

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estado del arte del hidrógeno verde

Autor: Begoña Piñero Quintana

Tutor: Luis Perez-Lombard Martín De Oliva

**Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Grado
en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estado del arte del hidrógeno verde

Autor:

Begoña Piñero Quintana

Tutor:

Luis Perez-Lombard Martín De Oliva

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Grado: Estado del arte del hidrógeno verde

Autor: Begoña Piñero Quintana

Tutor: Luis Perez-Lombard Martín de Oliva

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mi tutor

Agradecimientos

Al llegar al final de esta etapa universitaria, me gustaría expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que me han acompañado y apoyado a lo largo del camino.

A mi familia, por su constante apoyo, comprensión y aliento en los momentos más exigentes. A mis amigos y compañeros, por su compañía, por las horas compartidas de estudio y por todos los momentos que hicieron más llevadero este proceso.

Agradezco también a todos los profesores que han contribuido a mi formación, y muy especialmente a mi tutor, Luis Perez-Lombard Martín de Oliva, por su dedicación, orientación y paciencia durante el desarrollo de este trabajo. Su guía ha sido clave para completar con éxito este proyecto.

A todos, gracias por estar ahí y ser parte de este logro.

Begoña Piñero Quintana

Sevilla, 2025

Resumen

Este documento analiza el papel del hidrógeno verde como vector energético en el marco de la transición hacia un sistema energético sostenible y descarbonizado. Partiendo de una revisión del contexto energético global y del rol que desempeña el hidrógeno frente a otras alternativas, se estudian los diferentes tipos de hidrógeno, con especial atención al producido mediante electrólisis del agua a partir de energías renovables.

Se abordan las principales tecnologías de producción, sus características, ventajas y limitaciones, así como aspectos críticos relacionados con el almacenamiento, el transporte y las infraestructuras necesarias para su implementación. Asimismo, se examinan la situación actual de la oferta y la demanda de hidrógeno bajo en emisiones y las proyecciones de crecimiento futuro.

Finalmente, se identifican los retos técnicos, económicos, regulatorios y sociales que condicionan la consolidación del hidrógeno verde, así como las oportunidades que ofrece en términos de innovación tecnológica, competitividad industrial y seguridad energética. El estudio concluye que, aunque existen barreras relevantes, el hidrógeno verde se perfila como un elemento estratégico para avanzar en la descarbonización y la diversificación energética a nivel global.

Abstract

This document analyzes the role of green hydrogen as an energy vector within the transition towards a sustainable and decarbonized energy system. Starting from a review of the global energy context and the position of hydrogen compared to other alternatives, the study examines the different types of hydrogen, with special focus on that produced through water electrolysis powered by renewable energy sources.

The research explores the main production technologies, their characteristics, advantages, and limitations, as well as critical aspects related to storage, transportation, and the infrastructures required for large-scale deployment. In addition, it assesses the current state of supply and demand for low-emission hydrogen and the future growth prospects.

Finally, the study identifies the technical, economic, regulatory, and social challenges that shape the development of green hydrogen, as well as the opportunities it offers in terms of technological innovation, industrial competitiveness, and energy security. The findings suggest that, despite existing barriers, green hydrogen is emerging as a strategic element to advance global decarbonization and energy diversification.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xviii
Índice de Gráficos	xix
Notación	xx
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivos y alcance</i>	1
1.2 <i>Metodología</i>	2
2 Contexto energético actual	3
3 El hidrógeno como vector energético	6
3.1 <i>Tipos de hidrógeno</i>	6
3.1.1 Hidrógeno a partir de Combustibles Fósiles	6
3.1.2 Hidrógeno a partir de Fuentes No Contaminantes	8
3.1.3 Hidrógeno de Origen Natural	8
3.1.4 Otros Tipos	9
3.2 <i>Aplicaciones del Hidrógeno</i>	9
3.2.1 Aplicaciones actuales	10
3.2.2 Aplicaciones futuras y tecnologías habilitadoras	11
4 El hidrógeno verde	13
4.1 <i>Tecnologías de electrólisis del agua</i>	14
4.1.1 Electrólisis Alcalina del Agua (AWE)	14
4.1.2 Electrólisis del Agua con Membrana de Intercambio Protónico (PEM)	15
4.1.3 Electrólisis del Agua con Membrana de Intercambio Aniónico (AEM)	16
4.1.4 Electrólisis de Óxido Sólido del Agua (SOEC)	17
4.2 <i>Características Principales del Hidrógeno Verde</i>	19
4.2.1 Sostenibilidad Ambiental	19
4.2.2 Capacidad de Almacenamiento	19
4.2.3 Transporte del Hidrógeno	23
4.2.4 Infraestructuras y Puertos	26
5 Presente del hidrógeno verde	28
5.1 <i>Demanda Global y Aplicaciones Actuales</i>	28
5.2 <i>Oferta Actual de Hidrógeno Bajo en Emisiones</i>	30
6 Futuro del hidrógeno verde	32
6.1 <i>Perspectivas de Crecimiento General</i>	32

6.2	<i>Oferta a Futuro</i>	32
6.3	<i>Demanda a Futuro</i>	33
7	Retos y perspectivas	35
7.1	<i>Retos Actuales y Futuros</i>	35
7.1.1	Barreras Económicas y de Mercado	35
7.1.2	Desafíos Tecnológicos y de Escalado	35
7.1.3	Desafíos de Infraestructura y Logística	35
7.1.4	Consideraciones Regulatorias y Ambientales	36
7.1.5	Riesgos Sociales y de Aceptación	36
7.2	<i>Perspectivas y Oportunidades</i>	36
7.2.1	Crecimiento Previsto y Disminución de Costos	36
7.2.2	Progresos Tecnológicos e Innovaciones	36
7.2.3	Respaldo Político y Estructuras Regulatorias	36
7.2.4	Oportunidades de Demanda Sectorial	37
7.2.5	Potencial Geográfico y Comercio Internacional	37
7.2.6	Inversión y Financiación Estratégica	37
8	Conclusiones	38
	Referencias	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Comparativa entre electrolizadores

18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Hidrógeno Gris Vs Hidrógeno Azul, [7]	7
Figura 2: Hidrógeno verde, [7]	8
Figura 3: Colores según el origen del hidrógeno, [11]	9
Figura 4: Cadena de valores del hidrógeno [12]	10
Figura 5: Producción y aplicaciones del hidrógeno. [13]	11
Figura 6: Estación de repostaje de hidrógeno para autobuses en Madrid, España. [14]	12
Figura 7: Proceso de electrolisis [17]	13
Figura 8: Electrólisis alcalina [18]	15
Figura 9: Electrólisis PEM [18]	16
Figura 10: Electrólisis AEM [18]	17
Figura 11: Electrólisis SOEC [18]	18
Figura 13: Tanques tipo I, II, III, IV y V de almacenamiento de hidrógeno gaseoso. [20]	20
Figura 14: Tanque de almacenamiento de LH ₂ de forma esférica. [21]	21
Figura 16: Almacenamiento geológico. [21]	22
Figura 17: Gasoducto de Gas Natural. [22]	23
Figura 18: Transporte ferroviario de hidrógeno. [23]	24
Figura 19: "Tube trailer" para transporte de hidrógeno comprimido. [24]	25
Figura 20: Camión cisterna con hidrógeno verde líquido. [25]	25
Figura 21: Transporte marítimo de hidrógeno líquido. [26]	26
Figura 22: Puerto de Róterdam. [27]	27

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Tasas de crecimiento mundial clave, 2024.[1]	3
Gráfico 2: Cambio en la demanda energética por regiones seleccionadas, 2023-2024.[1]	4
Gráfico 3: Porcentaje de crecimiento global de la demanda energética por fuente, 2024.[1]	4
Gráfico 4: Uso del hidrógeno por región para refinación de petróleo [28]	28
Gráfico 5: Uso del hidrógeno en la industria por subsector [28]	29
Gráfico 6: Consumo de hidrógeno en el transporte por carretera por vehículos y región, 2019-2024. [28]	29
Gráfico 7: Producción de hidrógeno bajo en emisiones. [28]	30
Gráfico 8: Capacidad real de los electrolizadores instalados. [28]	30
Gráfico 9: Capacidad de fabricación de electrolizadores. [28]	31
Gráfico 10: Producción de hidrógeno con bajas emisiones a partir de proyectos anunciados para 2030. [28]	32
Gráfico 11: Capacidad anunciada de fabricación de electrolizadores para 2030. [28]	33
Gráfico 12: Proyectos de electrolizadores anunciados para 2030. [28]	33
Gráfico 13: Demanda de hidrógeno con bajas emisiones por sector en 2030, y en el escenario de políticas declaradas y el escenario de cero emisiones netas para 2050. [28]	34

Notación

EJ	Exajulio
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ O	Agua
H ₂	Hidrógeno
O ₂	Oxígeno
GN	Gas Natural
Kg	Kilogramos
NH ₃	Amoniac
AWE	Alkaline Water Electrolysis
PEM.	Proton Exchange Membrane
AEM	Anion Exchange Membrane
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cell
H ⁺	Iones de hidrógeno
e ⁻	Electrones
KOH	Hidróxido de potasio
NaOH	Hidróxido de sodio
OH ⁻	Iones de hidróxido
Mt	Megatoneladas
Eur/kg	Euros por kilogramo
MW	Megavatio
Mtoe	“Million Tonnes of Oil Equivalent” Millones de Toneladas de Equivalente de Petróleo
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
GDL	Gas to Liquids
PTL	Power to Liquids
LH ₂	Liquid Hydrogen
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier
€/MWh	Euros por Megavatio-hora
CGH ₂	Compressed Gas Hydrogen
Mtpa	“Million Tonnes per Annum” Millones de Toneladas por Año
Ktpa	“Kilo Tonnes per Annum” Miles de Toneladas por Año

1 INTRODUCCIÓN

El ámbito energético a nivel mundial está actualmente experimentando una transformación significativa, impulsada por la urgencia de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, diversificar las fuentes de energía y asegurar la estabilidad del suministro. En este contexto, la transición hacia un sistema energético más sostenible ha estimulado la investigación y el desarrollo de tecnologías que permitan reemplazar gradualmente los combustibles fósiles por energías renovables.

El hidrógeno, y en particular el llamado hidrógeno verde, se ha convertido en un elemento energético fundamental en este cambio. Su producción a través de la electrólisis del agua utilizando electricidad generada a partir de fuentes renovables lo posiciona como una alternativa con un gran potencial para lograr la descarbonización en sectores donde la electrificación directa es complicada, como el transporte pesado, la industria química y de acero, o el almacenamiento masivo de energía.

Este estudio pretende proporcionar una visión completa sobre la función del hidrógeno verde en el presente y futuro del sistema energético mundial, analizando sus métodos de producción, características principales, aplicaciones actuales y futuras, así como los desafíos y oportunidades que enfrenta para establecerse de manera firme.

1.1 Objetivos y alcance

El objetivo principal de este estudio es investigar la situación actual y las posibilidades de desarrollo del hidrógeno verde como vector energético, evaluando su factibilidad tecnológica, económica y medioambiental dentro del contexto de la transición energética.

Específicamente, los objetivos son:

- Describir el panorama energético global y el lugar del hidrógeno en este.
- Investigar las diferentes categorías de hidrógeno y resaltar las características del hidrógeno verde.
- Analizar las tecnologías de electrólisis más relevantes para su producción, junto con sus beneficios y limitaciones.
- Examinar las características que diferencian al hidrógeno verde en términos de sostenibilidad, almacenamiento, transporte e infraestructura asociada.
- Evaluar la situación actual de oferta y demanda a escala global.
- Investigar las perspectivas de crecimiento, desafíos existentes y oportunidades para el desarrollo futuro.

El enfoque de este estudio se centra en el hidrógeno verde como vector energético. Aunque se hace referencia a otros tipos de hidrógeno para proporcionar contexto, el análisis se restringe a los aspectos técnicos, económicos y estratégicos del hidrógeno producido mediante electrólisis utilizando energías renovables. El trabajo no incluye investigaciones experimentales o de laboratorio, sino que se basa en revisiones documentales, datos técnicos y proyecciones de organismos internacionales, académicos y de la industria.

1.2 Metodología

El enfoque utilizado en este estudio se fundamenta en una revisión de la literatura y un examen crítico de fuentes académicas, de organismos y del sector energético. Los procedimientos adoptados fueron:

1. Recopilación documental: obtención de datos a partir de artículos de investigación, informes de entidades internacionales (como la Agencia Internacional de Energía, IRENA o la Comisión Europea), publicaciones de organizaciones del sector y literatura técnica especializada.
2. Organización de la información: estructuración de los contenidos de acuerdo con las secciones establecidas en el índice, asegurando una presentación clara y ordenada.
3. Evaluación comparativa: análisis de las tecnologías para la producción de hidrógeno verde y su comparación con otros tipos de hidrógeno, tomando en cuenta su eficiencia, costos, sostenibilidad y nivel de desarrollo técnico.
4. Revisión de información actual y proyecciones: examen de la situación actual en relación con la oferta, demanda y aplicaciones, así como de los escenarios futuros previstos por diversas entidades.
5. Síntesis crítica: detección de desafíos, oportunidades y perspectivas, con el objetivo de ofrecer conclusiones que integren los aspectos técnicos, económicos y estratégicos del hidrógeno verde.

La investigación se llevó a cabo de manera cualitativa, respaldada por datos cuantitativos de fuentes secundarias fiables. No se llevaron a cabo experimentos originales ni modelos de simulación, sino un análisis comprensivo de la información disponible.

2 CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL

El contexto energético internacional se encuentra en un estado de considerable complejidad y cambio, marcado por la interacción de tensiones estructurales junto con oportunidades sin precedentes. A nivel mundial, los sistemas de energía enfrentan presiones originadas en factores que van desde los conflictos geopolíticos, como la guerra en Ucrania y las crecientes tensiones en Oriente Medio, una región crucial para el transporte de alrededor del 20% del suministro de petróleo y gas natural licuado, hasta las manifestaciones cada vez más evidentes del cambio climático. Estos factores han puesto de manifiesto la fragilidad de la seguridad energética convencional, evidenciando cómo la dependencia de los combustibles fósiles puede transformarse en amenazas inminentes, al tiempo que surgen nuevas vulnerabilidades en las cadenas de suministro de tecnologías limpias, que se encuentran altamente concentradas en un reducido número de participantes.

