



5th International Symposium on Master Engineering *Booklets*



RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA UNIVERSIA - Google Scholar DOI - REDIB - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID - V|LEX - EBSCO

Title: **Hydrogen Ecosystems: Innovating the energy future**

Author: Rangel-Hernandez, Victor Hugo

Editorial label MARVID: 607-8695
BMARVID Control Number: 2025-01
BMARVID Classification (2025): 021025-0001

Pages: 33

RNA: 03-2010-032610115700-14

MARVID-México

Park Pedregal Business. 3580,
Anillo Perif., San Jerónimo
Aculco, Álvaro Obregón,
01900 Ciudad de México, CDMX,
Phone: +52 1 55 6159 2296
Skype: MARVID-México S.C.
E-mail: contact@marvid.org
Facebook: MARVID-México S. C.
X: [@Marvid_México](https://twitter.com/Marvid_México)

www.marvid.org

Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

1.1 Situación Actual

El hidrógeno está reconocido como un gas de combustión limpia que podría contribuir potencialmente a más del 20% de las reducciones anuales de emisiones globales para 2050 ¹.

Aplicaciones Industriales

El hidrógeno se está utilizando para descarbonizar industrias difíciles de eliminar como el acero, el cemento y los productos químicos. También desempeña un papel en la producción y los procesos de refinado de amoníaco.

Sector de transporte

Los vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCV) están ganando terreno, especialmente para transporte pesado como autobuses, camiones y trenes, donde las baterías pueden ser menos eficaces. El potencial del hidrógeno para su uso en el transporte marítimo, ferroviario y aeronáutico también está en fase de exploración.

Innovaciones tecnológicas

Los avances en tecnologías de pilas de combustible y electrólisis están impulsando mejoras de eficiencia y reducciones de costes, haciendo que el hidrógeno sea más viable económicamente.

Política y regulación

Los gobiernos están introduciendo políticas para estimular el uso del hidrógeno, incluyendo subvenciones, financiación para investigación y desarrollo y fijación de precios del carbono. También está surgiendo la cooperación internacional, centrada en establecer normas y prácticas comerciales.

Eventos y colaboraciones globales

Iniciativas como la Alianza del Hidrógeno Limpio y colaboraciones para establecer corredores comerciales de hidrógeno están fomentando la colaboración global. Estas reuniones tienen como objetivo construir casos de negocio, facilitar conexiones y desarrollar soluciones a largo plazo para el despliegue de hidrógeno.

Take-away: el hidrógeno se considera cada vez más un componente esencial del futuro sistema energético bajo en carbono, con un impulso considerable hacia su adopción más amplia en diversos sectores.

¿Qué significa el término “Net Zero”?

El término "Cero Neto" se refiere a un estado ideal en el que la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero liberadas a la atmósfera es igual a la cantidad eliminada.

Para evitar un calentamiento permanente —y catastrófico— del planeta, todas las industrias deben alcanzar emisiones netas cero.

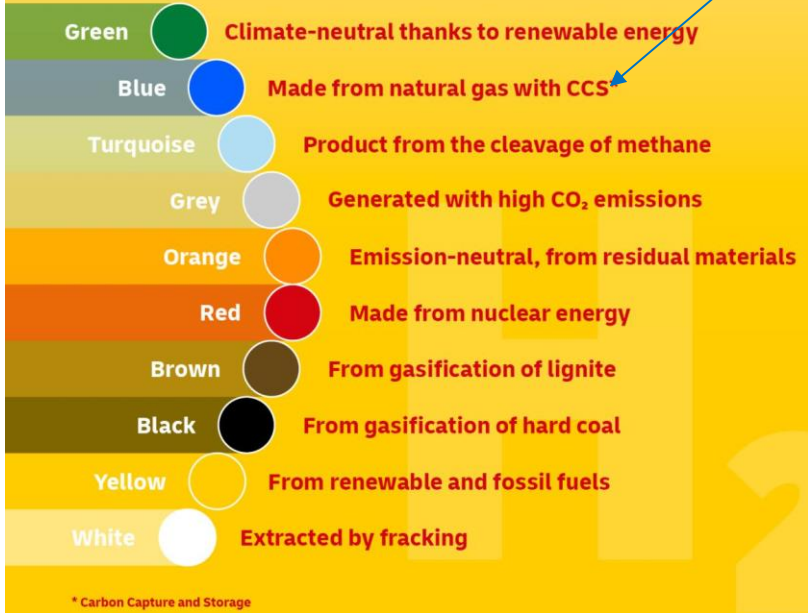
La descarbonización, una reducción del carbono en la atmósfera, puede lograrse si, y solo si, existe una voluntad y compromiso global para cambiar a fuentes energéticas con menos emisiones de carbono y contrarrestar cualquier carbono que se emita.

1.2 Colores del hidrógeno



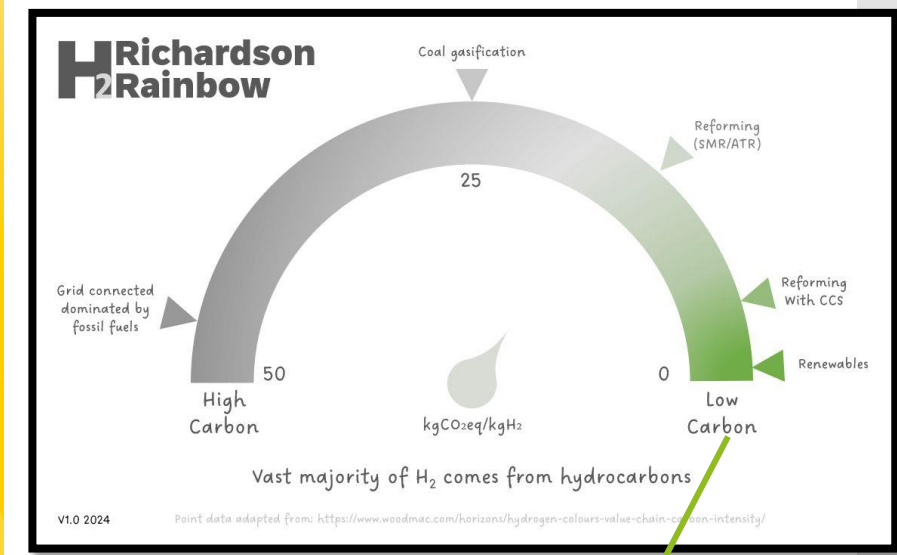
Color por proceso de producción

HYDROGEN COLORS EXPLAINED



Por poner un ejemplo, cuando se produce a partir de GN: 1 tonelada de H₂ produce alrededor de 10 toneladas de CO₂.

Por intensidad de carbono (independientemente del proceso de producción)^{2,3}



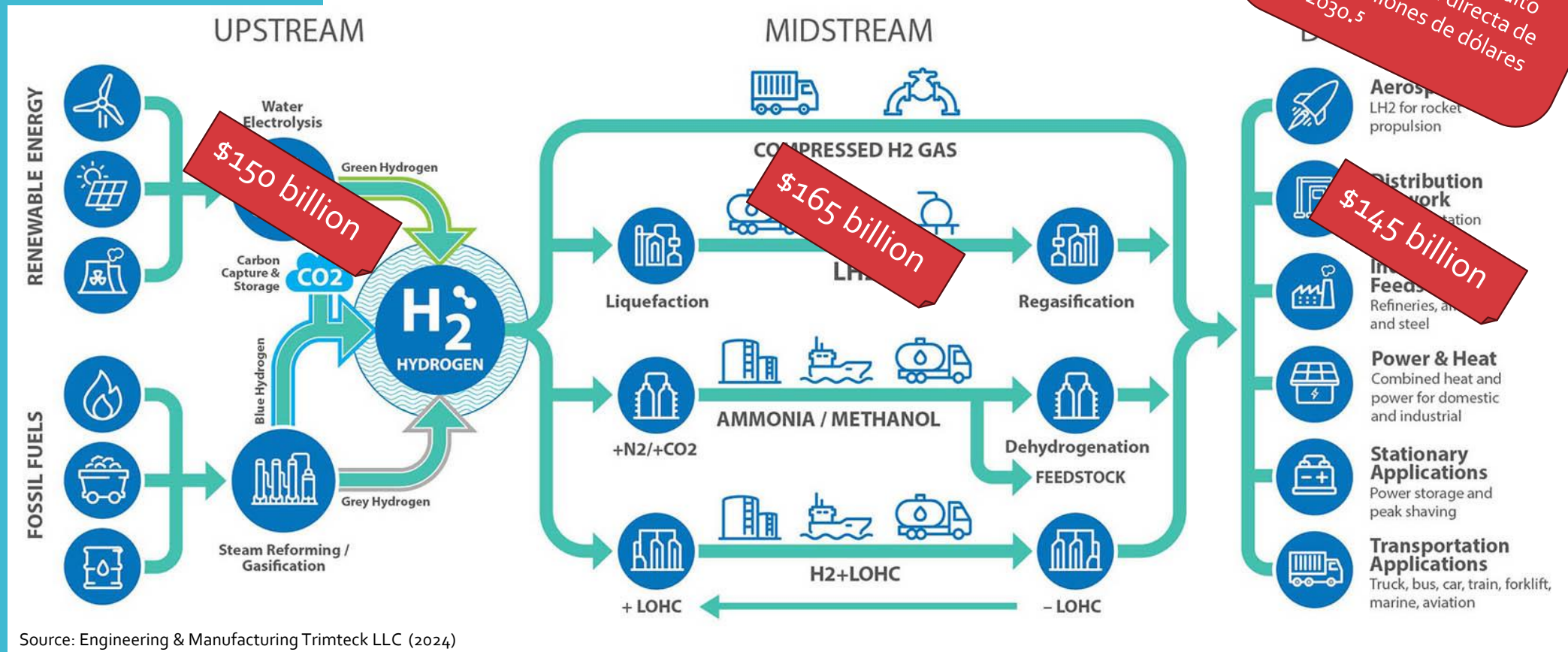
El motor de la baja demanda de carbono de H₂ es la política gubernamental de descarbonización.

