdf](https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/How-hydrogen-can-help-decarbonise-the-maritime-sector_final.pdf)

[140] *Fourth IMO Greenhouse Gas Study.* (2020). OMI.  
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>

[141] Pan, H., Pournazeri, S., Princevac, M., Miller, J. W., Mahalingam, S., Khan, M. Y., Jayaram, V., & Welch, W. D. (2014). *Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine.* *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (21), 11336-11345.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.010>

[142] R. Ammar. (2018). *Energy Efficiency and Environmental Analysis of the Green-Hydrogen Fueled Slow Speed Marine Diesel Engine.* *International Journal of Multidisciplinary and Current Research.*  
<http://ijmcr.com/wp-content/uploads/2018/11/Paper101347-1356.pdf>

[143] Radica, G., Mrakovčić, T., Račić, N., Jelić, M., Lalić, B. (2021). *Marine engines running on hydrogen additive in diesel fuel for emission reduction.* *IEEE Xplore.*  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9566431>

[144] Gholami, A., Jazayeri, S. A., & Esmaili, Q. (2022). A detail performance and CO2 emission analysis of a very large crude carrier propulsion system with the main engine running on dual fuel mode using hydrogen/diesel versus natural gas/diesel and conventional diesel engines. *Chemical Engineering Research & Design*, 163, 621-635.  
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.069>

[145] Mallouppas, G., Yfantis, E. A., Frantzis, C., Zannis, T. C., & Savva, P. G. (2022). *The effect of hydrogen addition on the pollutant emissions of a marine internal combustion engine genset.* *Energies*, 15(19), 7206.  
<https://doi.org/10.3390/en15197206>

[146] Serrano, J. J., Aguilar, F. J. J., & López, A. J. (2021). *Prediction of hydrogen-heavy fuel combustion process with water addition in an adapted low speed two stroke diesel engine: performance improvement.* *Applied Thermal Engineering*, 195, 117250.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117250>

[147] Tan, D., Wu, Y., Lv, J., Li, J., Ou, X., Meng, Y., Lan, G., Chen, Y., & Zhang, Z. (2023). *Performance optimization of a diesel engine fueled with hydrogen/biodiesel with water addition based on the response surface methodology*. Energy, 263, 125869.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125869>

[148] *Por primera vez en el mundo un motor Wärtsilä opera comercialmente con combustible con un 25% de volumen de hidrógeno*. (2023). Wärtsilä.  
<https://www.wartsila.com/esp/home/23-03-2023-por-primera-vez-en-el-mundo-un-motor-wartsila-opera-comercialmente-con-combustible-con-un-25-de-volumen-de-hidrogeno>

[149] Vanguardia, L. (2022). Así es el Hydro Bingo, el barco de pasajeros híbrido alimentado con hidrógeno y diésel. *La Vanguardia*.  
<https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20221021/8576181/hydro-bingo-barco-pasajeros-hibrido-alimentado-hidrogeno-diesel.html#foto-4>

[150] Gutiérrez, D. (2022). MAN presenta un motor «dual» que funciona con diésel e hidrógeno y emite un 50% menos CO<sub>2</sub>. *Híbridos y Eléctricos*.  
[https://www.hibridosyelectricos.com/coches/man-presenta-motor-dual-capaz-funcionar-diesel-hidrogeno\\_58852\\_102.html](https://www.hibridosyelectricos.com/coches/man-presenta-motor-dual-capaz-funcionar-diesel-hidrogeno_58852_102.html)

[151] CMB.TECH. (2022). *First hydrogen-powered CTV: Hydrocat 48 | CMB.TECH*.  
<https://cmb.tech/news/windcat-workboats-cmb-tech-present-the-first-hydrogen-powered-crew-transfer-vessel-ctv-the-hydrocat-48-ready-for-immediate-operation>

[152] Mendoza, I. (2023). *Ya hay un ferry quemando hidrógeno líquido en Noruega, y eso es una buena noticia para todos*. Motorpasión.  
<https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/propulsar-cohetes-espaciales-a-barcos-primer-ferry-movido-hidrogeno-liquido-esta-operativo-noruega>

[153] Prego, C. (2023). *Noruega ha estrenado el primer ferry propulsado por hidrógeno líquido*. Xataka.  
<https://www.xataka.com/movilidad/noruega-ha-estrenado-primer-ferri-propulsado-hidrogeno-liquido-paso-gigante-para-sector>

[154] Oliveira, J. A. (2022). *El MF Hydra, el primer ferry propulsado por hidrógeno, Ship of the Year del 2021 en Noruega*. VA DE BARCOS.  
<https://vadebarcos.net/2021/09/25/el-mf-hydra-el-primer-ferry-propulsado-por-hidrogeno-ship-of-the-year-del-2020-en-noruega/>