En este contexto, el concepto de seguridad energética ha ampliado considerablemente su significado. Ya no se trata solo de asegurar el acceso a combustibles fósiles, sino que también incluye la necesidad de garantizar precios asequibles, facilitar la transformación del sector eléctrico, fortalecer las cadenas de suministro de minerales esenciales y proteger las infraestructuras de los fenómenos climáticos extremos. La Agencia Internacional de la Energía enfatiza que estos retos no pueden separarse de la acción climática: avanzar hacia un sistema energético más limpio y eficaz es esencial para mitigar los riesgos estructurales de seguridad a largo plazo.[1]

A continuación, se detallan las principales tendencias que definen este contexto:

- **Aceleración de la Demanda Global de Energía:** En el año 2024, se observó un incremento del 2.2% en la demanda de energía a nivel mundial, superando el promedio que se había mantenido en la última década. El principal impulsor de este crecimiento fue el sector eléctrico, que experimentó un aumento del 4.3% debido a temperaturas extremas, la electrificación en el transporte, el uso industrial y la expansión de centros de datos e inteligencia artificial.

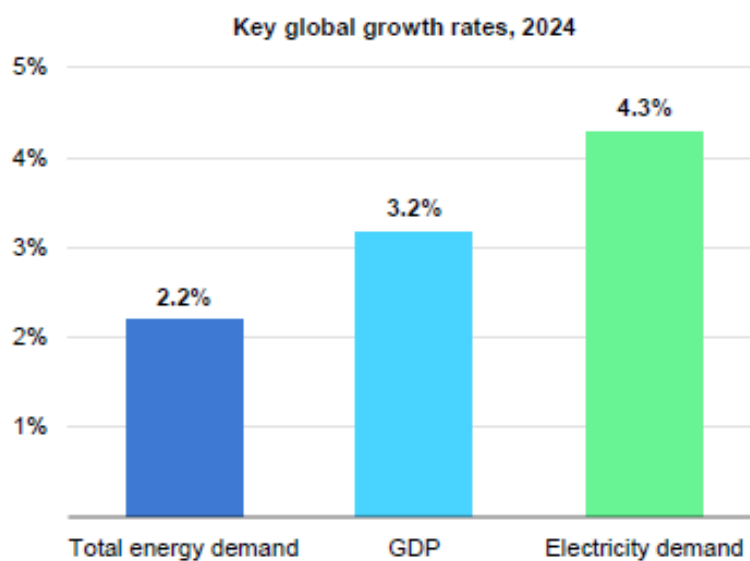


Gráfico 1: Tasas de crecimiento mundial clave, 2024.[1]

Nota: GDP corresponden a Gross Domestic Product en inglés, o Producto Interno Bruto (PIB) en español.

Más de un 80% de este aumento se originó en economías en desarrollo, con un enfoque particular en China e India, mientras que las economías más avanzadas también vieron un resurgimiento tras varios años de descenso.

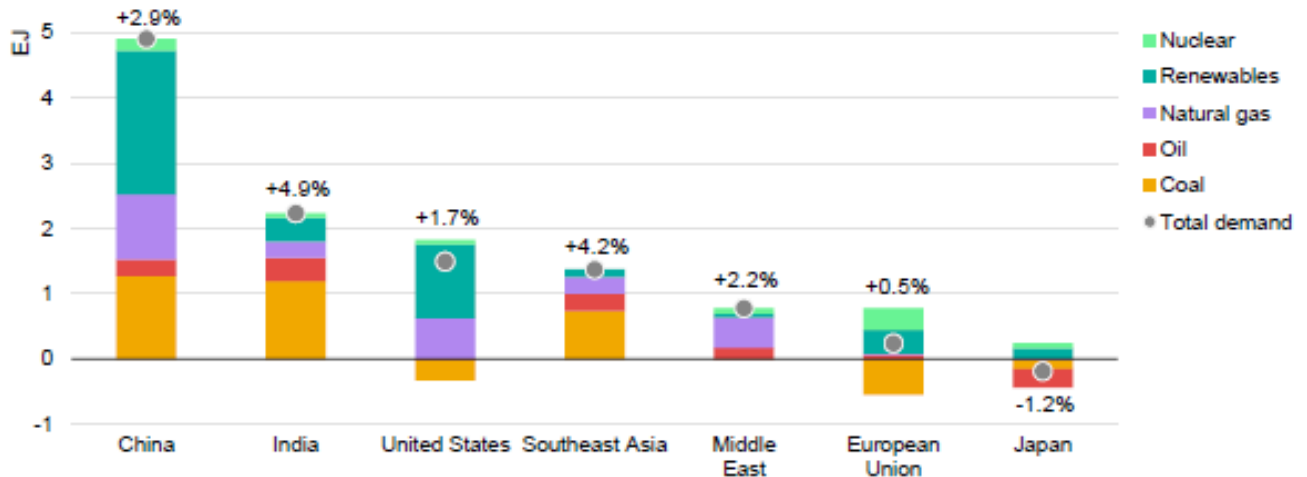


Gráfico 2: Cambio en la demanda energética por regiones seleccionadas, 2023-2024.[1]

- Dinámicas Contrastantes por Fuente de Energía:** Todas las energías registraron un crecimiento, aunque a diferentes velocidades. Las fuentes renovables destacaron, representando un 38% del incremento total, con la energía solar fotovoltaica liderando dicho aumento. El gas natural tuvo un repunte del 2.7%, mientras que el carbón alcanzó un máximo histórico impulsado por su demanda en Asia. En contraste, el petróleo vio una reducción en su participación, estando por debajo del 30% de la demanda global, mientras que la energía nuclear experimentó un renacimiento impulsado por la región asiática.

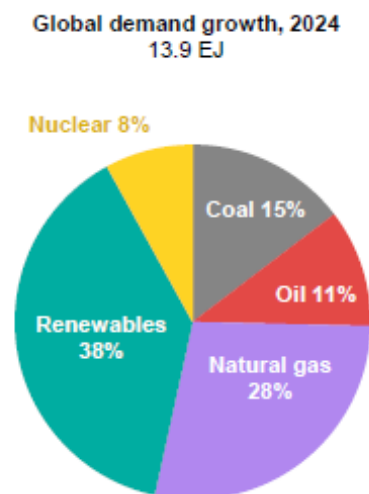


Gráfico 3: Porcentaje de crecimiento global de la demanda energética por fuente, 2024.[1]

- Transformación del Sector Eléctrico:** En el año 2024, más del 80% del aumento en la generación de electricidad provino de fuentes sostenibles, alcanzando por primera vez un 40% del total mundial. Entre las tecnologías más relevantes se encuentran los vehículos eléctricos, que alcanzaron ventas globales superiores a 17 millones, mientras que las bombas de calor, a pesar de su potencial, sufrieron una caída significativa en Europa debido a razones económicas

y normativas.

- **Emisiones de CO₂ y Eficiencia Energética:** A pesar de que las tecnologías limpias evitaron la emisión de más de 2.6 mil millones de toneladas de CO₂, las emisiones relacionadas con la energía alcanzaron un récord en 2024, con un aumento del 0.8%. Este crecimiento ocurrió en un contexto donde las mejoras en la eficiencia energética se desaceleraron, avanzando apenas un 1%, influenciadas por la carga de las industrias de alta demanda energética y el impacto de eventos climáticos extremos.

En resumen, el panorama energético actual presenta profundas contradicciones. Por un lado, la rápida adopción de energías limpias y tecnologías relacionadas está transformando el sector eléctrico y reduciendo parcialmente las emisiones. Por otro lado, el aumento de la demanda global y la persistente utilización de combustibles fósiles mantienen niveles récord de emisiones, lo que genera incertidumbre sobre si la velocidad de la transición energética es adecuada para alcanzar los objetivos climáticos. El futuro cercano estará determinado por la capacidad de enfrentar desafíos como la desaceleración en la eficiencia energética, la dependencia de cadenas de suministro concentradas y las desigualdades regionales que dan forma a un sistema energético diverso e injusto.[1]

3 EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

El hidrógeno se presenta como uno de los componentes energéticos más importantes para el futuro, debido a su capacidad para acumular y mover energía de manera limpia cuando se usa como combustible. A diferencia de recursos energéticos primarios como el sol o el viento, el hidrógeno funciona como un portador energético: se puede generar a partir de diferentes fuentes, almacenarlo y emplearlo en el momento y lugar que sea necesario. Esta flexibilidad lo convierte en un elemento fundamental para avanzar hacia un sistema energético más sostenible.

No obstante, el hidrógeno no se encuentra comúnmente en estado puro en la naturaleza, lo que implica que debe ser generado a partir de otras materias, utilizando métodos que pueden resultar en diferentes impactos ambientales. El método de producción influye en su clasificación (hidrógeno gris, azul, verde, entre otros) y afecta su sostenibilidad ambiental y su viabilidad económica.

Los siguientes apartados explorarán los principales tipos de hidrógeno según el proceso de producción, así como su uso en sectores como la industria, el transporte y el almacenamiento de energía.

3.1 Tipos de hidrógeno

Aunque el hidrógeno es un gas sin color en su estado natural, se organiza según un sistema de colores que señala el proceso de producción, la fuente de energía utilizada y su efecto sobre el medio ambiente. Esta categorización es crucial en el marco de la transición energética, dado que el hidrógeno se postula como una solución para alcanzar las metas establecidas en el “Pacto Verde Europeo”, que tiene como objetivo reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55% para 2030 y alcanzar la neutralidad climática para 2050. A continuación, se explican las distintas clases de hidrógeno en función de su origen, comenzando por los métodos más contaminantes y concluyendo con los que son completamente limpios. [2]

3.1.1 Hidrógeno a partir de Combustibles Fósiles

Hidrógeno Negro y Marrón

Estos tipos representan las maneras más nocivas de generar hidrógeno. Se producen a través de la gasificación del carbón, un método termoquímico realizado a altas temperaturas (entre 1200°C y 1500°C) que transforma materiales a base de carbono en monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono.

La diferenciación entre negro y marrón se basa en el tipo de carbón empleado: el lignito¹ produce hidrógeno marrón, mientras que el carbón bituminoso² da lugar al hidrógeno negro. En ambos casos, el proceso puede describirse con la siguiente fórmula:



El principal desafío ambiental de esta técnica es que el CO₂ y el CO producidos se liberan directamente al ambiente, lo que contribuye de forma considerable al cambio climático.[3]

¹ Carbón fósil, de color negro o pardo, que con frecuencia tiene una textura semejante a la de la madera de que procede.[4]

² Carbón denso que puede convertirse en coque, un combustible elaborado mediante la destilación de carbones más blandos; se usa para calentar los altos hornos de las centrales metalúrgicas

Hidrógeno Gris

El hidrógeno gris es el método de producción más prevalente en el mundo en la actualidad. Se obtiene mediante el proceso de reformado con vapor, que implica pasar gas natural a través de vapor de agua a altas temperaturas. Este proceso usa combustibles que no son renovables y genera una cantidad significativa de emisiones de CO₂, cerca de 10 kg de CO₂ por cada kg de hidrógeno producido. [5]

El reformado con vapor es un método que resulta menos dañino que la gasificación del carbón, aunque sigue presentando problemas desde el punto de vista de la sostenibilidad, ya que mantiene la dependencia de los combustibles fósiles y contribuye de manera notable a las emisiones de gases de efecto invernadero. [6]

Hidrógeno Azul

El hidrógeno azul emplea gas natural como materia prima, al igual que el hidrógeno gris, pero integra tecnologías para minimizar su impacto en carbono. La principal distinción es que, durante el proceso de reformado del gas natural (con una eficacia del 60-65%), el dióxido de carbono generado se captura y se almacena en formaciones geológicas profundas, en lugar de ser liberado al aire. [5]

Este método resulta en emisiones considerablemente menores que el hidrógeno gris, produciendo alrededor de 3,5 a 4 kg de CO₂ por cada kg de hidrógeno creado. Sin embargo, todavía tiene desventajas: no elimina la dependencia del gas natural y mantiene un modelo de desarrollo que se basa en combustibles fósiles. Además, las tecnologías de captura y almacenaje de carbono todavía enfrentan retos tanto técnicos como económicos. [6]

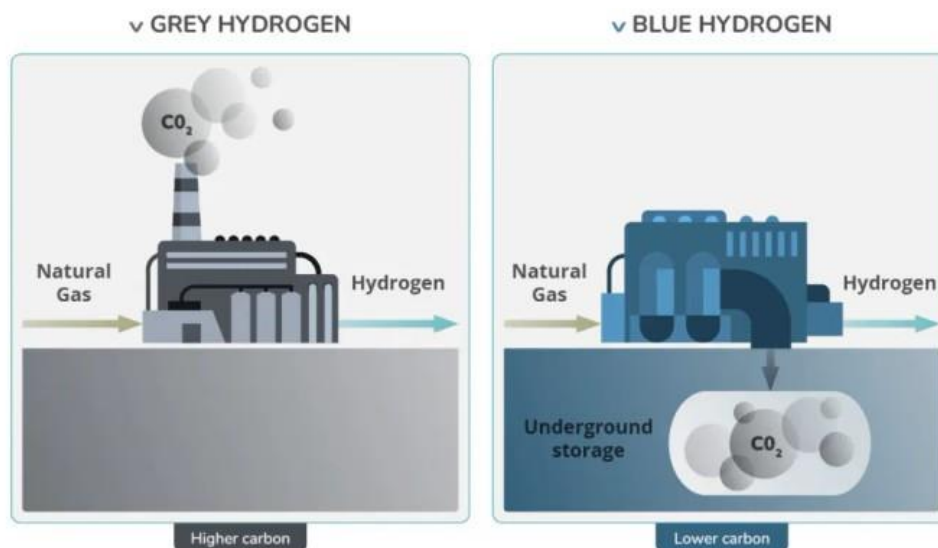


Figura 1: Hidrógeno Gris Vs Hidrógeno Azul, [7]

Hidrógeno Turquesa

A pesar de aparecer en ciertas clasificaciones, este tipo de hidrógeno es una opción menos familiar y desarrollada. Se produce a través de la pirólisis³ del metano, un procedimiento que descompone térmicamente el gas natural en hidrógeno y carbono sólido, evitando la liberación directa de CO₂. El carbono obtenido se puede almacenar o emplear en usos industriales. [8]

³ Pirólisis: Descomposición de un compuesto químico por acción del calor. [9]

3.1.2 Hidrógeno a partir de Fuentes No Contaminantes

Hidrógeno Verde

El hidrógeno verde es la alternativa de producción más pura y sostenible. Durante su ciclo de vida, es el único que no emite CO₂ en absoluto. Se genera a través de la electrólisis del agua, que usa corriente eléctrica para dividir el hidrógeno del oxígeno que se encuentra en el agua. [5]

La característica distintiva del hidrógeno verde es que la electricidad para la electrólisis proviene únicamente de fuentes renovables, como la energía solar, eólica o hidráulica. Esto asegura que, por cada kilogramo de hidrógeno producido, se emitan 0 kg de CO₂. [6]

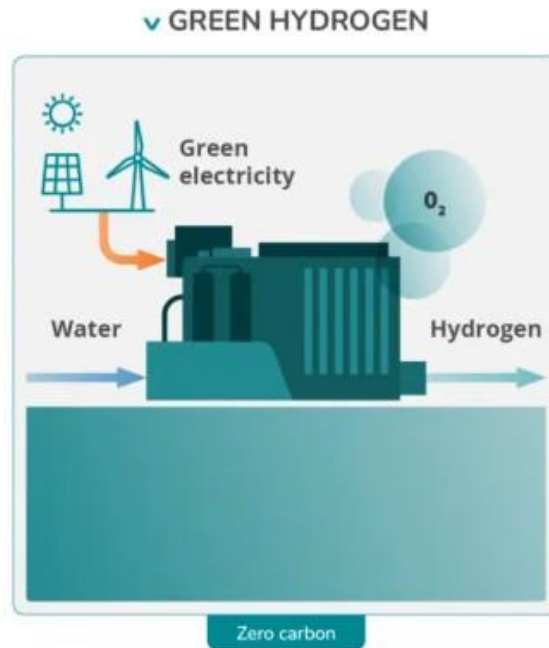


Figura 2: Hidrógeno verde, [7]

Hidrógeno Rosa/Rojo/Púrpura

El hidrógeno rosa, también conocido como rojo o púrpura, se produce utilizando energía nuclear para alimentar la electrólisis del agua. Este método no genera emisiones directas de CO₂ durante su funcionamiento, similar al hidrógeno verde, pero se distingue por emplear energía nuclear en lugar de opciones renovables.