2. Hydrogen Truck: Perspectives and Challenges for Zero Emission Road Freight, DHL, (2024). https://dhl-freight-connections.com/en/sustainability/hydrogen-truck-perspectives-and-challenges-for-zero-emission-road-freight/?nu_ref=Oktopost-LinkedIn&utm_campaign=FRT_Freight+Connections&utm_content=LinkedIn-Andreas+Wunsch&utm_medium=Social-Media&utm_source=LinkedIn
 3. Taken from LinkedIn, adapted by Ben Richardson (2024) <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7221444414584336384/>

1.3 Cadena de Valor del Hidrógeno

La cadena de valor del hidrógeno es altamente compleja y requiere mucho capital.

El primer obstáculo que impide que el hidrógeno contribuya masivamente a la descarbonización es el alto CAPEX. Inversión directa de 460.000 millones de dólares para 2030.⁵

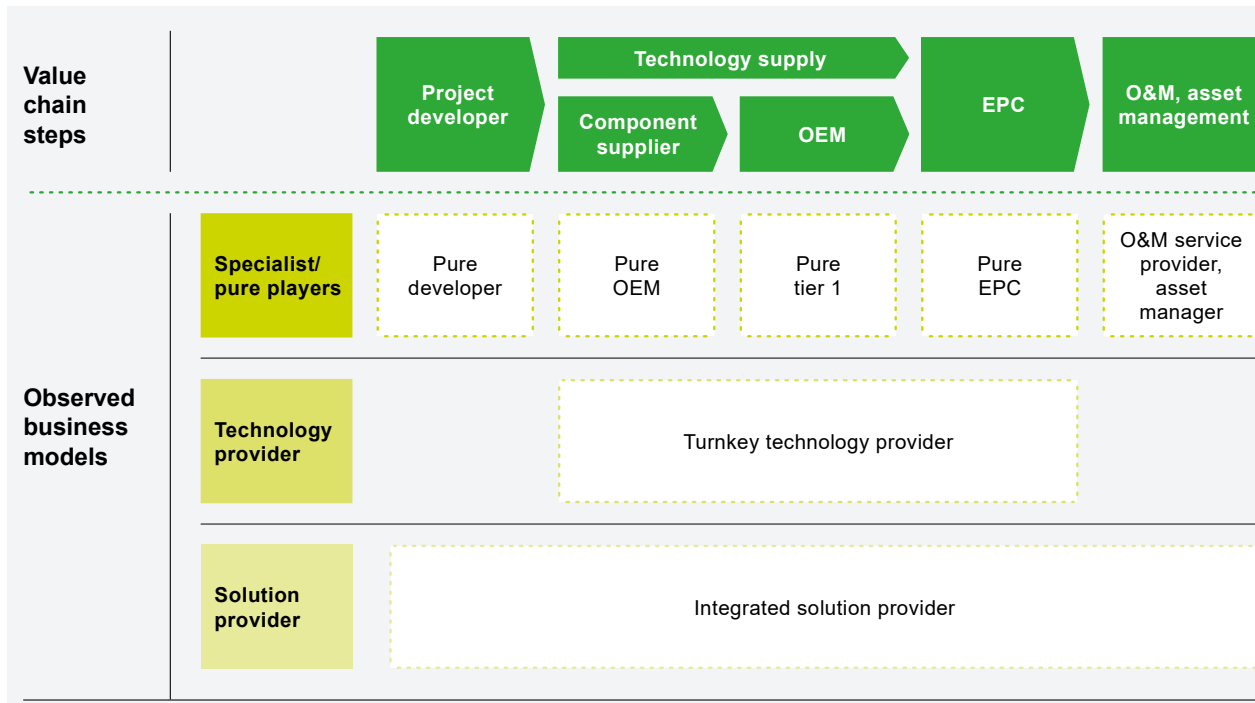


La complejidad proviene principalmente del hecho de que los segmentos de la industria no evolucionan al mismo ritmo, y las tecnologías y regulaciones de rápida evolución avanzan tan rápido que mantenerse al día puede ser un desafío.

5. McKinsey: What is hydrogen energy (2023): <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-hydrogen-energy>

1.3 Modelo de negocio del hidrógeno

¿En qué posición quieres jugar?



Take-away

Aunque el sector del hidrógeno sigue una trayectoria ascendente con un potencial prometedor, se enfrenta a desafíos relacionados con la ejecución de proyectos y la necesidad de avances tecnológicos.

Comprender la cadena de valor del hidrógeno resalta las interconexiones y dependencias de cada etapa.

La integración exitosa de la cadena de valor requiere avances en tecnología, infraestructuras y marcos regulatorios para garantizar la eficiencia, la seguridad y la viabilidad económica en todas las etapas.

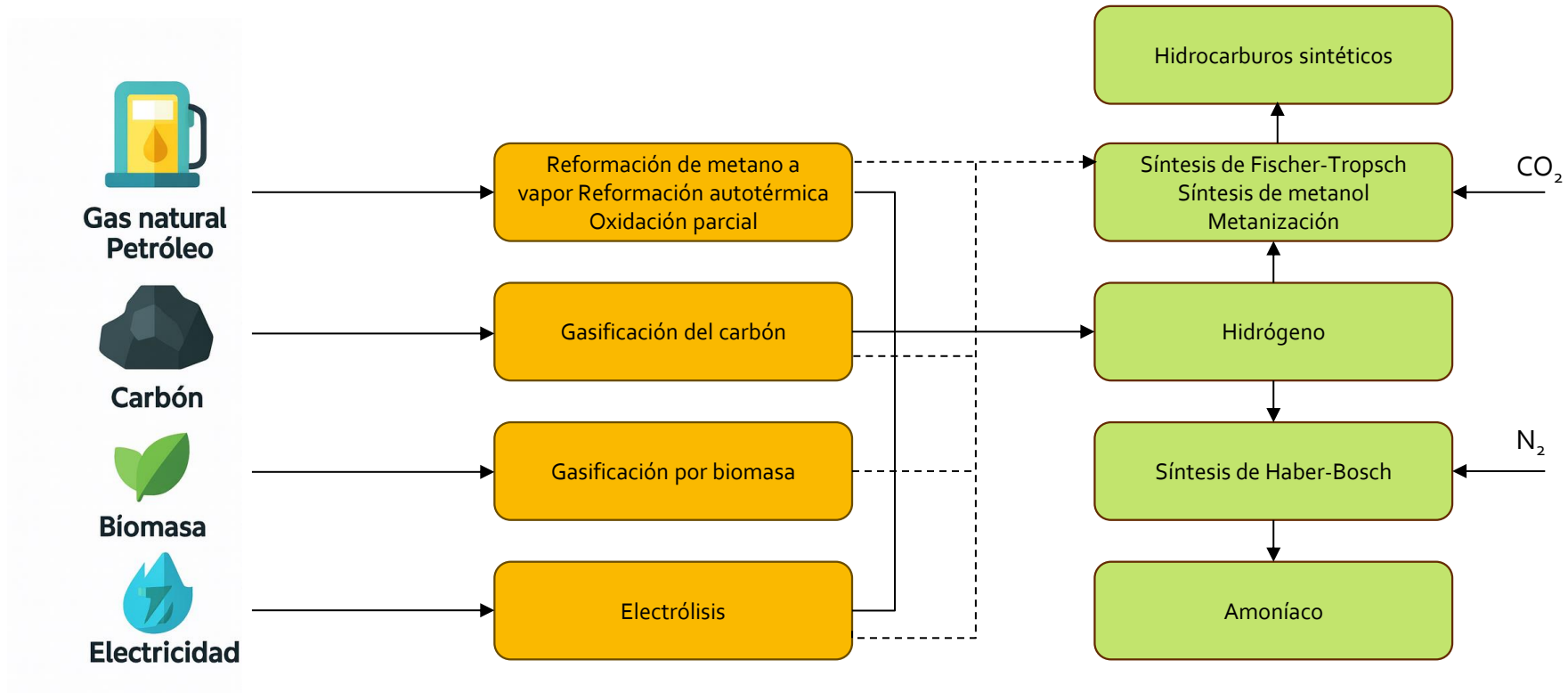
2) Producción y Generación



**VANGUARD
H2 SYSTEMS**



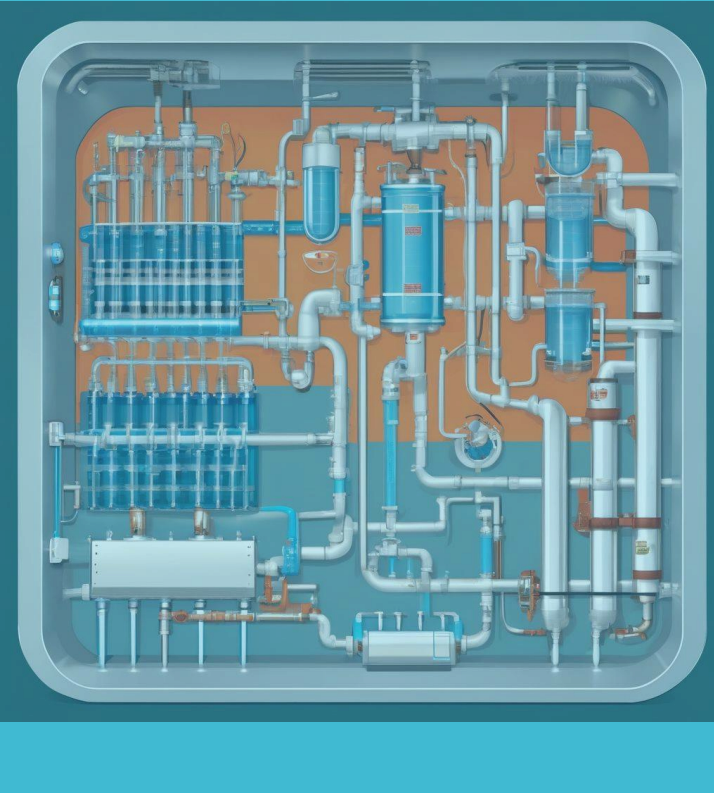
2.1 Producción de hidrógeno hoy en día



Notes: N₂ = nitrogen. The dotted lines represent the flow of hydrogen-containing synthesis gas (mixture of hydrogen and carbon monoxide) from hydrocarbon fuels for further conversion into other synthetic hydrocarbons, such as coal-to-liquids or gas-to-liquids. The direct conversion route of hydrocarbons via synthesis gas into other synthetic hydrocarbons is likely more favourable in terms of emissions (especially when coupled with CCUS) or costs compared with producing pure hydrogen from hydrocarbons first and then combining this hydrogen again with CO₂ for the production of synthetic hydrocarbons, particularly if the CO₂ input is of fossil origin.