[155] Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S. W., & Lenaerts, S. (2021). *Challenges in the use of hydrogen for maritime applications*. Energy and Environmental Science, 14(2), 815-843.  
<https://doi.org/10.1039/d0ee01545h>

[156] Panić, I., Cuculić, A., & Čelić, J. (2022). *Color-Coded hydrogen: Production and storage in the maritime sector*. Journal of Marine Science and Engineering, 10(12), 1995.  
<https://doi.org/10.3390/jmse10121995>

[157] Inal, O. B., Dere, Ç., & Deniz, C. (2021) *Onboard hydrogen storage for ships: An overview*. In Proceedings of the Fifth International Hydrogen Technologies Congress, Online (pp. 26-28).  
[https://www.researchgate.net/profile/Omer-Inal/publication/351982637\\_Onboard\\_Hydrogen\\_Storage\\_for\\_Ships\\_An\\_Overview/links/63e7a6486425237563a6aced/Onboard-Hydrogen-Storage-for-Ships-An-Overview.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Omer-Inal/publication/351982637_Onboard_Hydrogen_Storage_for_Ships_An_Overview/links/63e7a6486425237563a6aced/Onboard-Hydrogen-Storage-for-Ships-An-Overview.pdf)

[158] ¿Qué es el bunkering? (2022). Naturgy.  
[https://www.naturgy.es/hogar/blog/que\\_es\\_el\\_bunkering](https://www.naturgy.es/hogar/blog/que_es_el_bunkering)

[159] *A pathway to decarbonise the shipping sector*. (2021). IRENA.  
[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Oct/IRENA\\_Decarbonising\\_Shipping\\_2021.pdf?rev=b5dfda5f69e741a4970680a5ced1ac1e](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Oct/IRENA_Decarbonising_Shipping_2021.pdf?rev=b5dfda5f69e741a4970680a5ced1ac1e)

[160] *Decarbonising maritime transport: The EU perspective*. (2020). European Parliament.  
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/659296/EPRS\\_BRI\(2020\)659296\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/659296/EPRS_BRI(2020)659296_EN.pdf)

[161] *Comparison of Alternative Marine Fuels*. (2019). DNV.GL  
[https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2020/04/Alternative-Marine-Fuels-Study\\_final\\_report\\_25.09.19.pdf](https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2020/04/Alternative-Marine-Fuels-Study_final_report_25.09.19.pdf)

[162] *ONE lleva a cabo una exitosa prueba de biocombustible en el "M/V MOL Experience"*. (2021).  
<https://www.mundomaritimo.cl/noticias/one-lleva-a-cabo-exitosa-prueba-de-biocombustible-en-el-mv-mol-experience>

[163] Jiang, J., & Jiang, J. (2020). ESL Shipping adopts biogas fuel for bulk carrier. *Splash247*.  
<https://splash247.com/esl-shipping-adopts-biogas-fuel-for-bulk-carrier/>

[164] Digital, E. E. (2023). El primer buque portacontenedores impulsado por metanol verde de Maersk, ya se encuentra en Europa. *El Estrecho Digital*.  
<https://www.elestrechodigital.com/2023/08/31/el-primer-buque-portacontenedores-impulsado-por-metanol-verde-de-maersk-ya-se-encuentra-en-europa/>

[165] *Qué son los combustibles sintéticos y cómo se producen*. (2024). Repsol.  
<https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/movilidad-sostenible/combustibles-cero-emisiones-netas/index.cshtml>

[166] Gutiérrez, D. (2023) *El combustible del futuro no viene del petróleo, pero producirlo es extremadamente ineficiente*. Híbridos y Eléctricos.  
[https://www.hibridosyelectricos.com/coches/que-son-combustibles-sinteticos-como-se-obtienen\\_68873\\_102.html](https://www.hibridosyelectricos.com/coches/que-son-combustibles-sinteticos-como-se-obtienen_68873_102.html)

[167] Boxcar-Admin. (2021) *E-fuels won't save the internal combustion engine*. International Council on Clean Transportation.  
<https://theicct.org/e-fuels-wont-save-the-internal-combustion-engine/>

[168] Xing, H., Stuart, C. A., Spence, S., & Chen, H. (2021). Alternative fuel options for low carbon Maritime Transportation: Pathways to 2050. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126651.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>

[169] *Raízen y Wärtsilä investigarán el etanol marino en Brasil*. (2023). H2 Business News.  
<https://h2businessnews.com/raizen-y-wartsila-investigaran-el-etanol-marino-en-brasil/>

[170] *Empresas firman acuerdo para barcos propulsados por etanol*. (2023). A Lavoura.  
<https://alavoura.com.br/es/colunas/panorama/empresas-assinam-acordo-para-navios-movidos-a-etanol/>