La principal ventaja de este tipo es su capacidad de producción continua, ya que la energía nuclear no está sujeta a factores climáticos, a diferencia de las fuentes renovables. Sin embargo, plantea desafíos relacionados con la generación nuclear, como la gestión de residuos radiactivos y las inquietudes públicas sobre su seguridad. [2]

3.1.3 Hidrógeno de Origen Natural

El hidrógeno natural, conocido también como hidrógeno blanco, dorado o geológico, es el único tipo que no necesita procesos industriales para su producción. Su origen es natural y se forma dentro de la corteza terrestre por diversos procesos químicos y geológicos. Los mecanismos principales de su generación incluyen la filtración del agua a través de las placas tectónicas y la descomposición de ciertos sedimentos subterráneos que contienen altas cantidades de hierro.

Este tipo de hidrógeno se localiza en formaciones geológicas, comúnmente en estado gaseoso y sin color. A pesar de ser un recurso natural atractivo sin emisiones asociadas, actualmente no hay una

forma sostenible de aprovechar estas reservas, que son en sí mismas muy escasas. Su rasgo más destacado es que no necesita transformación industrial, lo que lo podría posicionar como una opción sin huella de carbono para su uso como portador de energía. [10]

3.1.4 Otros Tipos

Hay otros estilos de hidrógeno como amarillo, naranja, ámbar y dorado. Estas categorías representan variaciones o combinaciones de los métodos predominantes, normalmente diferenciado por la fuente energética específica utilizada para su producción o por ciertas características de su proceso de obtención.

Es importante señalar que estas clasificaciones de colores no tienen un consenso internacional oficial y pueden cambiar con el tiempo a medida que avanzan las tecnologías y los estándares. [8]



Figura 3: Colores según el origen del hidrógeno, [11]

3.2 Aplicaciones del Hidrógeno

El hidrógeno es un elemento con un amplio abanico de aplicaciones, cuya relevancia y alcance han variado a lo largo del tiempo. Actualmente, su uso se concentra en procesos industriales, mientras que su papel como vector energético se vislumbra como una de las piezas clave en la transición hacia un sistema energético descarbonizado. A continuación, se distinguen sus aplicaciones presentes y las perspectivas futuras.

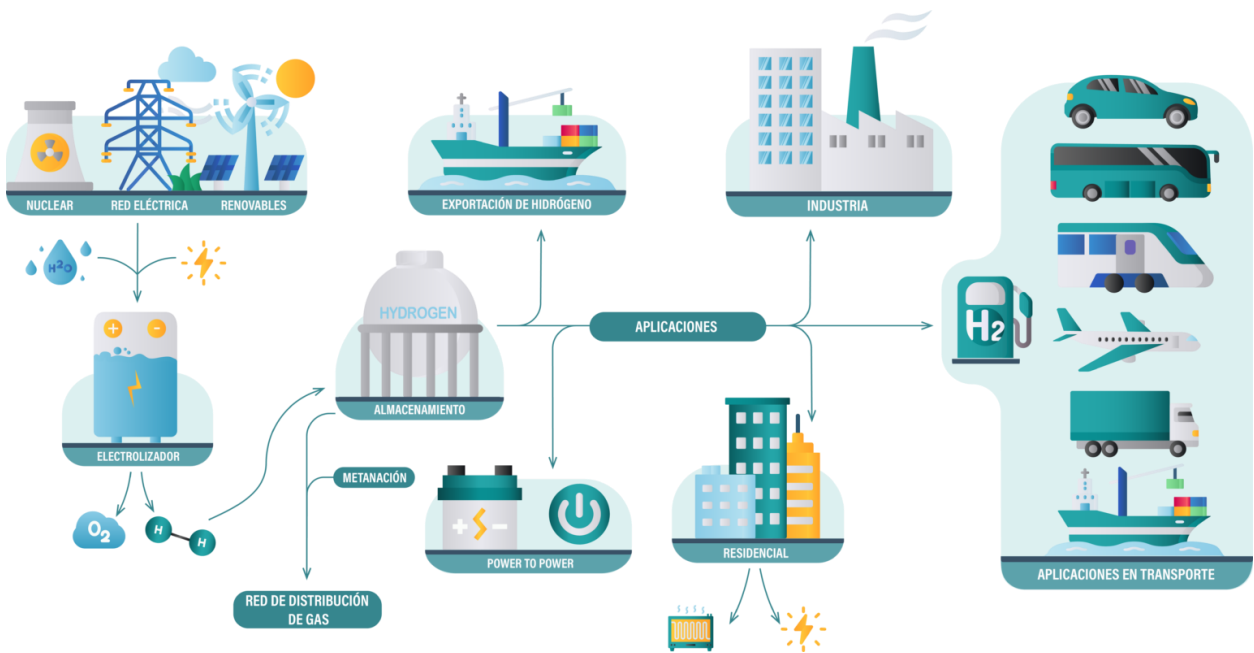


Figura 4: Cadena de valores del hidrógeno [12]

3.2.1 Aplicaciones actuales

En el escenario actual, el hidrógeno no se utiliza de manera generalizada como portador de energía dentro del dominio público, sino que su empleo se limita fundamentalmente a la industria como materia prima en procesos químicos y petroquímicos. Entre sus principales aplicaciones destacan:

- **Producción de amoníaco (NH_3):** El hidrógeno es indispensable en la síntesis de amoníaco mediante el proceso Haber-Bosch, constituyendo la base de la industria de fertilizantes que sustenta la agricultura mundial.
- **Producción de metanol:** Actúa como reactivo en la síntesis de metanol, empleado a su vez en la fabricación de productos químicos y combustibles.
- **Refino de petróleo:** Es esencial en la desulfuración del crudo y en la mejora de combustibles como queroseno, gasolina o diésel, reduciendo el contenido de azufre y mejorando su calidad.

Una característica fundamental de estos usos es su naturaleza “cautiva”, es decir, el hidrógeno se produce y consume en las mismas instalaciones o en su entorno cercano, como grandes complejos químicos. Esta dinámica ha limitado la creación de una infraestructura pública de transporte y distribución de hidrógeno, así como de un mercado energético regulado, en contraste con el gas natural o la electricidad.

Cabe señalar que, aunque hoy en día el hidrógeno puro está prácticamente ausente del sistema energético general, históricamente formó parte del denominado “gas ciudad”, una mezcla que contenía más del 50% de hidrógeno y que se utilizaba para calefacción y cocina antes de ser sustituida por el gas natural.

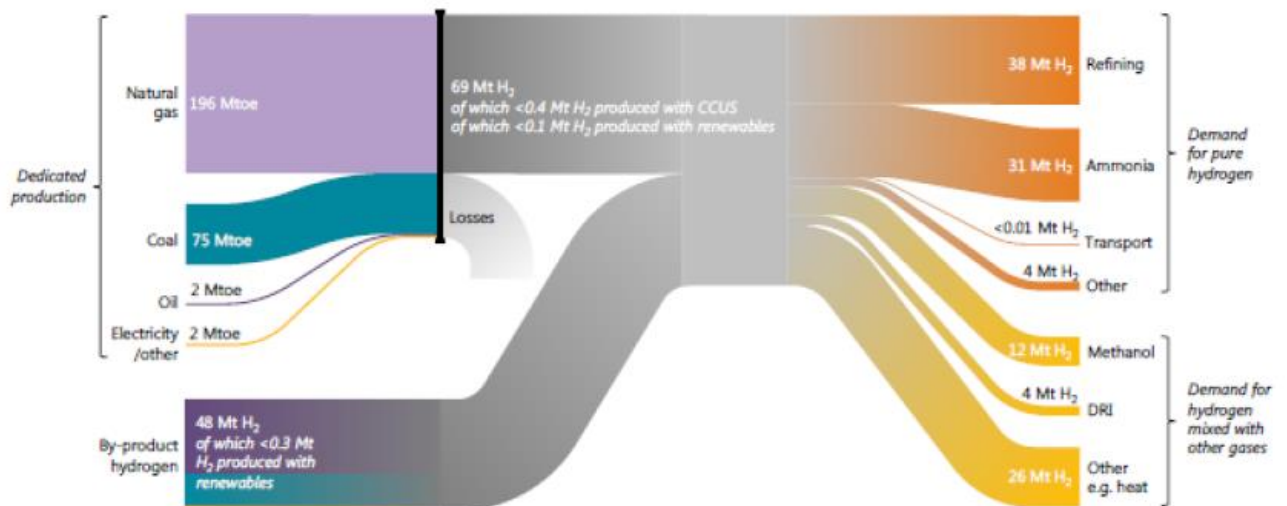


Figura 5: Producción y aplicaciones del hidrógeno. [13]

3.2.2 Aplicaciones futuras y tecnologías habilitadoras

La proyección de futuro del hidrógeno se asienta en su capacidad de actuar como vector energético limpio, especialmente en la descarbonización de sectores difíciles de electrificar directamente. En este contexto, la pila de combustible emerge como la tecnología clave, al permitir convertir hidrógeno en electricidad y calor de manera eficiente, emitiendo únicamente agua como subproducto.

El desarrollo y la producción masiva de estas tecnologías prometen reducir sus costes y posicionarlas como alternativas competitivas frente a motores de combustión interna o turbinas. De esta forma, el hidrógeno podrá desplegarse en múltiples ámbitos:

- **Industria:**

- Sustitución del hidrógeno gris por hidrógeno bajo en carbono en refinerías y producción de amoníaco y metanol.
- Generación de calor de alta temperatura en sectores como el siderúrgico, papelerero, alimentario, del vidrio o cerámico.
- Producción de combustibles sintéticos para aviación y transporte marítimo.

- **Movilidad y transporte:**

- Vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) para automóviles, autobuses y camiones.



Figura 6: Estación de repostaje de hidrógeno para autobuses en Madrid, España. [14]

- Transporte pesado y de larga distancia (trenes, barcos, drones o aviones), donde las limitaciones de las baterías hacen del hidrógeno una opción más viable.

- **Sector residencial y edificios:**

- Sistemas de cogeneración mediante pilas de combustible, capaces de generar electricidad y calor de forma eficiente.

Ejemplos ya en operación, como en Japón, utilizan gas natural reformado para producir hidrógeno en el propio hogar y cubrir la demanda energética doméstica.

- **Equilibrio del sistema eléctrico:**

- Producción de electricidad de respaldo con hidrógeno almacenado en momentos de baja generación renovable.
- Generación descentralizada en entornos urbanos e industriales, contribuyendo a aliviar la carga de la red y aumentando la resiliencia del sistema.