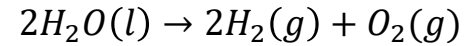
Source: IEA 2019. All rights reserved.

2.3 Hidrógeno del agua y la electricidad



La electrólisis del agua es un proceso electroquímico que divide el agua (H_2O) en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) al hacer pasar una corriente eléctrica a través del agua.

¿Qué pasa con el consumo de agua ultrapura?



Es decir, en teoría
1 kg de H_2 requiere 9 litros de agua

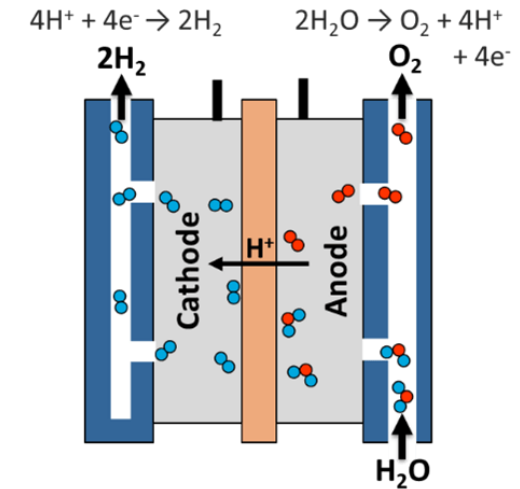
Sin embargo, en la práctica
1 kg de H_2 requiere entre 11 y 13,5 l de agua.

¿Y qué hay del consumo energético?

En teoría, 1 kg H_2 requiere 48 kWh de electricidad⁷.

En la práctica, 1 kg de H_2 necesita entre 50 y 55 kWh de electricidad.

Esto significa una eficiencia eléctrica efectiva del 70-80%



Representación gráfica de un electrolizador de membrana electrolítica polimérica⁶.

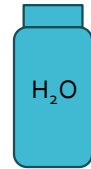
$$\eta_{elect} = \frac{\text{Entalpia } H_2}{\text{Electricidad utilizada}} = \frac{\dot{m}_{H_2} HHV}{kW}$$

6. Hydrogen production electrolysis, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (2024). <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>.

7. Own calculations considering reaction at standard conditions (25°C), HHV of hydrogen = 40 kWh/kg, max. theoretical efficiency = 83%

2.3 Hidrógeno del agua y la electricidad

¿Cuánta agua ultrapura por MW de electrolizador?



Agua ultrapura
0.2 m³/h



Electrolizador
1 MW

Sin embargo, la cantidad de agua ultrapura dependerá en gran medida de la eficiencia del electrolizador.

Pero si se tiene en cuenta la fuente de agua, entonces la cantidad de agua cruda necesaria para generar 1 m³ de agua ultrapura es:

Ejemplo:

Para producir 100.000 toneladas de H₂ se necesitarán 900.000 m³ de agua ultrapura:

- 1.200.000 m³ de agua subterránea;
- 1.300.000 m³ de aguas residuales tratadas;
- 3.000.000 m³ de agua de mar.

Valores de recuperación de agua:



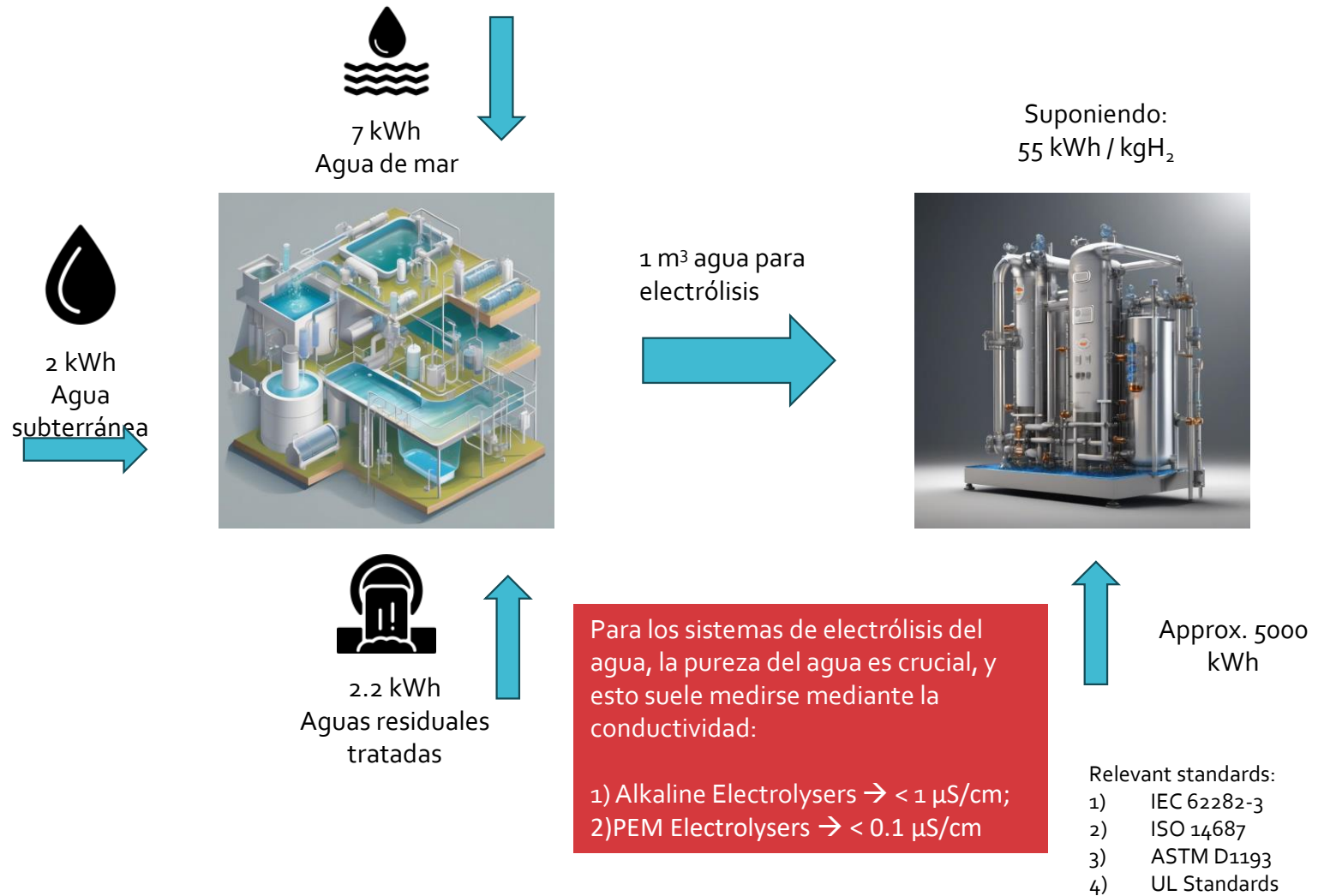
> 98%

90-95%

40-50%

2.3 Hydrogen from Water and Electricity

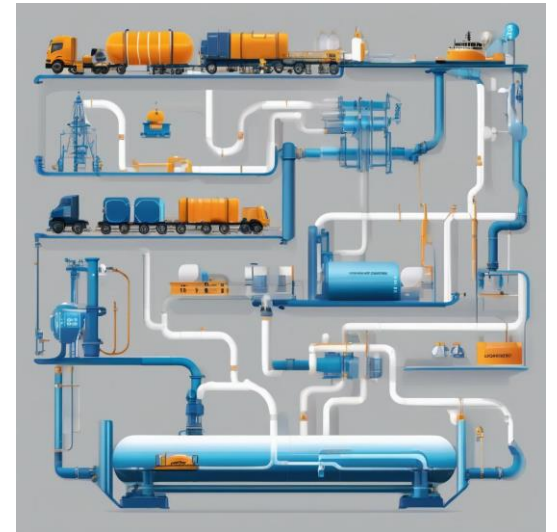
¿Cuánta energía se necesita para purificar 1 m³ de agua?



3. Almacenamiento, transmisión y distribución de hidrógeno



**VANGUARD
H2 SYSTEMS**

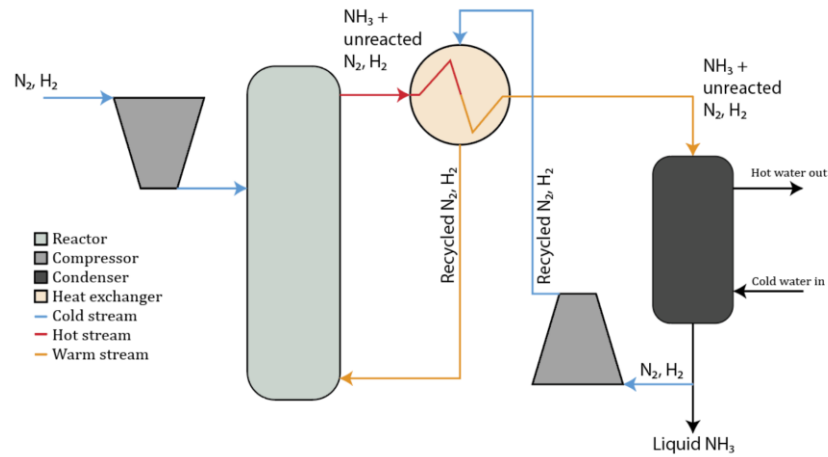


3.1 Almacenamiento de hidrógeno

Método de almacenamiento	Funciones	Densidad de energía gravimétrica (MJ/kg)	Densidad de energía volumétrica (MJ/m ³)	Costo (USD/kg _{H₂})	Requisitos de seguridad
<p>It requires approx. 12% of the energy content of H₂.</p>	<p>Presión de almacenamiento: Normalmente entre 350 y 700 bar.</p> <p>Material del tanque: Normas para materiales compuestos de alta resistencia.</p> <p>Ventajas: diseño sencillo, coste relativamente bajo.</p> <p>Desventajas: Requieren depósitos pesados y medidas de seguridad debido a la alta presión.</p>	120-142	<p>2,700 – 3,100 (350 bara @ 20°C)</p> <p>4,500 – 5,300 (700 bara @ 20°C)</p>	2.50 – 6.00	<p>Tanques de alta presión: deben ser probados y certificados.</p> <p>Ventilación necesaria para evitar la acumulación de gases. Las válvulas de seguridad y los sistemas de alivio de presión son esenciales.</p>
<p>It requires approx. 20-30% of the energy content of H₂.</p>	<p>Temperatura de almacenamiento: Requiere temperaturas criogénicas de -253 °C (1 bara).</p> <p>Densidad: mayor densidad que el hidrógeno comprimido.</p> <p>Ventajas: Adecuado para almacenamiento y transporte a gran escala.</p> <p>Desventajas: Altos costes energéticos por licuefacción y pérdidas por evaporación.</p>	142	8,500	3.00 – 8.00	<p>Se necesitan medidas de seguridad criogénica para soportar el frío extremo.</p> <p>Recipientes aislantes para minimizar la ebullición.</p> <p>Procedimientos de emergencia para manejar derrames o fugas.</p>
Híbridos metálicos	<p>Medio de almacenamiento: El hidrógeno absorbe y libera mediante reacciones químicas.</p> <p>Ventajas: alta densidad volumétrica, seguro a presiones bajas.</p> <p>Desventajas: Puede ser pesado y costoso; Cinética lenta para la liberación de hidrógeno.</p>	60 -120	<p>11,519 (Vacuum @ 200°C)</p> <p>14830 (1.8 bar @ 11.85°C)</p>	6.00 – 12.00	<p>Comprobaciones de compatibilidad de materiales para evitar reacciones con hidrógeno.</p> <p>Entornos controlados para gestionar la temperatura y la presión.</p>
Almacenamiento químico de hidrógeno	<p>Métodos: Consiste en almacenar hidrógeno en forma de compuestos químicos (por ejemplo, metano, LOHC, ácido fórmico).</p> <p>Ventajas: Puede transportarse fácilmente y almacenarse en condiciones ambientales.</p> <p>Desventajas: Requiere una reacción química para liberar hidrógeno, que puede ser complejo y consumir mucha energía.</p>	50 -100	12821 (as NH ₃ 1.013 bara @ 240°C)	Varies	<p>Evaluaciones de riesgos para compuestos químicos utilizados.</p> <p>Sistemas de contención para evitar fugas.</p> <p>Protocolos de manipulación para químicos reactivos.</p>
Almacenamiento por adsorción	<p>Mecanismo: El hidrógeno se adsorbe en la superficie de materiales sólidos (por ejemplo, carbón, metal-orgánico).</p> <p>Ventajas: Funciona a P y T más bajos.</p> <p>Desventajas: Aún está en investigación.</p>	20 - 30		Varies	<p>Datos de seguridad de materiales para adsorbentes utilizados.</p> <p>Sistemas de monitorización para liberación y contención de gases.</p>

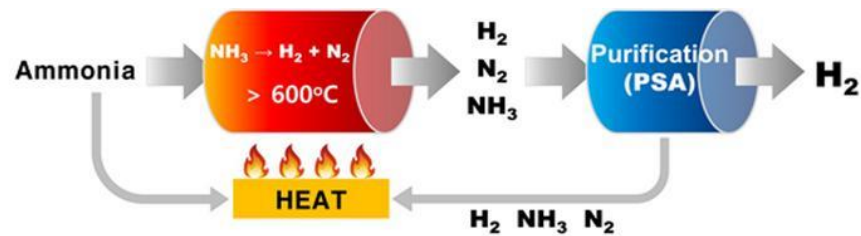
3.1 Almacenamiento de hidrógeno: químico

Como amoníaco



Almacenamiento de H₂ mediante el proceso Haber-Bosch.⁸

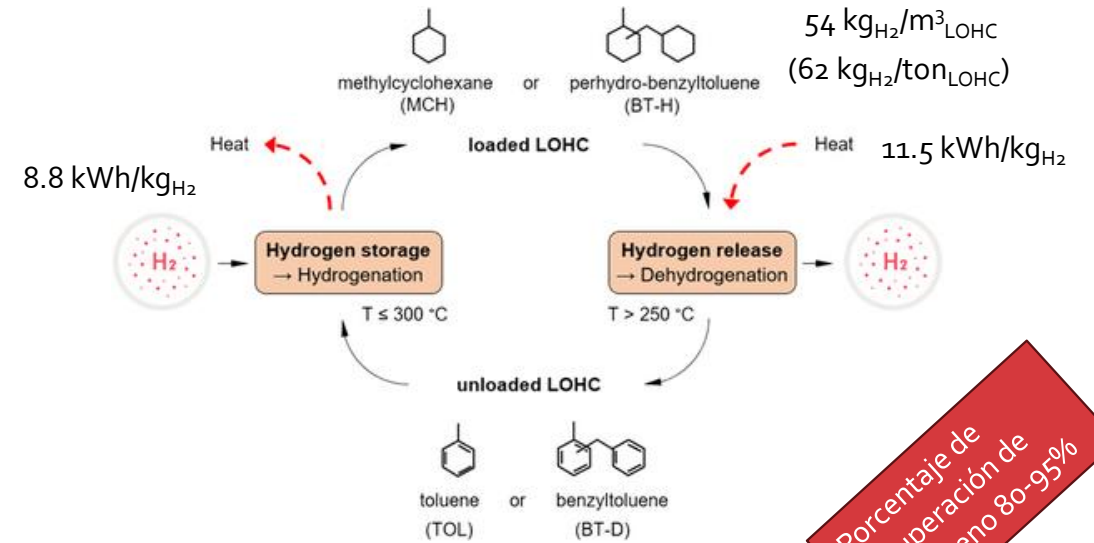
Porcentaje de recuperación de hidrógeno 90-95%



La recuperación de H₂ es un proceso de craqueo con amoníaco.⁹

⁸ An efficiency comparison of liquid hydrogen, ammonia, and liquid organic hydrogen carriers for maritime use. Thesis. IMM 2021-M60. g. <https://www.eurekaert.org/news-releases/1036050>

Como LOHC (Portador de hidrógeno orgánico líquido)¹⁰



Porcentaje de recuperación de hidrógeno 80-95%



¹⁰ Large-Scale H₂ storage and transport with LOHC technology: insights into current project developments and the future outlook. Energy Technology. (2024). <https://doi.org/10.1002/ente.202301042>

3.1 Almacenamiento de hidrógeno

Almacenamiento de H₂ en cavernas de sal

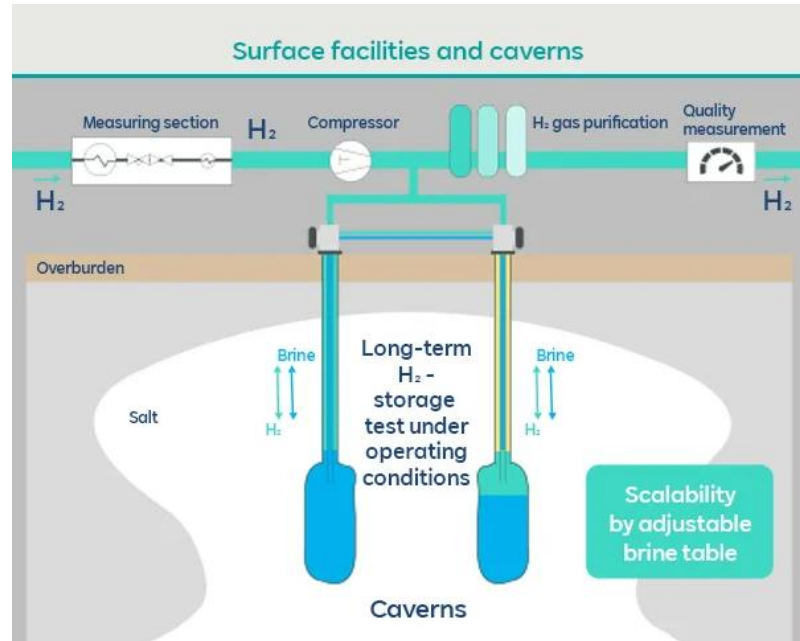


Image taken from: STORAG ETZEL (2024)

<https://www.en-former.com/en/turning-salt-caverns-into-huge-hydrogen-stores/>

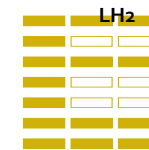
Almacenamiento de H₂ en la caverna por LINDE



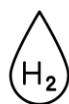
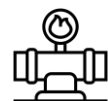
Location: Sweeny,
Texas
15 years of successful
operation.
Total capacity: 6,000
MT

TAKE AWAY

Almacenar y transportar hidrógeno en condiciones atmosféricas es muy ineficiente, por lo que es preferible licuarlo o someterlo a alta presión. Incluso el almacenamiento de productos químicos resistentes está despertando hoy en día un gran interés en países como Alemania, Japón y Corea del Sur.