En conclusión, mientras que las aplicaciones actuales del hidrógeno se limitan principalmente al ámbito industrial y bajo un esquema de consumo cautivo, su futuro apunta a consolidarse como un vector energético global, versátil y libre de carbono. Esto lo convierte en una herramienta estratégica para el almacenamiento y transporte de energía renovable a gran escala, así como para la descarbonización de sectores donde la electrificación directa no resulta viable. [13]

4 EL HIDRÓGENO VERDE

El método esencial para conseguir hidrógeno verde es a través de la electrólisis del agua, un proceso que descompone las moléculas de agua (H_2O) en sus elementos básicos, que son hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). [15]

El principio básico de la electrólisis consiste en que dos electrodos sumergidos en agua y conectados a una fuente de energía aplican una corriente continua, lo que provoca que los componentes se separen. Durante esta operación, el electrodo de carga negativa (cátodo) atrae los iones de hidrógeno (H^+), mientras que el electrodo de carga positiva (ánodo) atrae el oxígeno. [16]

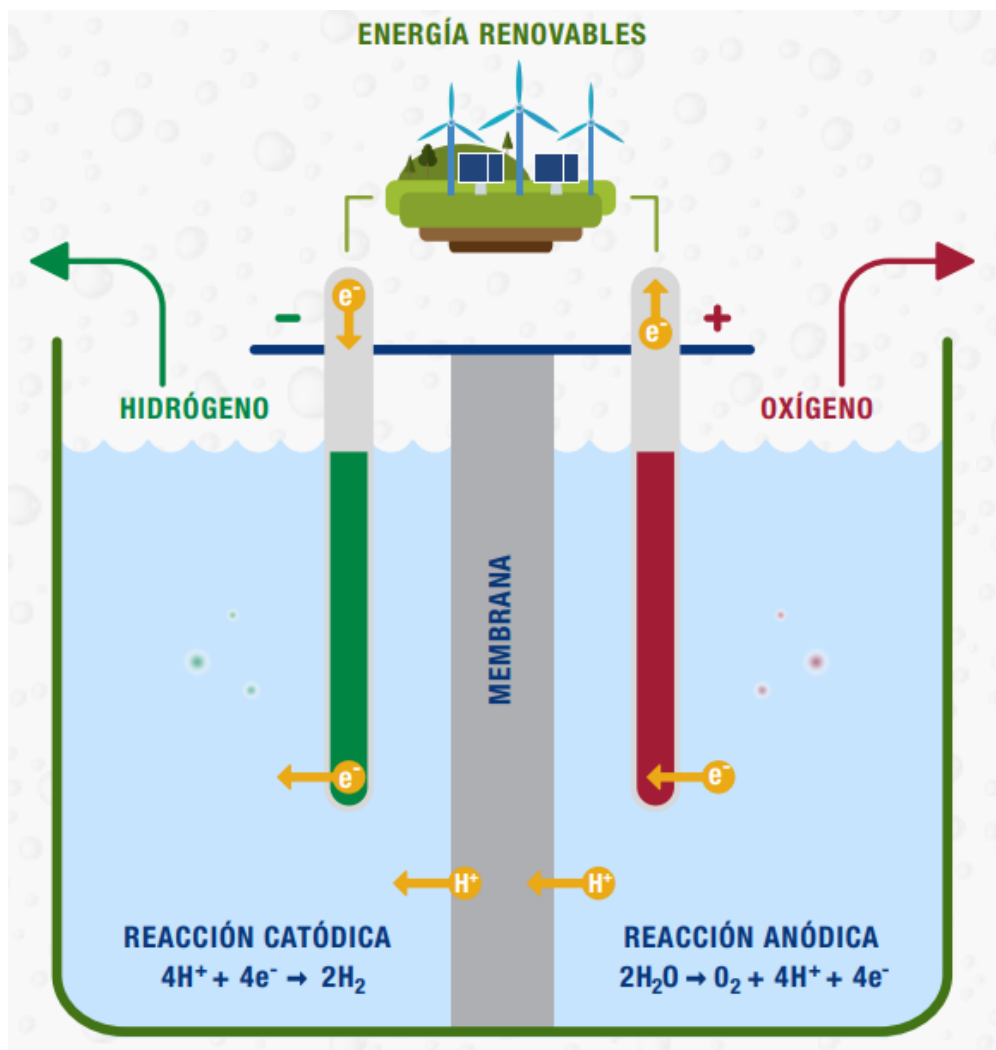
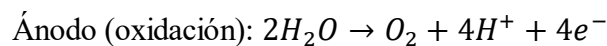
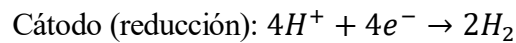


Figura 7: Proceso de electrólisis [17]

Teóricamente, esta reacción requiere un voltaje de celda de 1.23 V a temperatura ambiente. Sin embargo, en la práctica el proceso demanda aproximadamente 1,48 V para superar las limitaciones cinéticas y la resistencia óhmica de los materiales que componen el electrolizador. Esta diferencia se traduce en un mayor consumo de energía, lo que unido a los elevados costes de inversión explica por qué, pese a conocerse desde hace casi dos siglos, la electrólisis solo representa alrededor del 4% de la producción mundial de hidrógeno.

4.1 Tecnologías de electrólisis del agua

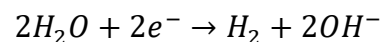
Actualmente, las tecnologías de electrólisis del agua pueden clasificarse en cuatro grandes categorías: la electrólisis alcalina (AWE), la electrólisis con membrana de intercambio protónico (PEM), la electrólisis con membrana de intercambio aniónico (AEM) y la electrólisis de óxido sólido (SOEC). Cada una de ellas presenta particularidades en cuanto al electrolito empleado, el tipo de especie iónica que conduce la carga y las condiciones de operación, lo que se traduce en distintas ventajas, limitaciones y perspectivas de desarrollo.

4.1.1 Electrólisis Alcalina del Agua (AWE)

La electrólisis alcalina constituye la tecnología más veterana y consolidada para la producción de hidrógeno. Se trata de una opción madura, utilizada desde hace décadas a escala industrial en plantas de varios megavatios, lo que la convierte en una referencia establecida dentro del sector. Su funcionamiento se basa en una solución acuosa concentrada de KOH o NaOH que actúa como electrolito, permitiendo la migración de iones hidroxilo (OH^-) a través de un separador poroso.

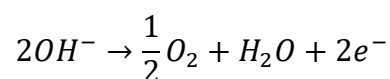
En el cátodo, el agua se reduce generando hidrógeno y iones hidroxilo:

- Reacción en el cátodo:



Estos iones viajan hacia el ánodo, donde se oxidan para liberar oxígeno:

- Reacción en el ánodo:



El atractivo de esta tecnología reside en su fiabilidad y en el hecho de que no depende de metales nobles en sus electrodos, lo que reduce significativamente los costes frente a otras opciones. Además, ofrece tiempos de operación muy largos, con durabilidades superiores a las 60.000 horas. Sin embargo, sus debilidades son también conocidas: la corrosividad del electrolito, el cruce indeseado de gases entre compartimentos y la limitada densidad de corriente, que se sitúa en valores notablemente menores que en otras alternativas más modernas. También presenta cierta vulnerabilidad al CO_2 atmosférico, que degrada el electrolito al formar carbonatos que reducen la conductividad y bloquean parcialmente los poros de los electrodos.

La investigación actual apunta a desarrollar electrocatalizadores más activos y membranas más finas para mejorar la eficiencia.

En la Figura 8: Electrólisis alcalina se observa el esquema de cómo funciona la electrolisis alcalina

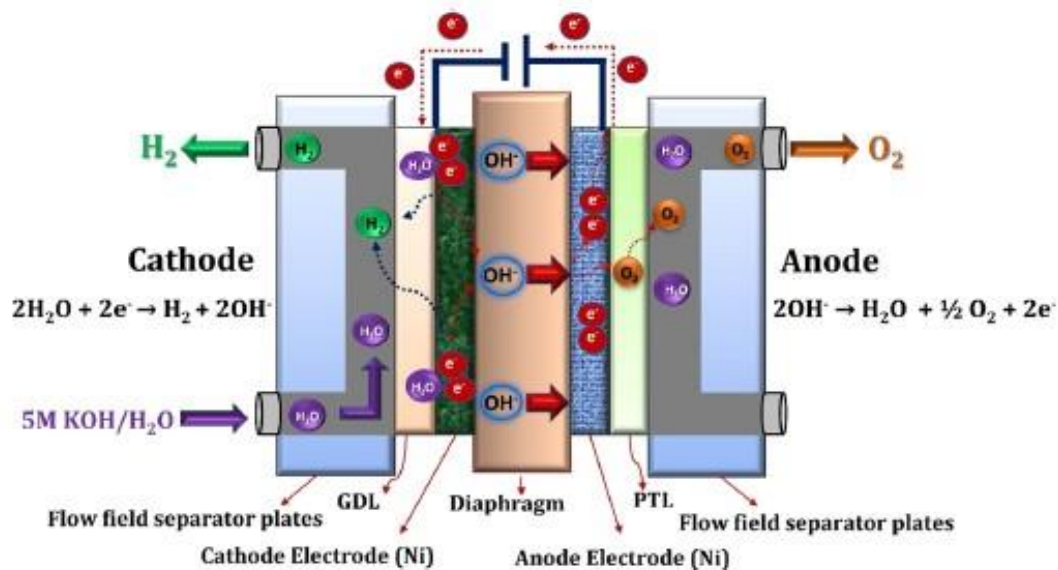


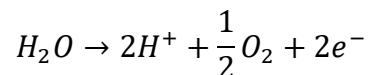
Figura 8: Electrólisis alcalina [18]

4.1.2 Electrólisis del Agua con Membrana de Intercambio Protónico (PEM)

La electrólisis PEM es, junto con la alcalina, la tecnología más extendida y comercialmente disponible en la actualidad. Fue concebida en la década de 1960 y hoy se despliega a escala de megavatios, tanto en aplicaciones industriales como en el sector del transporte. En este caso, el electrolito es una membrana polimérica que conduce protones (H^+), siendo Nafion el material de referencia debido a su alta conductividad, estabilidad química y resistencia mecánica.

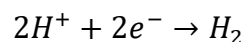
En el ánodo ocurre la oxidación del agua, liberando oxígeno y protones:

- Reacción en el ánodo:



Los protones atraviesan la membrana hacia el cátodo, donde se reducen junto con los electrones externos para formar hidrógeno:

- Reacción en el cátodo:



El proceso se distingue por su capacidad de operar a altas densidades de corriente, producir hidrógeno de elevada pureza y adaptarse rápidamente a fluctuaciones de la fuente energética, lo que la convierte en una opción idónea para integrarse con energías renovables intermitentes. Además, la ausencia de electrolitos líquidos cáusticos mejora su seguridad de operación.

No obstante, la PEM enfrenta un problema crítico: su dependencia de metales nobles, especialmente iridio y platino, en electrodos y recubrimientos. Estos materiales son caros y escasos, lo que dispara el coste de capital de los sistemas. Por ejemplo, un electrolizador de 10 MW puede requerir alrededor de 15 kg de iridio, con un coste millonario.

La investigación actual persigue reducir esta dependencia, ya sea sustituyendo parcialmente estos metales por alternativas más asequibles o reduciendo las cargas necesarias mediante nanocatalizadores más eficientes. También se están desarrollando membranas más delgadas que permitan minimizar las pérdidas energéticas sin comprometer la durabilidad. Estos avances son clave para alcanzar el objetivo de reducir el coste de producción de hidrógeno con PEM hasta niveles competitivos frente a las demás

tecnologías.

En la Figura 9: Electrólisis PEM se observa el esquema de cómo funciona la electrolisis con membrana de intercambio protónico.

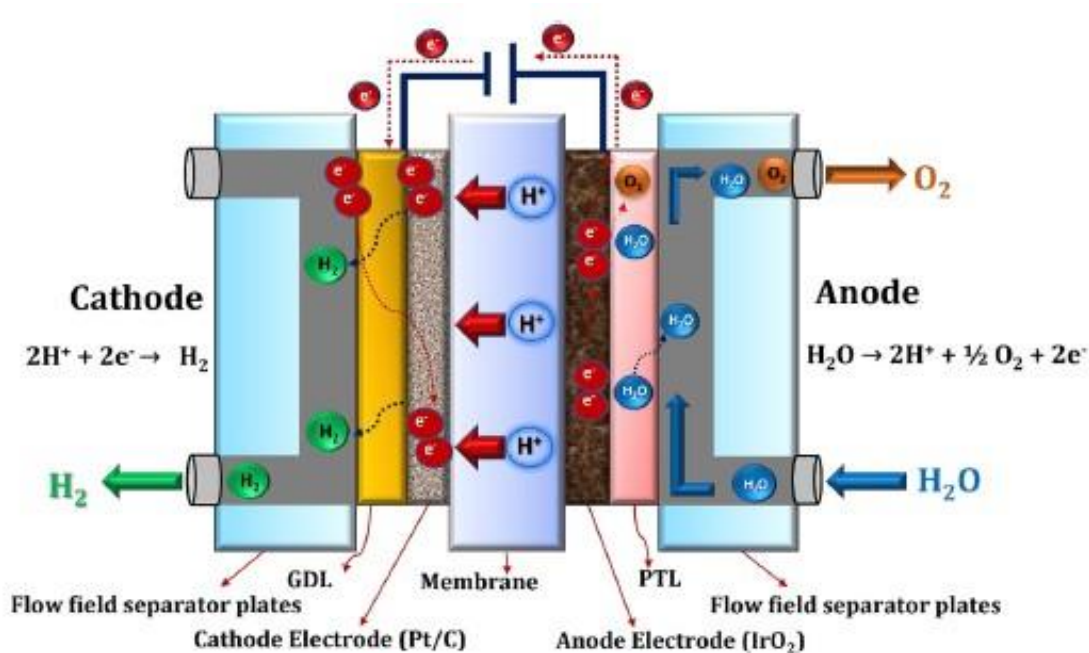


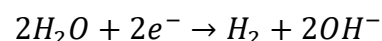
Figura 9: Electrólisis PEM [18]

4.1.3 Electrólisis del Agua con Membrana de Intercambio Aniónico (AEM)

La electrolisis con membrana de intercambio aniónico es una tecnología más reciente que busca combinar lo mejor de la electrolisis alcalina y la PEM. En este caso, la membrana permite el paso de iones hidroxilo (OH^-), lo que posibilita operar con electrolitos de baja concentración e incluso con agua destilada, reduciendo la corrosividad del sistema y, por tanto, los problemas de seguridad y mantenimiento.

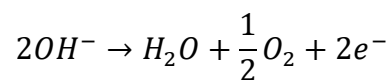
En el cátodo, las moléculas de agua se reducen:

- Reacción en el cátodo:



Los iones OH^- migran a través de la membrana hasta el ánodo, donde reaccionan liberando oxígeno:

- Reacción en el ánodo:



Una de sus principales virtudes es que, al igual que la AWE, permite utilizar electrocatalizadores basados en metales de transición como el níquel o el cobalto, evitando el uso de metales preciosos. Sin embargo, su talón de Aquiles está en la durabilidad: las membranas actuales presentan vidas útiles relativamente cortas, en muchos casos por debajo de las 2.000 horas, aunque algunos desarrollos más recientes han alcanzado valores superiores a las 30.000 horas.

La investigación en AEM se concentra precisamente en alargar la vida operativa de estas membranas, mejorar su conductividad y estabilidad química, y optimizar el conjunto de electrodos y membrana (MEA). También se trabaja en electrocatalizadores más activos y duraderos para acelerar tanto la

reacción de evolución de oxígeno (OER) como la de hidrógeno (HER). Si estos avances prosperan, la AEM podría convertirse en una tecnología competitiva, especialmente por sus menores costes potenciales frente a la PEM.

En la Figura 10: Electrólisis AEM se observa el esquema de cómo funciona la electrolisis con membrana de intercambio aniónico.

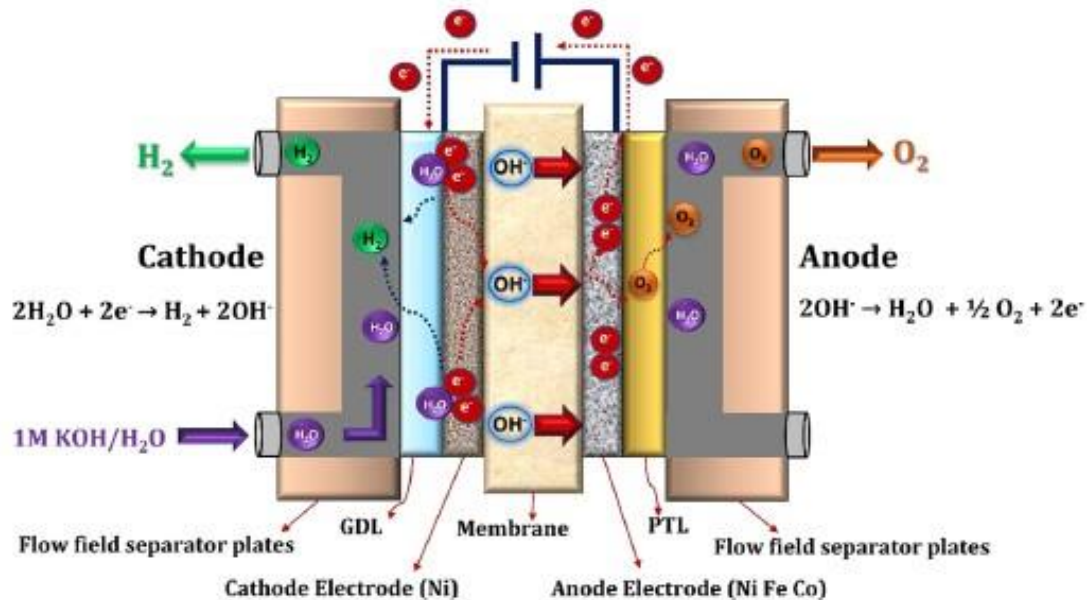


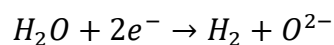
Figura 10: Electrólisis AEM [18]

4.1.4 Electrólisis de Óxido Sólido del Agua (SOEC)

La electrolisis de óxido sólido constituye un enfoque radicalmente distinto a las anteriores. En lugar de operar a temperaturas moderadas, esta tecnología utiliza vapor de agua como reactivo y temperaturas muy elevadas, entre 700 y 850 °C. Bajo estas condiciones, el electrolito cerámico conduce iones óxido (O^{2-}), reduciendo la cantidad de electricidad necesaria para dividir el agua.

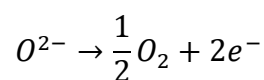
En el cátodo, el vapor de agua se reduce produciendo hidrógeno y aniones oxígeno:

- Reacción en el cátodo:



Los aniones oxígeno atraviesan el electrolito cerámico hasta el ánodo, donde se oxidan:

- Reacción en el ánodo:



La electrolisis SOEC tiene la ventaja de integrarse fácilmente con procesos industriales de alta temperatura, como la producción de metanol o amoníaco, lo que abre la puerta a esquemas de eficiencia global muy elevados.

Sin embargo, la gran barrera para su consolidación comercial es su limitada estabilidad. Las pilas SOEC actuales apenas alcanzan las 20.000 horas de vida útil, frente al objetivo de 100.000 horas que se considera necesario para competir en el mercado. El coste de capital, además, sigue siendo muy elevado.

Las líneas de investigación se orientan a mejorar la durabilidad de los electrodos y electrolitos, prevenir procesos de degradación como la aglomeración de níquel, y desarrollar nuevos materiales cerámicos más estables. También se exploran configuraciones híbridas capaces de conducir simultáneamente iones oxígeno y protones, lo que podría incrementar aún más la eficiencia en la producción de hidrógeno.

En la Figura 11: Electrólisis SOEC se observa el esquema de cómo funciona la electrolisis de óxido sólido.

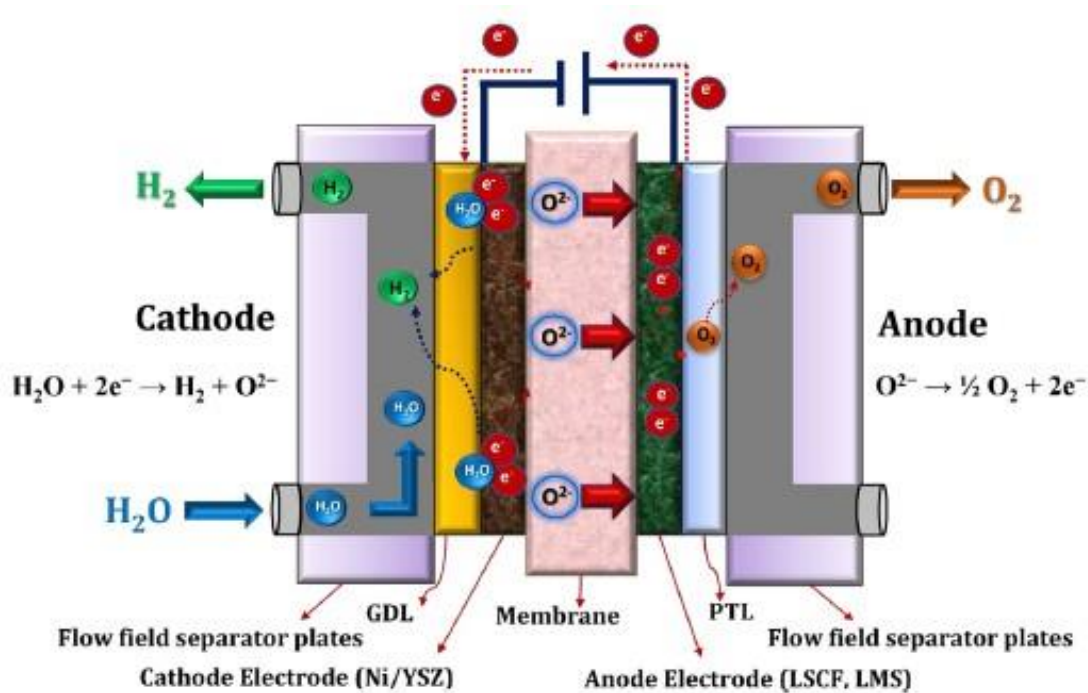


Figura 11: Electrólisis SOEC [18]

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los cuatro tipos de electrolizadores recién comentados:

Tabla 4-1. Comparativa entre electrolizadores

Criterios	AWE	PEM	AEM	SOEC
Portador iónico	OH^-	H^+	OH^-	O^{2-}
Condiciones de operación	70–90 °C <30 bar	50–80 °C <70 bar	40–60 °C <35 bar	700–850 °C 1 bar
Costos de Capital (USD/kW)	500–1.000 (10 MW)	700–1.400 (10MW)	Desconocido	Desconocido
Vida útil (Stack)	60.000 h	50.000–80.000 h	>30.000 h	20.000 h
Eficiencia energética	50–78%	50–83%	57–59%	~89% (laboratorio)
Estado de desarrollo	Maduro	Comercial	I+D	I+D

4.2 Características Principales del Hidrógeno Verde

4.2.1 Sostenibilidad Ambiental

La característica más sobresaliente del hidrógeno verde es su total sostenibilidad ambiental. Al depender exclusivamente de fuentes renovables en su elaboración, no genera gases contaminantes ni durante su fabricación ni en su posterior combustión o uso. El único subproducto que se obtiene es vapor de agua, lo que lo convierte en una opción verdaderamente limpia en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. [19]

Esta virtud posiciona al hidrógeno verde como un aspecto crucial en la lucha contra el cambio climático, dado que la adopción a gran escala de esta tecnología podría suponer un ahorro de cerca de 830 millones de toneladas de CO₂ anualmente, que actualmente se liberan al producir hidrógeno mediante métodos convencionales basados en combustibles fósiles. Esta capacidad de reducción de emisiones explica por qué varias naciones, incluida España, lo ven como un elemento estratégico en sus enfoques para descarbonizar la economía. [16]

4.2.2 Capacidad de Almacenamiento

El almacenamiento del hidrógeno constituye un pilar fundamental para su aprovechamiento como vector energético, especialmente en su variante verde producida a partir de fuentes renovables. Su capacidad para almacenar grandes cantidades de energía durante semanas o incluso meses con bajas pérdidas lo convierte en una de las soluciones más prometedoras para gestionar la intermitencia de las energías renovables y garantizar la seguridad de suministro. A diferencia de otras tecnologías de almacenamiento, el hidrógeno permite almacenar hasta 1.000 MW de energía durante largos periodos, aportando flexibilidad tanto diaria como estacional.

4.2.2.1 Características y Desafíos del Hidrógeno para el Almacenamiento

El hidrógeno es el elemento más abundante del planeta y, gracias a su ligereza, ofrece un transporte y uso versátiles. No obstante, presenta desafíos técnicos importantes:

- Baja densidad energética volumétrica, que obliga a recurrir a presiones elevadas, temperaturas criogénicas o transformaciones químicas para almacenar cantidades significativas.
- Riesgo de fugas, debido a su bajo peso molecular y a la necesidad de materiales avanzados que aseguren la estanqueidad.
- Gestión térmica compleja, ya que los procesos de absorción, desorción o licuefacción requieren un control riguroso de calor y presión.

Estas características han impulsado el desarrollo de múltiples soluciones de almacenamiento, cada una con ventajas y limitaciones específicas.

4.2.2.2 Tecnologías de Almacenamiento

a) Almacenamiento gaseoso a alta presión

Es la tecnología más madura y extendida actualmente. Se utilizan tanques que trabajan entre 350 y 700 bares, con distintos tipos según materiales y diseño:

Tipo I: metálicos, económicos pero pesados.

Tipo II: metálicos con refuerzo de fibra de carbono o vidrio, soportan hasta 1.000 bar.

Tipo III: revestimiento metálico interno con compuestos externos, más ligeros.

Tipo IV: camisa polimérica con refuerzo en fibra de carbono, optimizados para 700 bar.

Son adecuados para aplicaciones móviles e industriales, aunque limitados en densidad energética y coste.

Tipo V: totalmente compuestos (sin revestimiento metálico), ultraligeros y de alto coste. Diseñados para presiones superiores a 700 bar, ofrecen la mayor eficiencia en peso, ideales para aplicaciones aeroespaciales y movilidad avanzada. Aún en desarrollo para uso comercial amplio.



Figura 12: Tanques tipo I, II, III, IV y V de almacenamiento de hidrógeno gaseoso. [20]

b) Almacenamiento criogénico (hidrógeno líquido, LH₂)

Consiste en licuar el hidrógeno a -253 °C , aumentando unas 800 veces su densidad.

Ventajas: alta densidad energética, transporte más eficiente en grandes volúmenes, posibilidad de adaptación de infraestructuras de GNL.

Desafíos: alto consumo energético en el proceso de licuefacción, evaporación por absorción de calor y necesidad de tanques altamente especializados.

Su uso es estratégico en aeroespacial y transporte marítimo de larga distancia.



Figura 13: Tanque de almacenamiento de LH₂ de forma esférica. [21]

c) Almacenamiento en estado sólido

Existen diferentes aproximaciones:

Hidruros metálicos: almacenan hidrógeno en enlaces químicos, con buena densidad volumétrica y alta seguridad. Requieren calor para liberar el gas y son más adecuados para almacenamiento estacionario.

MOF (Metal-Organic Frameworks): materiales microporosos con áreas superficiales $>3.000 \text{ m}^2/\text{g}$, capaces de adsorber grandes cantidades de hidrógeno a bajas presiones y temperaturas. Se perfilan como una de las tecnologías más prometedoras para el futuro gracias a su versatilidad estructural y química.

d) Portadores orgánicos líquidos (LOHC)

Permiten absorber y liberar hidrógeno de manera reversible mediante procesos de hidrogenación y deshidrogenación. El sistema más extendido es el tolueno–metilciclohexano.

Ventajas: almacenamiento y transporte seguros en condiciones ambientales, aprovechando la infraestructura existente, con una pureza de hidrógeno recuperado muy elevada.

Limitaciones: procesos térmicamente intensivos y eficiencia en torno al 60–70%, que puede mejorar hasta el 90% con reciclaje de calor.

e) Almacenamiento geológico a gran escala

Es la opción más viable para almacenar hidrógeno a gran escala y largo plazo:

Cavernas salinas: con capacidad para almacenar hasta 20.000 toneladas de hidrógeno, ya probadas en EE. UU. y Europa.

Yacimientos agotados de gas y petróleo: alternativa viable, aunque menos madura.

Acuíferos profundos: opción en investigación, con mayor incertidumbre técnica.

Este tipo de almacenamiento permitirá gestionar excedentes estacionales y equilibrar la red energética europea, complementando la flexibilidad de gasoductos y terminales de importación.

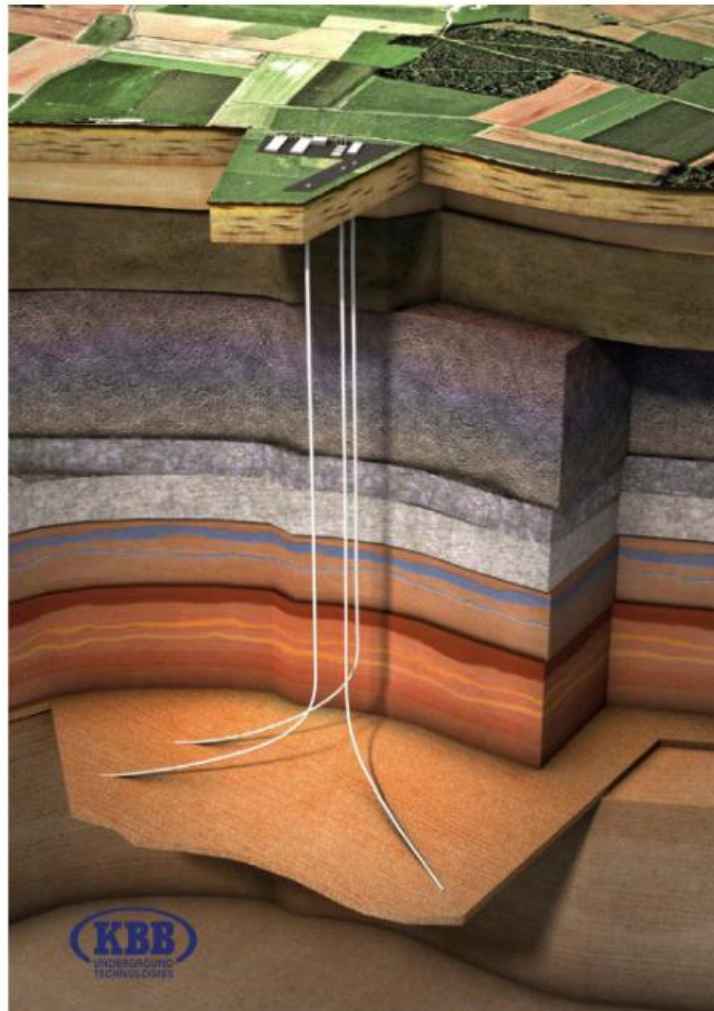


Figura 14: Almacenamiento geológico. [21]

4.2.2.3 Comparación y Aplicaciones

Corto-medio plazo: el almacenamiento gaseoso a alta presión es el más extendido, ideal para transporte y movilidad.