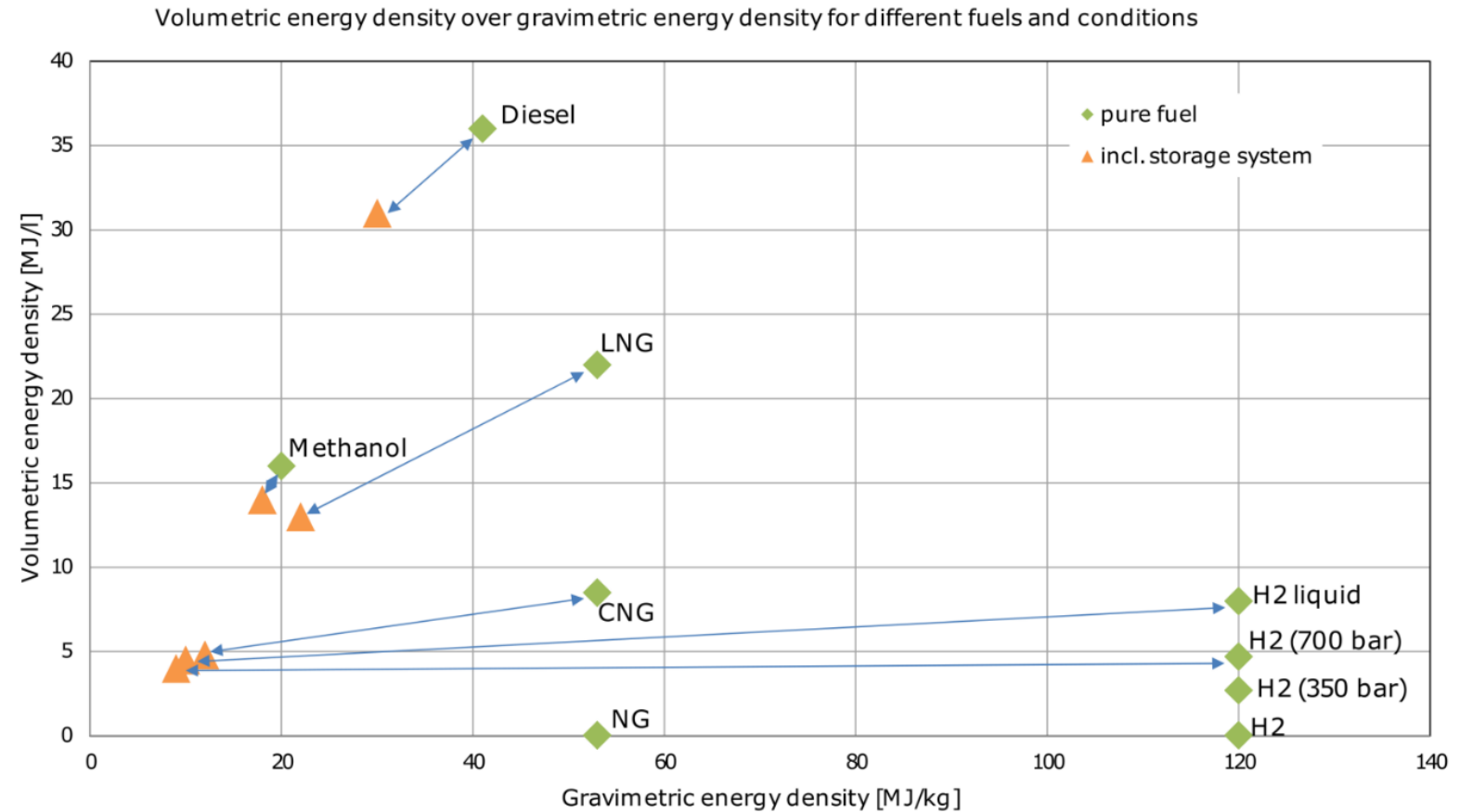
3.2 Transmisión y distribución de hidrógeno



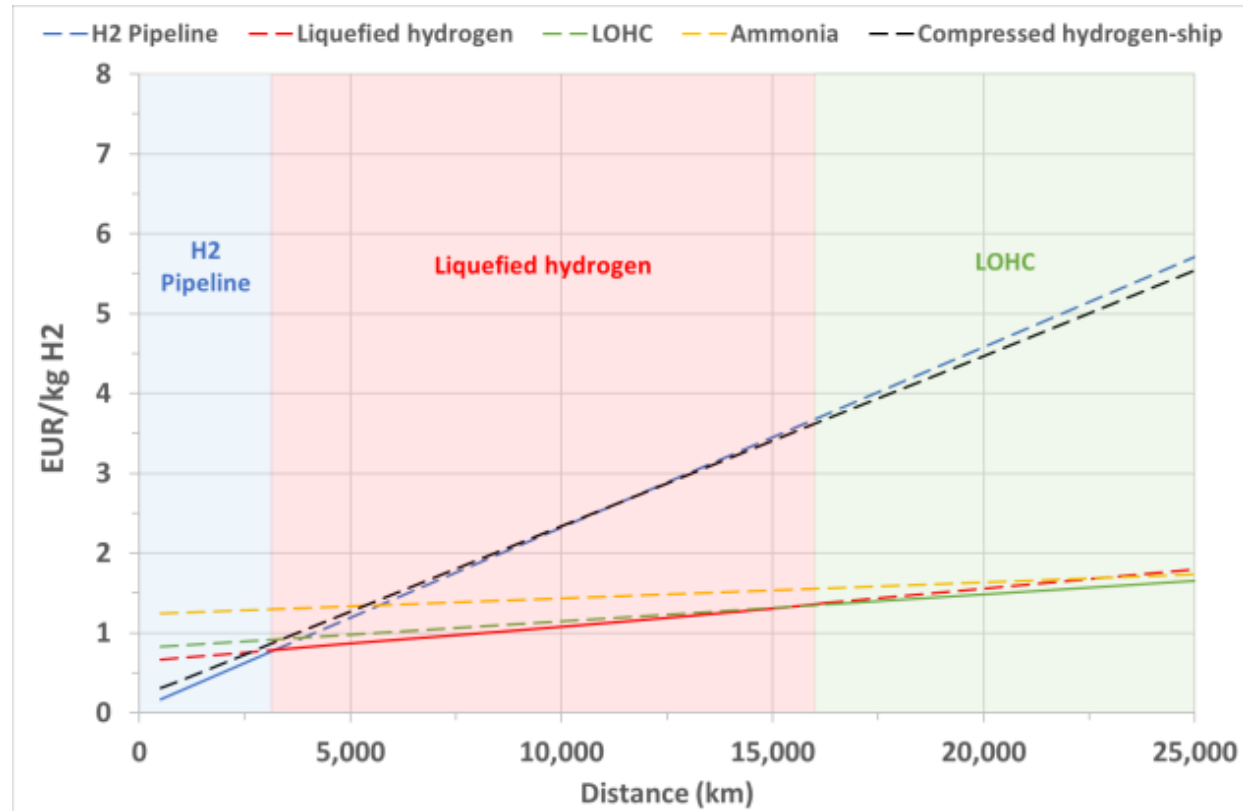
Tecnología	Descripción	Ventajas	Desventajas	TRL	Países líderes
Transporte por oleoducto	Oleoductos diseñados para el transporte de H ₂ a alta presión	Alta eficiencia, gran capacidad, infraestructura establecida	Alta inversión inicial, posibles preocupaciones de seguridad y accesibilidad limitada en ciertas zonas	6-7	Germany, USA, Netherlands
Transporte de hidrógeno comprimido	El hidrógeno se comprime a alta presión y se transporta en remolques o contenedores especializados. Tecnología establecida.	Tecnología relativamente sencilla, infraestructura existente para el transporte de gas natural comprimido.	Menor densidad que LH ₂ , con potencial de fuga, requiere equipos especializados. Intensivo en energía.	7-8	Japan, USA, Germany
Transporte de hidrógeno líquido	El hidrógeno se licua y transporta en tanques aislados	Mayor densidad, infraestructura existente para el transporte de GNL.	Altos costes energéticos para	7-8	Necesidades energéticas Conv.: 12 MWh/t H ₂ Reconv: 0.6 MWh/t H ₂
Portadores de hidrógeno orgánico líquido	El hidrógeno está químicamente unido a compuestos orgánicos para su transporte.	Menos inflamable que el hidrógeno gaseoso. Infraestructura existente. Ofrece soluciones de almacenamiento a largo plazo. No inflamable.	LOHC: 55.2 kg H ₂ /m ³ 62.7 kg H ₂ /t	6	Conv.: 9 MWh/t H ₂ Reconv: 12 MWh/t H ₂
Amoníaco	El hidrógeno se transporta en forma de amoníaco (NH ₃)	Infraestructura establecida. Contiene una cantidad significativa de hidrógeno por volumen.	NH ₃ : 70.8 kg H ₂ /m ³ 1,000 kg H ₂ /t requiere su conversión de nuevo a hidrógeno para su uso.	8	Conv.: 5.75 MWh/t H ₂ Reconv: 11.2 MWh/t H ₂ Netherlands
Mezcla de hidrógeno en tuberías de gas natural	El hidrógeno se mezcla con GN para crear una mezcla de combustible rica en hidrógeno	Utiliza infraestructura de gas natural, potencial para la reducción de emisiones de carbono	Porcentaje limitado de mezcla de hidrógeno posible sin modificaciones significativas en la infraestructura.	8	Germany, UK, Australia, USA

Comparación de densidades energéticas de diferentes combustibles

3.2 Transmisión y distribución de hidrógeno



Source: FACT SHEET No 4: Fuel Cell Propulsion. Ed. 2020. Danube Transnational Programme. European Union.



Se pueden identificar tres regiones diferentes, cambiando la vía de transporte más rentable según la distancia.¹⁴

El coste de entrega de hidrógeno para una ruta de transporte simple (punto a punto), para un escenario de 1 Mt H₂ y bajo coste eléctrico.¹⁴

Aplicaciones de la tecnología H₂

Las tecnologías de hidrógeno en aplicaciones móviles se refieren al uso del hidrógeno como fuente de combustible para dispositivos y aplicaciones móviles, centrándose principalmente en el transporte y la electrónica portátil.



1. Las pilas de combustible de hidrógeno se utilizan en vehículos de pila de combustible (FCV) para convertir el gas H₂ en electricidad, que a su vez alimenta motores eléctricos.