Largo plazo y gran escala: cavernas salinas y LOHC representan las soluciones más prometedoras.

Aplicaciones específicas: los hidruros metálicos son útiles en almacenamiento estacionario; el hidrógeno líquido es estratégico en aviación y transporte marítimo; los MOF ofrecen un horizonte innovador aún en fase experimental.

4.2.2.4 Seguridad y Eficiencia

La seguridad es un aspecto central en todas las tecnologías. El almacenamiento subterráneo ha demostrado ser seguro durante décadas, mientras que las tecnologías de compresión y licuefacción requieren materiales resistentes y control estricto de fugas. La gestión térmica resulta crítica en sistemas de hidruros y criogénicos, donde las reacciones endotérmicas y exotérmicas o la evaporación pueden comprometer la eficiencia.

4.2.3 Transporte del Hidrógeno

El transporte del hidrógeno constituye uno de los principales retos para el desarrollo de una economía del hidrógeno a escala global. Debido a su baja densidad volumétrica y a su alta difusividad, movilizar este gas desde los centros de producción —a menudo situados en regiones ricas en recursos renovables— hasta los polos de consumo industrial requiere soluciones tecnológicas diversas. A continuación, se presentan las principales vías y tecnologías disponibles, con sus características, ventajas y limitaciones.

4.2.3.1 Transporte por Gasoductos

Los gasoductos se consideran la opción más eficiente y económica para transportar grandes volúmenes de hidrógeno a distancias de hasta 1.500 km.

- a) **Mezcla con gas natural (blending):** Consiste en inyectar hidrógeno en la red existente de gas natural, con porcentajes que oscilan entre el 2% y el 20% en volumen.

Ventajas:

- Permite un despliegue rápido y descentralizado.
- Reduce las emisiones de CO₂ de forma inmediata sin necesidad de construir nuevas infraestructuras.

Limitaciones:

- Compatibilidad variable de equipos y materiales.
- Retos en medición y conversión energética.
- A partir de ciertos porcentajes, son necesarias adaptaciones en turbinas y compresores.



Figura 15: Gasoducto de Gas Natural. [22]

b) Reconversión de gasoductos existentes: Conversión de tuberías de gas natural para transportar hidrógeno puro.

Ventajas:

- Coste entre un 10% y 35% del de construir una nueva red.
- Capacidad de transporte energético similar a la del gas natural.

Limitaciones:

- Riesgo de fragilización del acero por hidrógeno.
- Necesidad de sustituir equipos auxiliares (válvulas, compresores, software).

c) Perspectiva europea: el European Hydrogen Backbone, Red proyectada de 39.700 km para 2040, con un 69% de infraestructura reconvertida.

Coste estimado: 2,3–4,4 €/MWh por cada 1.000 km, representando menos del 10% del coste de producción del hidrógeno.

4.2.3.2 Transporte por Carretera y Ferrocarril

El transporte mediante camiones o trenes es más flexible, pero está orientado a distancias cortas y medianas.



Figura 16: Transporte ferroviario de hidrógeno. [23]

Hidrógeno comprimido (CGH₂):

Presiones de 200–700 bar.

Capacidad típica: 300–700 kg por remolque.

Aplicaciones: suministro a estaciones de repostaje o industrias aisladas.

Costes: 1,05–5,95 €/kg H₂ para 50 km.



Figura 17: "Tube trailer" para transporte de hidrógeno comprimido. [24]

Hidrógeno líquido (LH₂):

Licuefacción a -253 °C.

Un camión de LH₂ puede transportar 5–12 veces más que uno de CGH₂.

Más competitivo para distancias superiores a 350 km, aunque con un coste energético elevado (40–50% del poder calorífico del H₂ se consume en la licuefacción).



Figura 18: Camión cisterna con hidrógeno verde líquido. [25]

4.2.3.3 Transporte Marítimo

Para distancias intercontinentales o superiores a 1.500 km, el transporte marítimo es la opción más

viable.

Hidrógeno líquido (LH₂): Permite transportar grandes volúmenes en buques criogénicos.



Figura 19: Transporte marítimo de hidrógeno líquido. [26]

Amoníaco (NH₃): Portador químico más consolidado; se produce a partir de H₂ y N₂ mediante el proceso Haber-Bosch. Se transporta con infraestructura ya existente y puede reconvertirse en hidrógeno en destino.

Metanol (CH₃OH): Producido a partir de H₂ y CO₂, se almacena en estado líquido con logística similar a los combustibles fósiles.

Portadores orgánicos líquidos (LOHC): Compuestos como el dibenziltolueno permiten transportar H₂ en condiciones ambientales, aunque la liberación posterior implica un coste energético adicional.

4.2.4 Infraestructuras y Puertos

El desarrollo de hubs logísticos será esencial para el comercio internacional de hidrógeno.

Adaptación de terminales de GNL: Muchas instalaciones pueden reconvertirse para gestionar hidrógeno líquido.

Puertos estratégicos: Ejemplo del Puerto de Róterdam, que proyecta manejar 20 millones de toneladas anuales para 2050.



Figura 20: Puerto de Róterdam. [27]

5 PRESENTE DEL HIDRÓGENO VERDE

El hidrógeno bajo en emisiones se ha consolidado en los últimos años como un pilar estratégico dentro de la transición energética global. Su papel no solo se centra en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino también en la diversificación de las fuentes de energía y en el fortalecimiento de la seguridad energética. En este apartado se analiza la situación actual del hidrógeno verde, así como sus perspectivas de crecimiento en términos de oferta y demanda, considerando tanto los avances tecnológicos como las políticas públicas y los retos asociados.

Aunque el interés en el hidrógeno bajo en emisiones se ha disparado, su despliegue aún enfrenta obstáculos importantes relacionados con los costes, la infraestructura y la incertidumbre de la demanda. La producción y el consumo continúan estando dominados por el hidrógeno gris, derivado de combustibles fósiles sin medidas de mitigación.

5.1 Demanda Global y Aplicaciones Actuales

En 2023, la demanda mundial de hidrógeno alcanzó **97 Mt**. No obstante, la mayor parte de este consumo sigue concentrada en aplicaciones tradicionales como:

- **Refinación de petróleo** (43 Mt en 2023).

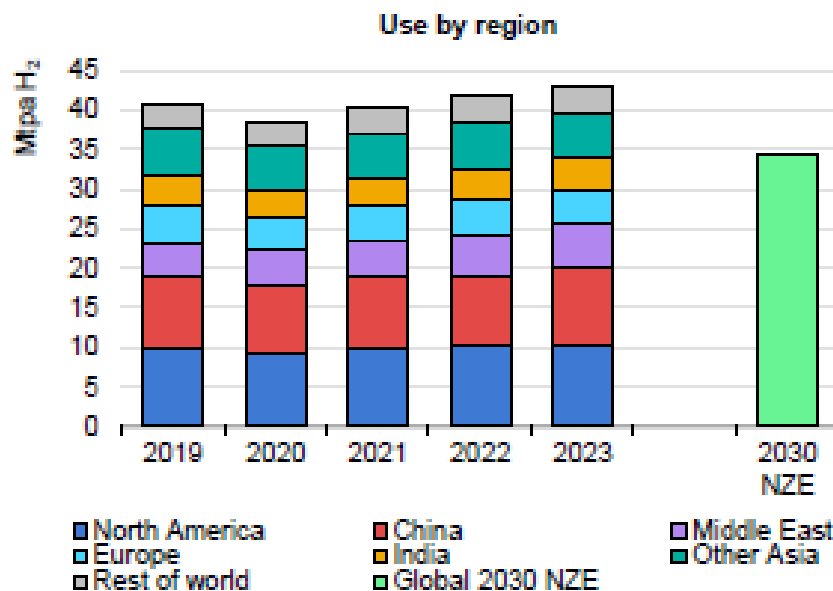


Gráfico 4: Uso del hidrógeno por región para refinación de petróleo [28]

- **Industria química** (54 Mt), con gran peso en la producción de **amoníaco** (60%), **metanol** (30%) y acero mediante **reducción directa del hierro (DRI)** (10%).

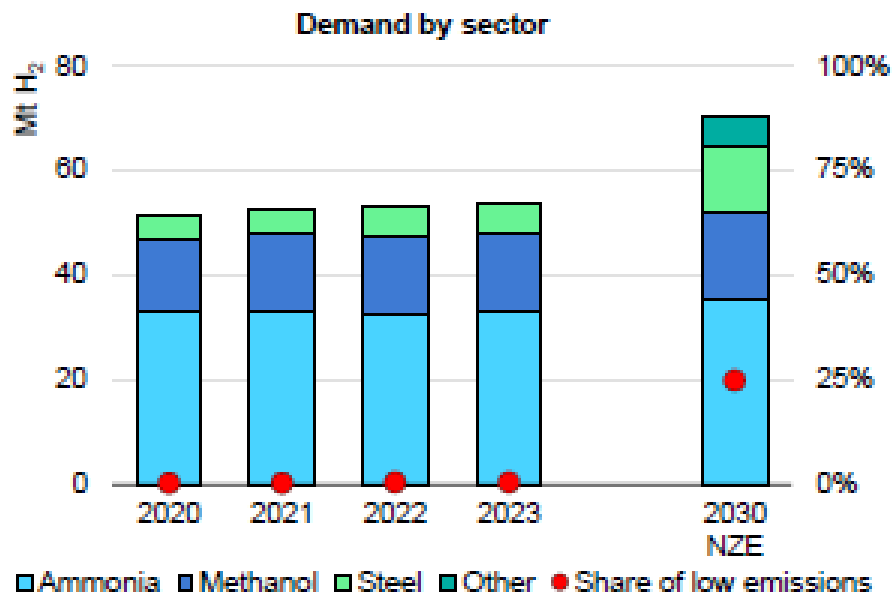


Gráfico 5: Uso del hidrógeno en la industria por subsector [28]

El hidrógeno bajo en emisiones representó menos de 1 Mt en 2023, aunque su consumo aumentó un 10% respecto al año anterior. Su presencia en sectores clave para la descarbonización, como el transporte pesado, la aviación, el transporte marítimo y la generación de electricidad, sigue siendo marginal, con una participación inferior al 1% de la demanda global. Sin embargo, destacan algunos avances:

- **Transporte:** crecimiento del 55% en 2023, con especial dinamismo en China.

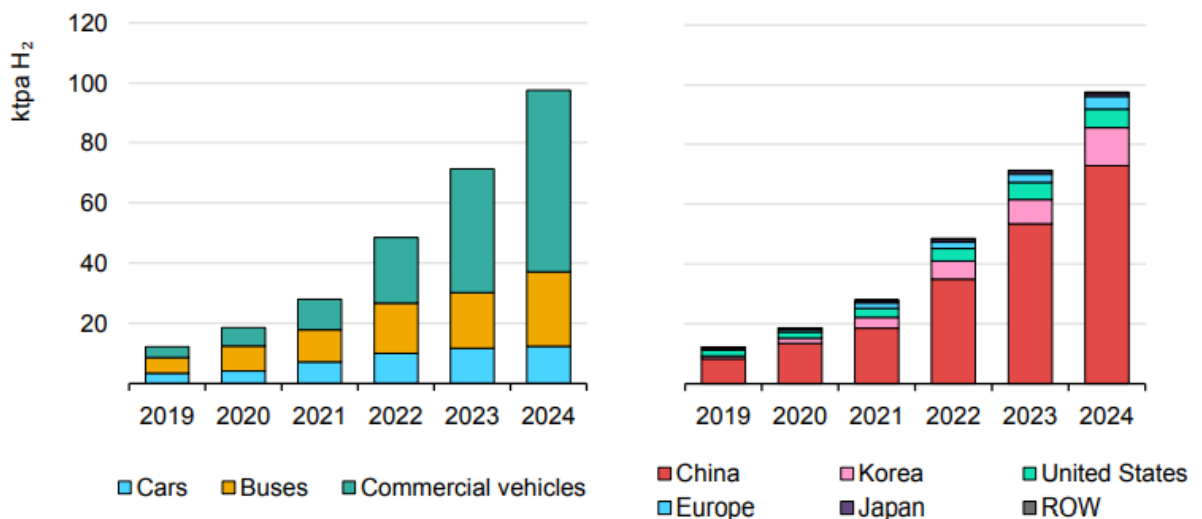


Gráfico 6: Consumo de hidrógeno en el transporte por carretera por vehículos y región, 2019-2024. [28]

- **Generación eléctrica:** ensayos exitosos en turbinas de gas alimentadas al 100% con hidrógeno.
- **Edificios:** aplicaciones aún testimoniales debido a barreras técnicas y sociales.

Uno de los principales desafíos es la competitividad económica. El hidrógeno verde cuesta entre 1,5 y 6 veces más que el hidrógeno gris. Aun así, el impacto en el precio final de los productos es limitado: por ejemplo, un vehículo eléctrico fabricado con acero verde solo aumentaría en torno a un 1% su coste final.

Este diferencial ha impulsado el uso de acuerdos de compra (offtake agreements) como herramienta clave para reducir riesgos de inversión. En 2023 se firmaron acuerdos por más de 2 Mtpa de hidrógeno equivalente, con fuerte presencia en los sectores químico, de refinación y marítimo. Empresas como TotalEnergies han lanzado licitaciones significativas, como la de 500 ktpa para descarbonizar sus refinerías en Europa.

5.2 Oferta Actual de Hidrógeno Bajo en Emisiones

La producción mundial de hidrógeno en 2023 fue de **97 Mt**, de los cuales menos del **1%** provino de fuentes bajas en carbono. China lidera tanto en capacidad instalada como en planes de expansión.

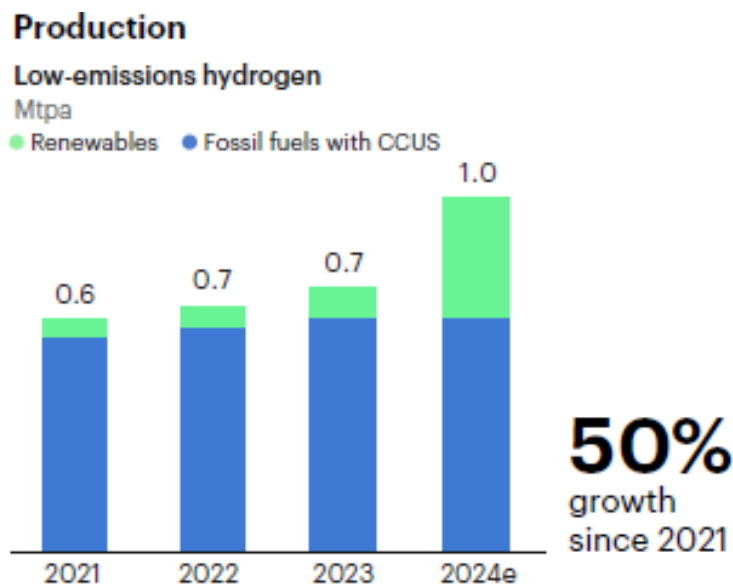


Gráfico 7: Producción de hidrógeno bajo en emisiones. [28]

- **Electrolizadores:**

- Capacidad instalada: **1,4 GW (2023) → 5 GW (2024)**.

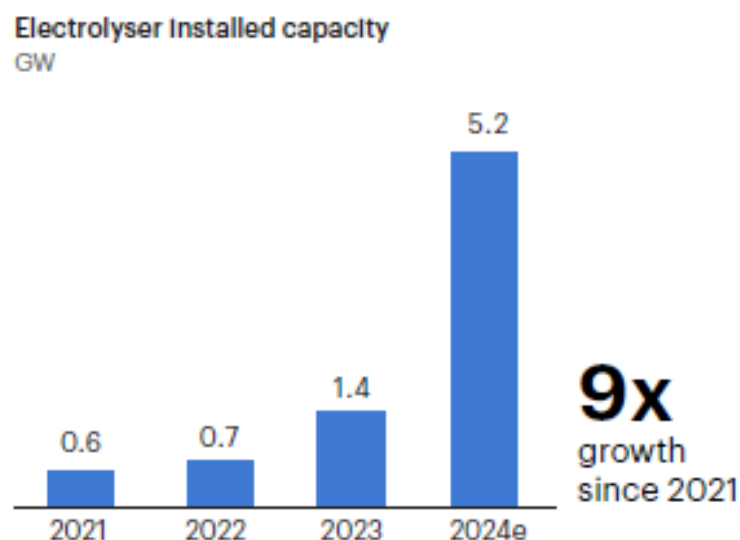


Gráfico 8: Capacidad real de los electrolizadores instalados. [28]

- Capacidad de fabricación: **41 GW/año en 2024**, con un 60% concentrado en China.

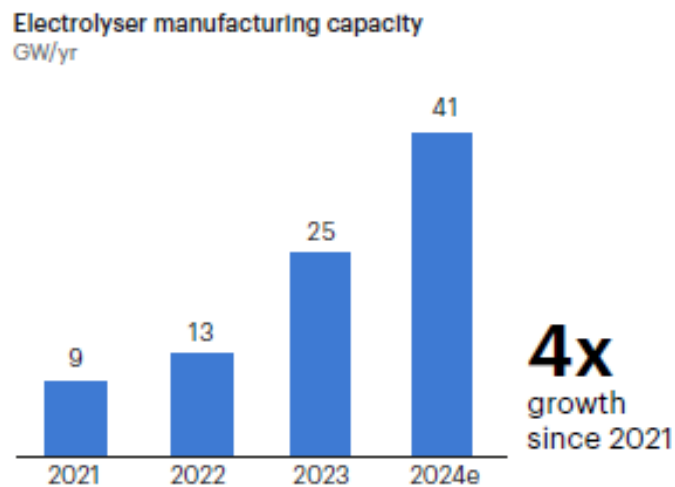


Gráfico 9: Capacidad de fabricación de electrolizadores. [28]

- Utilización: apenas **2,5 GW producidos en 2023**, mostrando una gran infrautilización.
- **Proyectos con Decisión Final de Inversión (FID):**
La capacidad comprometida para 2030 alcanzó 3,4 Mtpa, cinco veces superior a la producción actual, dividida casi en partes iguales entre electrólisis (55%) e hidrógeno azul con CCUS (45%).
- **Costos:**
El hidrógeno verde sigue siendo entre 1,5 y 6 veces más caro que el producido con fósiles, aunque se prevé una reducción gradual gracias a la innovación y economías de escala.
- **Innovación:**
Los avances tecnológicos se centran en mejorar la eficiencia de los electrolizadores (PEM, SOEC, AEM) y reducir sus costes. En 2022, las solicitudes de patentes relacionadas con hidrógeno crecieron un 47%.
- **Limitaciones hídricas:**
Cerca del 40% de los proyectos se sitúan en zonas con estrés hídrico, lo que ha impulsado soluciones como plantas de desalinización y el uso de aguas residuales tratadas.
- **Retos:**
La incertidumbre de la demanda y las dificultades en asegurar offtake agreements han generado retrasos, cancelaciones y baja rentabilidad para muchos proyectos anunciados.

6 FUTURO DEL HIDRÓGENO VERDE

El desarrollo del hidrógeno bajo en emisiones se encuentra en una fase crítica: su crecimiento dependerá de la consolidación de marcos regulatorios, la reducción de costes y la materialización de grandes inversiones en infraestructura.

6.1 Perspectivas de Crecimiento General

Las proyecciones indican que la producción de hidrógeno bajo en emisiones podría alcanzar 49 Mtpa en 2030, con un aumento del 30% respecto a estimaciones previas. El crecimiento estará dominado por proyectos de electrólisis a gran escala (gigavattios), que podrían representar hasta tres cuartas partes de la capacidad para 2030.

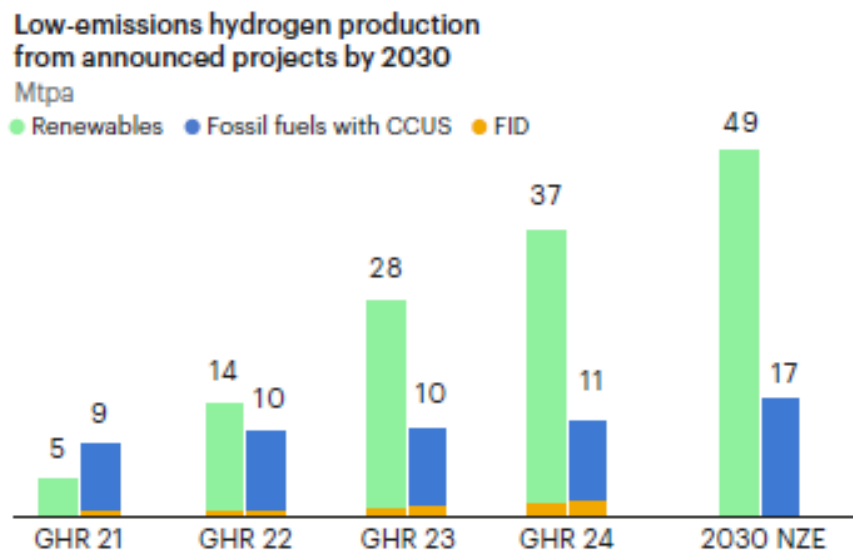


Gráfico 10: Producción de hidrógeno con bajas emisiones a partir de proyectos anunciados para 2030. [28]

Se espera que el coste de producción disminuya entre un 30% y un 50% hacia 2030, en línea con la reducción del 60% en el CAPEX de los electrolizadores, replicando lo ocurrido en sectores como la energía solar fotovoltaica.

6.2 Oferta a Futuro

- **Electrolizadores:**
La capacidad de fabricación superará los **165 GW/año en 2030**, con China, Europa e India como polos principales.

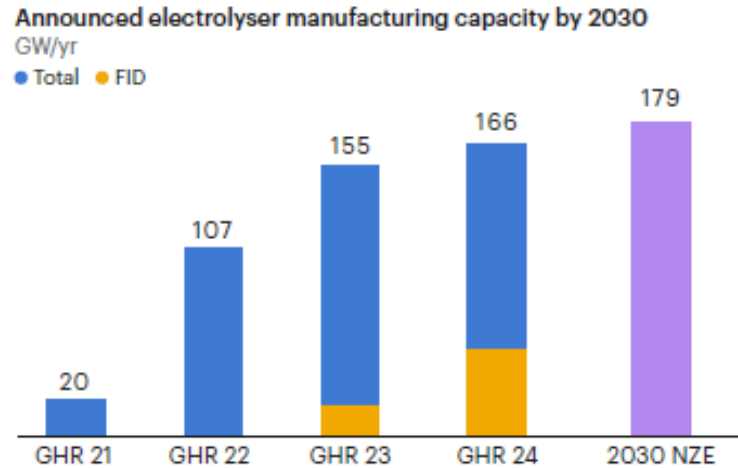


Gráfico 11: Capacidad anunciada de fabricación de electrolizadores para 2030. [28]

- **Proyectos de producción:**

La capacidad anunciada podría llegar a **520 GW en 2030**, aunque solo el **4%** ha alcanzado FID o está en construcción. América Latina, Australia y África destacan como regiones con gran potencial gracias a sus abundantes recursos renovables.

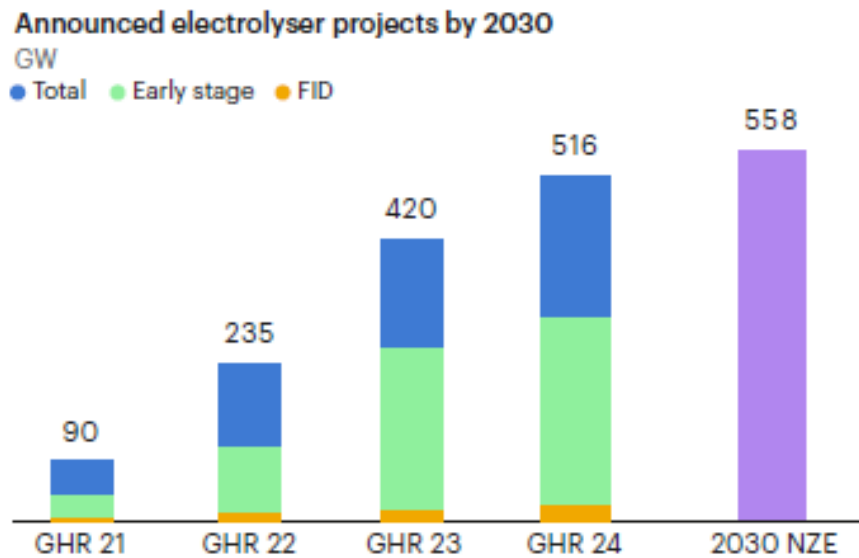


Gráfico 12: Proyectos de electrolizadores anunciados para 2030. [28]

- **Nuevas tecnologías:**

Se exploran alternativas como hidrógeno geológico, biomasa y reformadores autotérmicos electrificados con CCUS.

6.3 Demanda a Futuro

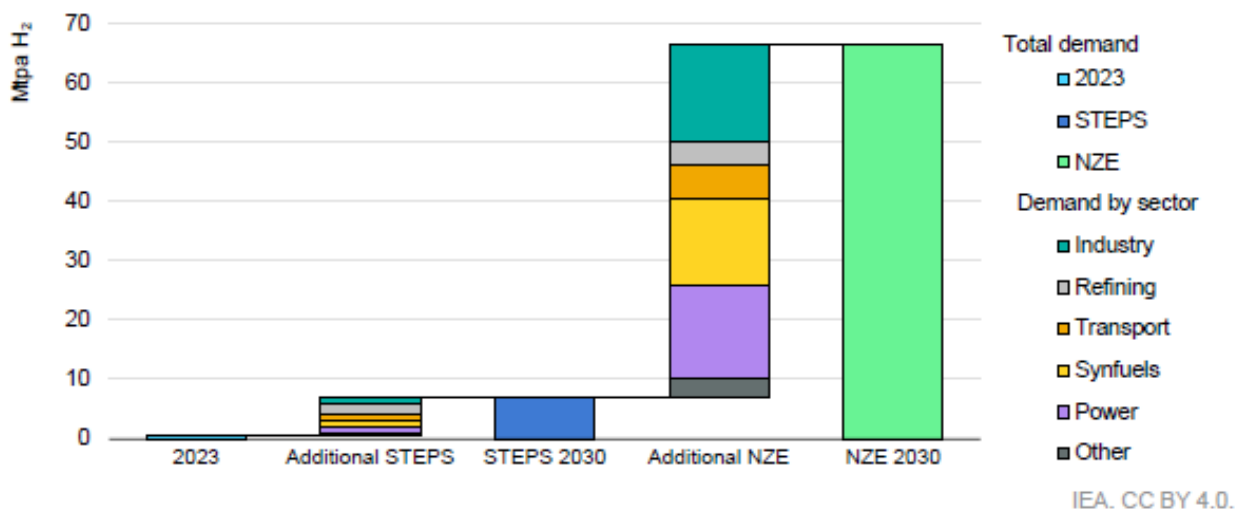
Las proyecciones muestran un fuerte desajuste entre la demanda prevista bajo políticas actuales y lo necesario para alcanzar la neutralidad climática:

- **Políticas actuales:** 6 Mtpa de hidrógeno verde para 2030.

- **Escenario de Cero Emisiones Netas (NZE):** se requieren **65 Mtpa**.

Sectores clave:

- **Refinación:** 1,6 Mtpa para 2030.
- **Industria:** hasta 70 Mtpa en 2030 bajo NZE, con fuerte presencia de proyectos de amoníaco, metanol y acero verde.
- **Transporte:** el amoníaco y metanol se consolidan como combustibles marítimos; SAF impulsados por hidrógeno avanzan en aviación; vehículos pesados y camiones de pila de combustible ganan tracción.
- **Edificios:** seguirán siendo marginales (20 ktpa en 2030).
- **Generación eléctrica:** turbinas 100% hidrógeno podrían estar disponibles en 2030; Alemania y Asia lideran licitaciones de centrales y subastas específicas.



Notes: NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario. STEPS = Stated Policies Scenario. "Other" includes buildings and biofuels upgrading.

Gráfico 13: Demanda de hidrógeno con bajas emisiones por sector en 2030, y en el escenario de políticas declaradas y el escenario de cero emisiones netas para 2050. [28]

Nota: STEPS Es un escenario o modelo utilizado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) para trazar una ruta sostenible para la transición energética global, basándose en el uso eficiente de las energías renovables y la reducción de emisiones de carbono. NZE se refiere al objetivo de reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) a cero, mediante la combinación de reducir las emisiones directas e indirectas y compensar las emisiones restantes a través de medidas como la captura de carbono o la reforestación.