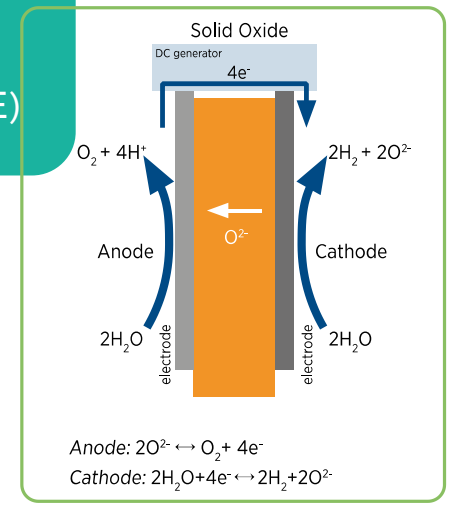
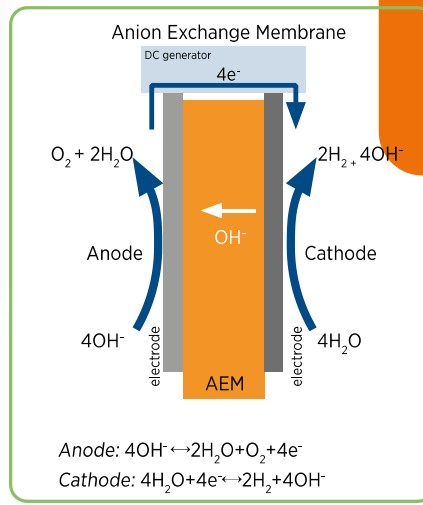
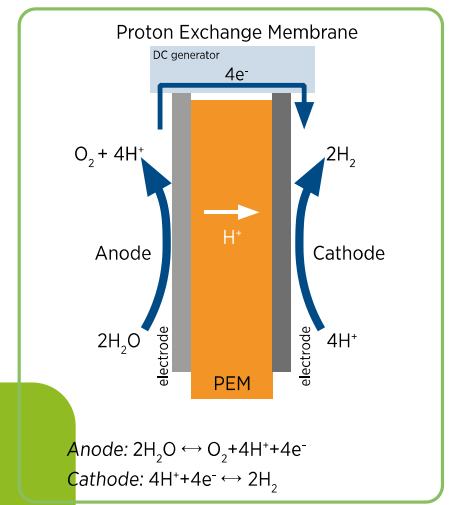
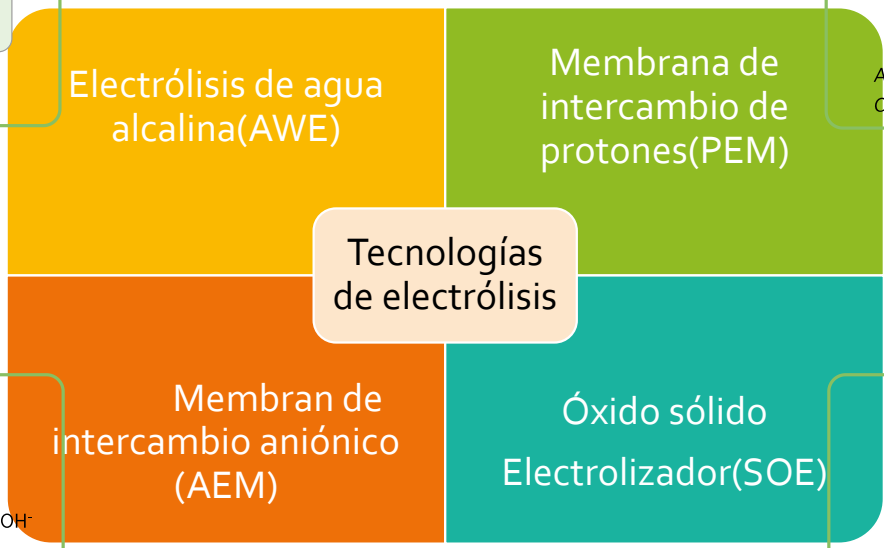
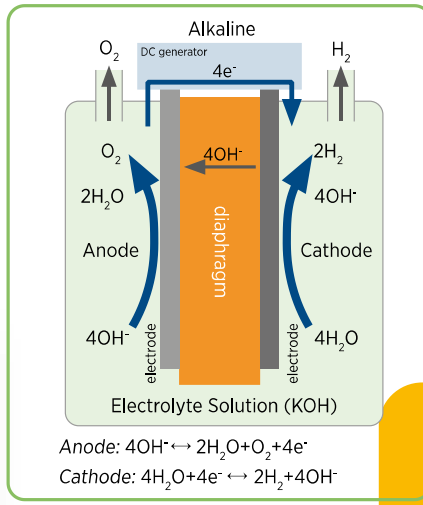
2. Las soluciones de almacenamiento eficientes son cruciales para aplicaciones móviles.

3. Para electrónica portátil y aplicaciones a pequeña escala, H₂ puede alimentar pilas de combustible portátiles, ofreciendo un tiempo de funcionamiento más largo.

4. Se están desarrollando drones propulsados por hidrógeno para tiempos de vuelo más largos y una mayor capacidad de carga útil.



4.1.2 Tecnologías de electrolizadores

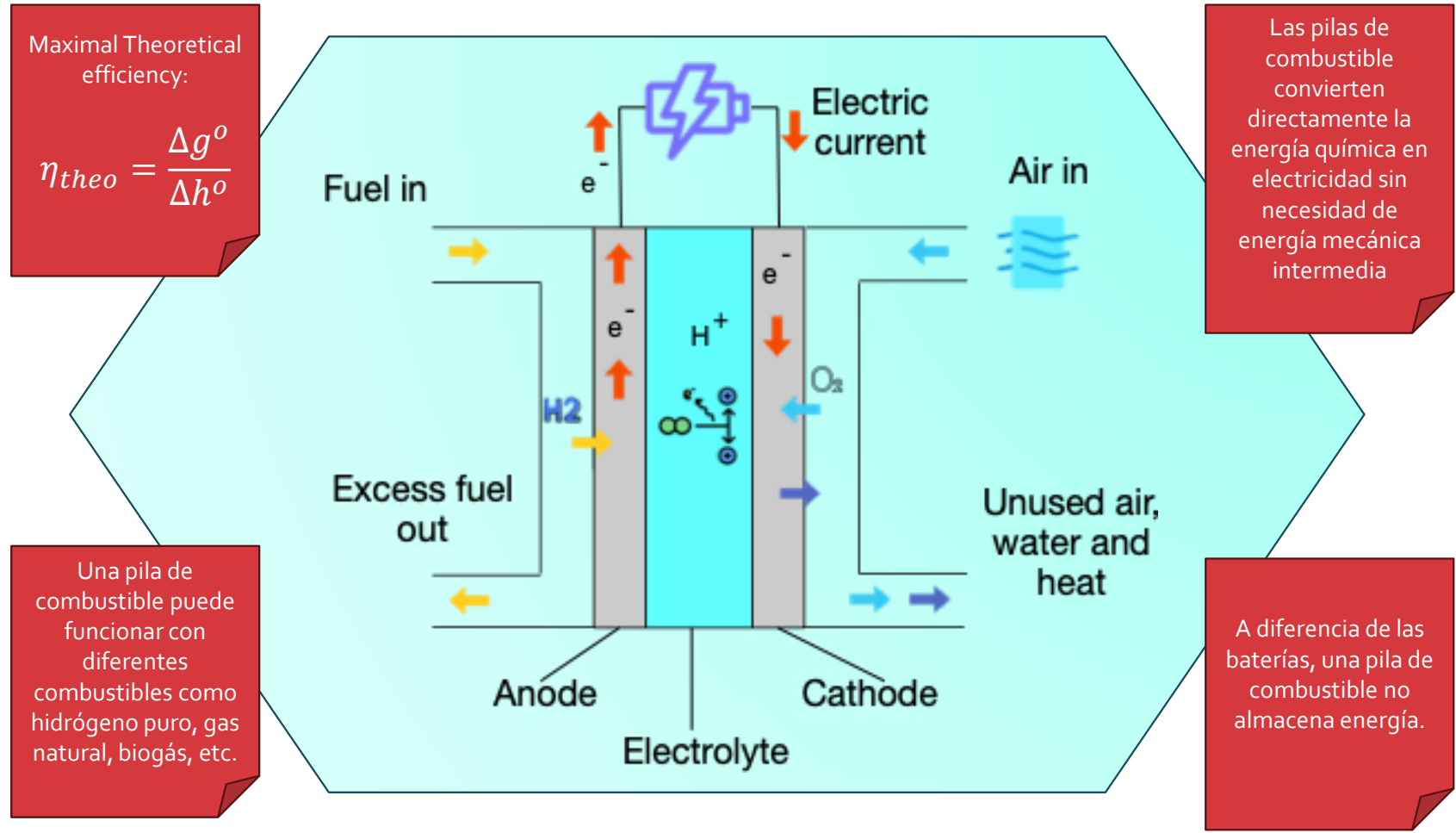


Source: Figures have been taken from Green Hydrogen Cost reduction Scaling Up Electrolyzers to meet the 1.50C climate goal. IRENA 2020. ISBN: 978-92-9260-295-6.