7 RETOS Y PERSPECTIVAS

La afirmación del hidrógeno con bajas emisiones como un elemento energético esencial presenta varios desafíos. Pese a los progresos en la producción y las iniciativas piloto, la realización de una economía basada en el hidrógeno verde enfrenta una serie de obstáculos económicos, tecnológicos, normativos y sociales. Al mismo tiempo, se presentan grandes oportunidades que pueden transformar sectores clave de la industria, el transporte y la energía. La ingeniería industrial, con su metodología integral para la optimización de procesos, el diseño de sistemas y la gestión de proyectos, ocupa una posición central en esta evolución.

7.1 Retos Actuales y Futuros

7.1.1 Barreras Económicas y de Mercado

El principal impedimento permanece siendo la “prima verde”: el hidrógeno producido de manera renovable es entre 1,5 y 6 veces más costoso que el obtenido de fuentes fósiles. Aunque este aspecto tiene un impacto menor en el costo final de productos industriales, esta discrepancia complica su adopción en gran escala en áreas sensibles a precios.

La incertidumbre respecto a la demanda futura constituye otro elemento importante. Varias iniciativas carecen de contratos de compra claros, lo que incrementa el riesgo financiero y demora las decisiones relacionadas con inversiones. Ejemplos como la oferta de TotalEnergies en Europa, donde los precios iniciales rondaban los EUR 8/kg H₂, indican que el mercado todavía está en un proceso de aprendizaje y desarrollo.

Además, se observa un desfase en la inversión: en 2023 se asignaron USD 3,5 mil millones a proyectos de electrólisis, cifra muy alejada de los USD 50 mil millones anuales requeridos hasta 2030 para alcanzar los objetivos de neutralidad climática.

7.1.2 Desafíos Tecnológicos y de Escalado

La capacidad de producción de electrolizadores ha aumentado rápidamente, alcanzando los 25 GW/año, no obstante, gran parte de esta capacidad está infrautilizada debido a la falta de proyectos con FID. Esta discrepancia entre el potencial industrial y la implementación real impide el aprendizaje por escala y la reducción de costos.

Adicionalmente, siguen existiendo retrasos y cancelaciones de proyectos por motivos regulatorios, dificultades en la financiación y la falta de una demanda sólida. Apenas un 7% de la producción de hidrógeno con bajas emisiones proyectada para 2030 ha obtenido FID, evidenciando una notable discrepancia entre los anuncios y la realidad.

En lo que respecta al uso final, la madurez tecnológica varía considerablemente: mientras que la electrólisis alcalina y PEM están cerca de su comercialización, aplicaciones como la reducción directa de hierro al 100% con hidrógeno aún no se encuentran preparadas para ser implementadas a escala industrial.

7.1.3 Desafíos de Infraestructura y Logística

La implementación del hidrógeno necesita infraestructuras que actualmente no existen en gran

cantidad. Se calcula que se requerirán 40,000 km de nuevos gasoductos para el año 2035, pero únicamente un 2% de estos planes tiene aprobación definitiva. El almacenamiento subterráneo también representa un obstáculo: los proyectos anunciados solo alcanzan 10 TWh para 2035, mientras que se necesitan más de 230 TWh para un escenario de emisiones netas cero.

En el ámbito del comercio internacional, el amoníaco se posiciona como el principal portador, aunque las tecnologías de craqueo necesarias para obtener hidrógeno puro no han sido validadas a gran escala. Será fundamental construir más de 100 terminales portuarios para facilitar este comercio.

7.1.4 Consideraciones Regulatorias y Ambientales

La falta de armonización en las regulaciones y certificaciones provoca una fragmentación del mercado. Cada nación formula sus propios esquemas, lo que complica el comercio internacional y genera incertidumbre para los inversores.

Además, surgen inquietudes acerca del impacto ambiental indirecto: las fugas de hidrógeno a lo largo de la cadena de suministro podrían contribuir al calentamiento global, y aproximadamente el 40% de los proyectos se localizan en áreas con escasez de agua, lo que requiere soluciones complementarias como la desalinización o la reutilización de aguas residuales.

7.1.5 Riesgos Sociales y de Aceptación

El aspecto social es crucial y frecuentemente es subestimado. La falta de diálogo con las comunidades locales ha provocado resistencia y demoras en los proyectos piloto. Asimismo, es preocupante la insuficiencia de personal cualificado en los organismos reguladores, lo que retrasa la obtención de permisos. La aceptación pública, la transparencia y la generación de beneficios para la comunidad serán factores decisivos para acelerar la ejecución.

7.2 Perspectivas y Oportunidades

7.2.1 Crecimiento Previsto y Disminución de Costos

Los pronósticos indican que la producción de hidrógeno con bajas emisiones podría alcanzar 49 Mtpa para 2030, con plantas de electrolizadores de gigavatios constituyendo hasta el 75% de los proyectos. Gracias a las economías de escala y a la reducción de los costos de capital, el precio de producción podría descender entre un 30% y un 50% en ese lapso.

7.2.2 Progresos Tecnológicos e Innovaciones

La innovación jugará un papel fundamental: desde electrolizadores más eficientes y duraderos, hasta nuevas vías de producción como el hidrógeno natural, la biomasa y los ATR con captura y almacenamiento de carbono. Al mismo tiempo, los sectores finales están evolucionando hacia tecnologías más avanzadas, tales como hornos industriales alimentados con hidrógeno, motores de combustión adaptados para transporte pesado y turbinas de gas que funcionan al 100% con hidrógeno en la producción eléctrica.

7.2.3 Respaldo Político y Estructuras Regulatorias

Más de 58 países y la Unión Europea ya han implementado estrategias nacionales de hidrógeno. Estas políticas incorporan cuotas de uso obligatorias, contratos por diferencia, subvenciones directas y programas de hubs regionales. Además, se están realizando esfuerzos hacia la unificación de certificaciones internacionales, a través de iniciativas de la ISO y acuerdos alcanzados en la COP 28.

7.2.4 Oportunidades de Demanda Sectorial

Industria química y refinación: sectores que muestran una menor dificultad técnica para integrar hidrógeno verde.

Acero: el hidrógeno abre oportunidades para un mercado de exportación de acero verde de gran valor, especialmente en América Latina.

Fertilizantes: producción nacional de amoníaco con bajas emisiones para fortalecer la seguridad alimentaria.

Transporte marítimo y aéreo: el amoníaco, metanol y SAF son considerados vectores fundamentales.

Generación eléctrica: existen licitaciones en Asia y Europa para plantas de nueva generación adaptadas a H₂.

7.2.5 Potencial Geográfico y Comercio Internacional

Áreas como América Latina, Australia y África tienen el potencial de liderar debido a su acceso a energías renovables y costos competitivos. Se estima que el comercio internacional alcanzará 70 Mt H₂-eq para 2050, con Europa, Japón y Corea como los principales compradores. El desarrollo de valles de hidrógeno facilitará la concentración de producción, uso e innovación, creando centros industriales especializados.

7.2.6 Inversión y Financiación Estratégica

La financiación multilateral, encabezada por el Banco Mundial y el Banco Europeo de Inversiones, ya está dirigiendo fondos hacia mercados en desarrollo. Además, las compañías petroleras nacionales de América Latina han empezado a diversificarse hacia iniciativas de hidrógeno, aprovechando su pericia en infraestructura, cadenas logísticas y recursos humanos.[28]

8 CONCLUSIONES

En conclusión, el hidrógeno verde se consolida como un vector energético para alcanzar la descarbonización profunda del sistema energético mundial. Su capacidad para almacenar, transportar y suministrar energía libre de emisiones lo convierte en un pilar estratégico dentro del nuevo paradigma energético basado en fuentes renovables. Frente a los combustibles fósiles, su principal fortaleza radica en su versatilidad y en la posibilidad de integrarse en sectores donde la electrificación directa resulta técnica o económicamente inviable, como la industria pesada, el transporte marítimo o la aviación.

El análisis realizado demuestra que las tecnologías de producción mediante electrólisis, especialmente las modalidades AWE y PEM, han alcanzado un grado de madurez suficiente para su despliegue a escala comercial, mientras que las alternativas emergentes (AEM y SOEC) ofrecen un prometedor potencial de mejora en eficiencia y costes. Sin embargo, el elevado consumo energético y el coste de los electrolizadores continúan siendo los principales obstáculos técnicos para la expansión masiva del hidrógeno verde.

Desde el punto de vista económico, la competitividad del hidrógeno renovable depende de la reducción del precio de la electricidad renovable, de la economía de escala en la fabricación de electrolizadores y de la implementación de marcos regulatorios estables que favorezcan la inversión. En este sentido, las estrategias nacionales e internacionales, junto con los mecanismos de apoyo financiero, como los contratos por diferencia y los acuerdos de compra a largo plazo, serán determinantes para acelerar su adopción.

En el plano medioambiental, el hidrógeno verde representa una de las soluciones más limpias y sostenibles disponibles, capaz de evitar cientos de millones de toneladas de CO₂ al año si sustituye al hidrógeno gris y al gas natural en los procesos industriales. No obstante, será fundamental garantizar un uso racional de los recursos hídricos y evitar emisiones indirectas asociadas a fugas o pérdidas a lo largo de la cadena de valor.

Asimismo, el desarrollo de infraestructuras de transporte, almacenamiento y distribución se perfila como una condición indispensable para la creación de un verdadero mercado global del hidrógeno. La reconversión de gasoductos existentes, el uso de portadores químicos como el amoníaco o los LOHC, y la creación de puertos y valles de hidrógeno facilitarán la interconexión entre regiones productoras y consumidoras.

En síntesis, el hidrógeno verde no es una solución aislada, sino un componente integrador de un sistema energético resiliente, sostenible y descentralizado. Su éxito dependerá de la cooperación entre gobiernos, industria y comunidad científica, así como de la innovación tecnológica continua. Si se logran superar las barreras actuales, el hidrógeno verde podrá desempeñar un papel protagonista en la transición hacia una economía climáticamente neutra, aportando seguridad energética, competitividad industrial y beneficios medioambientales a escala global.

REFERENCIAS

- [1] I. Energy Agency, «Global Energy Review 2025», 2025. [En línea]. Disponible en: www.iea.org
- [2] «Del gris al verde, los colores del hidrógeno - Good New Energy». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/del-gris-al-verde-los-colores-del-hidrogeno/>
- [3] «El hidrógeno y sus múltiples colores - Mincatec Energy». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mincatec-energy.com/es/el-hidrogeno-y-sus-multiples-colores/>
- [4] «lignito | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/lignito?m=form>
- [5] «Los colores del hidrógeno - Fundación Descubre». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://fundaciondescubre.es/recursos/los-colores-del-hidrogeno/>
- [6] «Diferencia entre hidrógeno verde y azul - Iberdrola». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/diferencia-hidrogeno-verde-azul>
- [7] «Hellonext - Blog». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hellonext.world/en/blog/green-blue-and-grey-hydrogen-the-main-differences>
- [8] «Los colores del hidrógeno | FisiQuímicamente». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://fisiquimicamente.com/blog/2023/03/18/los-colores-del-hidrogeno/>
- [9] «pirólisis | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/pir%C3%B3lisis>
- [10] «¿Qué es el hidrógeno blanco? – Good New Energy». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://goodnewenergy.enagas.es/sostenibles/hidrogeno-blanco/>
- [11] «Sitio web del Hidrógeno». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno.html>
- [12] «Hidrógeno - ARIEMA». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ariema.com/informacion-sobre-hidrogeno>
- [13] «Hydrogen-a carbon-free energy carrier and commodity».
- [14] «Últimas noticias de Alsa, líder en movilidad sostenible - Alsa». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.alsa.es/-/alsa-pone-hoy-en-marcha-el-primer-autobus-de-hidrogeno-que-operara-en-espana-de-forma-permanente>
- [15] «Claves del Hidrógeno Verde - Induambiente». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.induambiente.com/informe-tecnico/calderas/claves-del-hidrogeno-verde>
- [16] «Qué es el Hidrógeno Verde y su importancia - Iberdrola». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>
- [17] «¿Qué es el hidrógeno verde? | iAguá». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-hidrogeno-verde>
- [18] S. Shiva Kumar y H. Lim, «An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production», 1 de noviembre de 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.egy.2022.10.127.
- [19] «¿Qué es el hidrógeno verde? - H2 Fusión». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://h2fusion.es/que-es-el-hidrogeno-verde/>
- [20] «Tipos de tanques de hidrógeno: diferencias y beneficios técnicos - Noticias - Ningbo Vet Energy Technology Co., Ltd.» Accedido: 12 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.china->

vet.com/news-show-1043585.html

- [21] «Métodos de almacenamiento del hidrógeno - SynerHy». Accedido: 12 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>
- [22] «Transporte de Energía mediante diferentes Tipos de Tuberías». Accedido: 12 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://inspenet.com/articulo/tipos-de-tuberias-para-transporte-de-energia/>
- [23] «Transporte ferroviario: la solución para el suministro eficiente y fiable de hidrógeno - Revista Ejecutivos». Accedido: 12 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ejecutivos.es/reportaje/transporte-ferroviario-la-solucion-para-el-suministro-eficiente-y-fiable-de-hidrogeno/>
- [24] «CALVERA HYDROGEN desarrolla para Shell Hydrogen el modelo de Tube Trailer para transporte de hidrógeno, de mayor capacidad del mundo. - Calvera Hydrogen». Accedido: 12 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.calvera.es/es/calvera-hydrogen-desarrolla-para-shell-hydrogen-el-modelo-de-tube-trailer-para-transporte-de-hidrogeno-de-mayor-capacidad-del-mundo/>
- [25] «Plug Power carga su primer camión cisterna con hidrógeno líquido». Accedido: 12 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hidrogeno-verde.es/plug-power-hidrogeno-liquido/>
- [26] «Transporte marítimo de hidrógeno para 2025 | RM Forwarding». Accedido: 12 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://rm-forwarding.com/2022/01/12/transporte-maritimo-de-hidrogeno-para-2025/>
- [27] «El Puerto de Róterdam pisa el acelerador para convertirse en el Centro Europeo del Hidrógeno». Accedido: 12 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/el-puerto-de-roterdam-pisa-el-acelerador-para-convertirse-en-el-centro-europeo-del-hidrogeno/>
- [28] I. Energy Agency, «Global Hydrogen Review 2024», 2024. [En línea]. Disponible en: www.iea.org