PILAS DE COMBUSTIBLE (Fuel Cells)

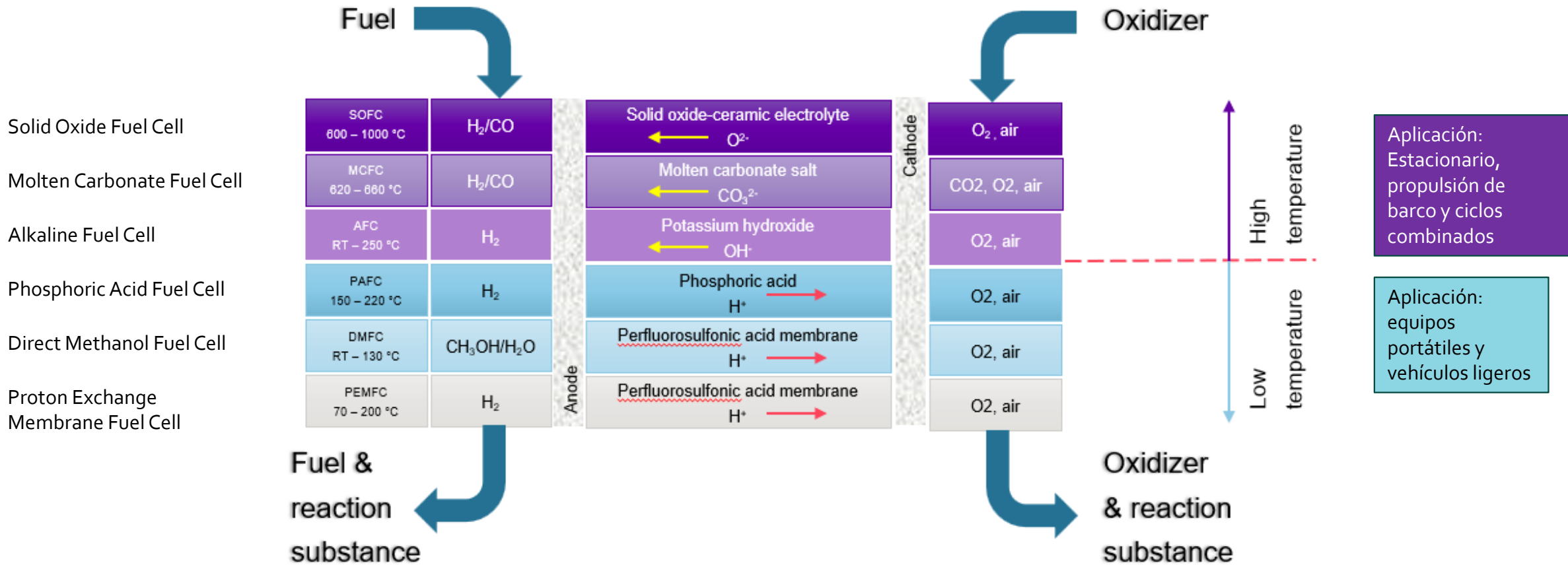
4.2.1 Funcionamiento fundamental de una pila de combustible

Una pila de combustible es un dispositivo que convierte la energía química de un combustible en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica, teniendo así agua y calor recuperativo como subproducto.



Se considera que las pilas de combustible son una excelente alternativa para la descarbonización comercial de algunas áreas específicas del sector del transporte.

4.2.2 Tecnologías de pilas de combustible



Pregunta:
¿Qué caudal de H₂ se necesita para generar 1 amperio de corriente en una pila de combustible?

Empieza desde cero:

1 mol H₂ reacciona → 2e⁻ se liberan



Luego se liberan los moles de H₂ para generar 1 amperio:

$$\dot{n}_{\text{H}_2} = (1 \text{ A}) \left(\frac{1 \text{ C/s}}{1 \text{ A}} \right) \left(\frac{1 \text{ mole e}^-}{96487 \text{ C}} \right) \left(\frac{1 \text{ gmol H}_2}{2 \text{ mole e}^-} \right) \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right)$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2} = 0.018655 \text{ gmol H}_2/\text{h}/\text{A}$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = \left(0.018655 \text{ gmol H}_2/\text{h}/\text{A} \right) \left(\frac{2.0158 \text{ g}}{1 \text{ gmol H}_2} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = 37.605 \times 10^{-6} \text{ kgH}_2/\text{h}/\text{A}$$

0.037605 kg_{H₂}/h se requiere generar 1 amperio de corriente.

Practical example:

A $1.0 \text{ MW}_{\text{DC}}$ fuel cell stack is operated with a cell voltage of 720 mV on pure hydrogen operating with a fuel utilization (FU) of 78% .

- How much hydrogen will be consumed in kg/h ?
- What is the required fuel flow rate?
- What is the required air flow rate for a 30 percent air utilization (AU)?

Answer:

a.1) Let's assume first that the individual cells are arranged in parallel, which implies that the stack voltage is the same as each individual cell voltage, and the fuel cell stack current is equal to the current of individual cell times the number of cells.

$$W_{\text{DC}} = V \cdot I \quad \longrightarrow \quad I = \frac{W_{\text{DC}}}{V} = \frac{1000000 \text{ W}}{0.720 \text{ volt}} = 1,388.889 \text{ kA}$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2, \text{cons}} = (1,388.89 \text{ kA}) \left(\frac{0.037605 \text{ kg/h}}{1 \text{ kA}} \right) = 52.229 \text{ kgH}_2/\text{h}$$

Practical example:

a.2) Let's assume now that the fuel cells were arranged in parallel, and the stack was composed of 500 cells in series, then the stack voltage would be:

$$(500 \text{ cells})(0.72 \text{ volt/cell}) = 360 \text{ volt}$$

The current would be:

$$I = \frac{1000000 \text{ W}}{360 \text{ volt}} = 2777.78 \text{ A}$$

Because this current passes through 500 cells arranged in series, the H₂ consumption is:

$$\dot{m}_{\text{H}_2, \text{cons}} = (2.78 \text{ kA}) \left(\frac{0.037605 \text{ kg/h}}{1 \text{ kA}} \right) (500 \text{ cells}) = 52.229 \text{ kgH}_2/\text{h}$$

b) In order to work out the hydrogen flow rate required to maintain that power, we will refer to the definition of fuel utilization:

$$\text{FU} = \frac{\text{H}_{2, \text{cons}}}{\text{H}_{2, \text{supp}}} = 0.8$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2, \text{supp}} = \left(\frac{52.229 \text{ kgH}_2/\text{h}}{0.8} \right) = 65.286 \text{ kgH}_2/\text{h}$$

Practical example:

c) To determine the air requirement, let us refer to the stoichiometric ratio of hydrogen to oxygen, which is 2 to 1 for H₂O. That is, for every mole of oxygen, two moles of hydrogen are required. Accordingly:

$$\dot{n}_{\text{O}_2,\text{cons}} = \frac{1}{2} \dot{n}_{\text{H}_2,\text{cons}} \quad \text{and} \quad \dot{n}_{\text{H}_2} = \frac{m_{\text{H}_2}}{M} \quad M_{\text{H}_2} = 2.0159 \text{ kg/kmol}$$

$$\dot{n}_{\text{O}_2,\text{cons}} = \left(52.229 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{h}} \right) \left(\frac{1 \text{ kmol}_{\text{H}_2}}{2.0159 \text{ kg}_{\text{H}_2}} \right) \left(\frac{1 \text{ kmol}_{\text{O}_2}}{2 \text{ kmol}_{\text{H}_2}} \right) = 12.954 \frac{\text{kmol}_{\text{O}_2}}{\text{h}}$$

If 30% utilization is required, then the air feed must contain the following amount of oxygen (supplied):

$$\text{AU} = \frac{\text{O}_{2,\text{cons}}}{\text{O}_{2,\text{supp}}} = 0.3 \quad \dot{n}_{\text{O}_2,\text{supp}} = \frac{\left(12.954 \frac{\text{kmol}_{\text{O}_2}}{\text{h}} \right)}{0.3} = 43.18 \frac{\text{kmol}_{\text{O}_2}}{\text{h}}$$

Practical example:

Because dry air contains 21% O₂ by volume, or by mole percent, the required mass flow rate of dry air is:

$$\dot{m}_{\text{air,supp}} = \frac{\dot{n}_{\text{O}_2,\text{supp}}}{0.21} \cdot M_{\text{air}}$$

$$M_{\text{air}} = 28.84 \text{ kg/kmol}$$

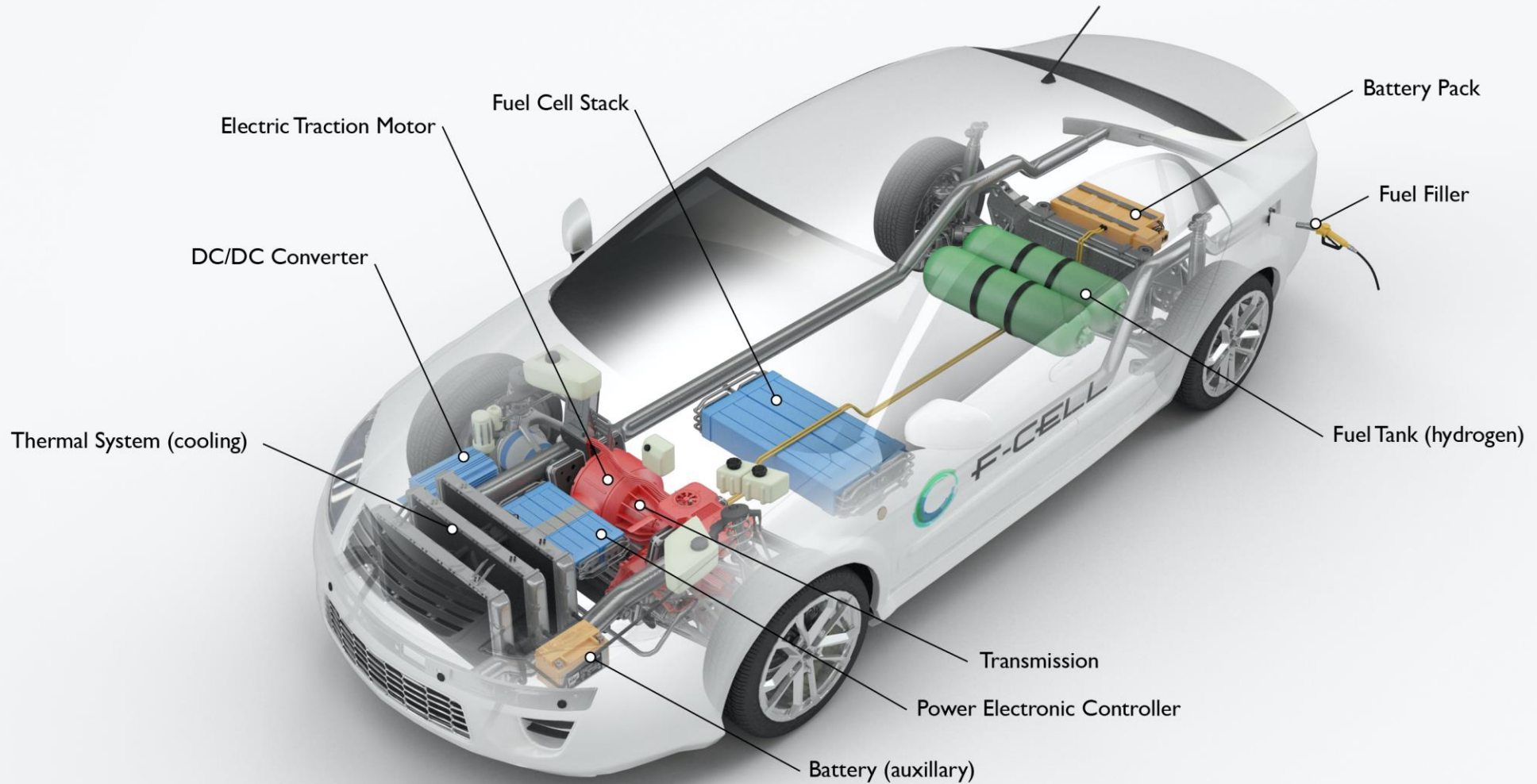
$$\dot{m}_{\text{air,supp}} = \frac{\left(43.18 \frac{\text{kmol}_{\text{O}_2}}{\text{h}}\right)}{0.21} \left(28.84 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right) = 5930 \text{ kg/h}$$

4.2 Transporte: Vehículos Ligeros (LDV)



Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle

Main components

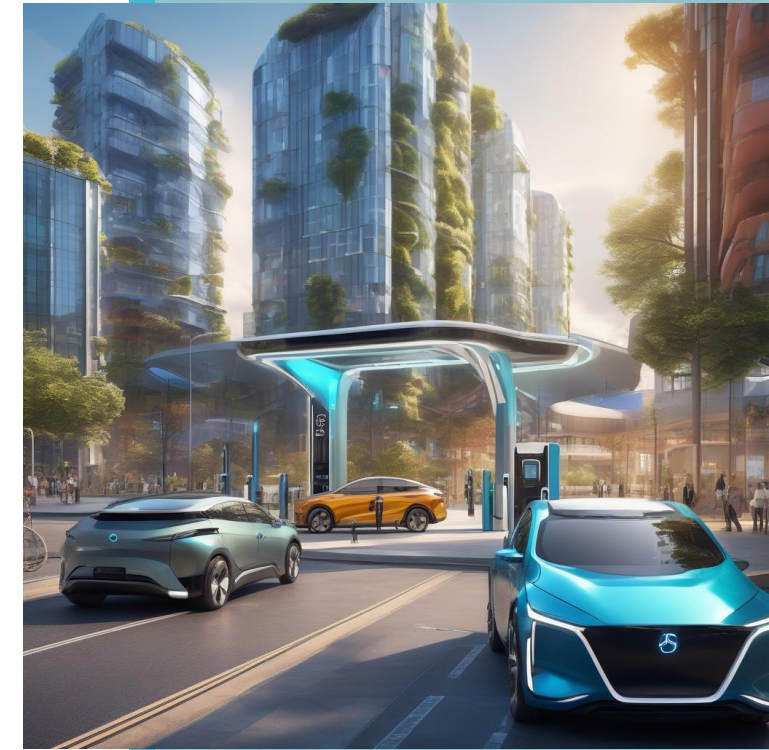


afdc.energy.gov

Image adapted from U.S. Department of Energy (2024): Energy Efficiency & Renewable Energy.
<https://afdc.energy.gov/vehicles>

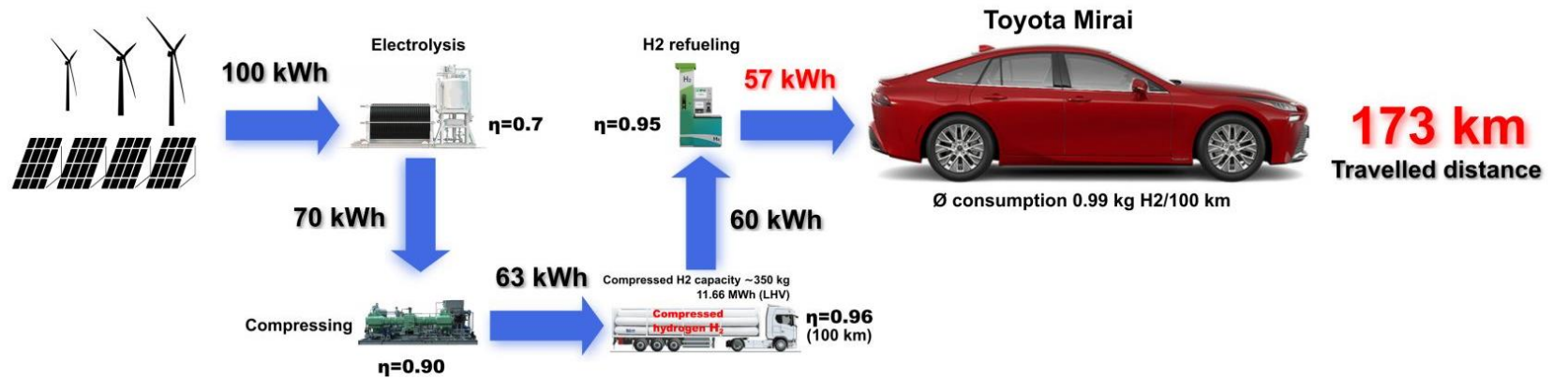
Techno-economic comparison of EVs, FCEVs and ICEVs.

Feature	Electric Vehicles (EVs)	Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV)	Internal Combustion Engine Vehicles (ICEVs)
Purchasing costs (USD)	Generally higher than ICEVs due to battery costs, averaging \$30,000 to \$70,000	Typically, higher than both EVs and ICEVs, around \$50,000 to \$70,000	Usually lower, ranging from \$20,000 to \$40,000 (Considering normal vehicle)
Lifetime costs (USD)	Lower maintenance costs, savings on fuel, approximately \$0.03 to \$0.05 per mile. Battery replacement can be costly. Overall, they can be competitive with ICEVs over time.	High cost of hydrogen fuel, generally higher maintenance. Lifecycle costs variable but often exceed EVs and ICEVs.	Higher fuel and maintenance costs but lower upfront; average \$0.07 to \$0.15 per mile.
Infrastructure costs (USD)	\$1,000 – \$3,000 for home charging station; \$0 for public charging (depends on availability)	--	\$0 (extensive existing infrastructure)
Fuel/Energy costs (USD)	Lower costs due to electricity rates; potential for further savings with home solar.	High cost of hydrogen, which is less widely available than electricity.	Dependent on gasoline prices; generally higher than EV energy costs.
Maintenance costs (USD)	Lower due to fewer moving parts.	Similar to or slightly lower than ICEVs due to fewer moving parts but exceptions exist.	Higher due to more complex mechanical components.
Cost efficiency	High over time due to lower energy and maintenance costs; potential government incentives. Converts over 77% of the electrical energy from the grid to power at the wheels	Currently low due to hydrogen costs and limited stations but improving with advancements.	Moderate; fuel costs can vary significantly, affecting efficiency.
Performance	Quick acceleration and high torque, smooth and quiet operation.	Good performance; refueling ease advantageous, but development ongoing.	Generally reliable, though performance can vary widely by vehicle type.
Environmental impact	Zero tailpipe emissions; impact depends on power generation.	Zero tailpipe emissions; impact depends on hydrogen production.	Higher emissions than EVs or FCEVs due to fossil fuel reliance.



Self-made table created with information gathered from:

- 1) <https://www.innovationnewsnetwork.com/electric-vehicles-vs-hydrogen-fuel-cell-vehicles-comparing-the-benefits/45393/>
- 2) A comparison of vehicles life cycle energy consumption: <https://www.cder.dz/A2H2/Medias/Download/Proc%20PDF/PARALLEL%20SESSIONS/%20BS16%20D%20Fuel%20Cell%20-%20Transportation/15-06-06/533.pdf>
- 3) A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars (2021). https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_o.pdf



Caso real

Vehículo de pila de combustible H₂ y estación de abastecimiento

Erlangen, Alemania

Datos importantes:

Consumo medio:	1 kg/100 km
Depósito de combustible:	6.3 kg
Poder:	163 CV / 120 kW
Price (2022):	70,000 Euro



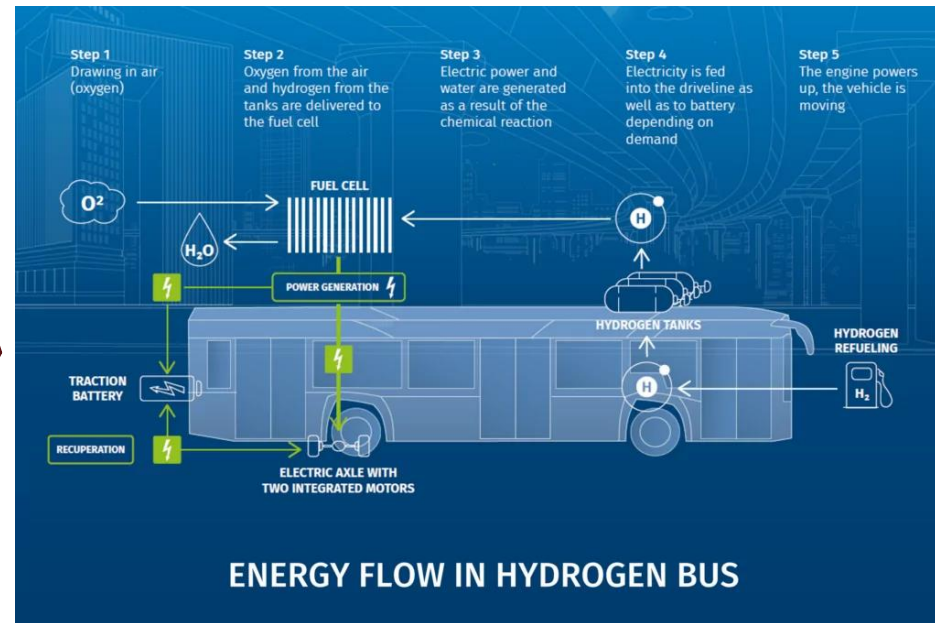
5.2 Autobuses eléctricos de pila de combustible (FCEB)



Un Bus Eléctrico de Pila de Combustible (FCEB) es una tecnología que combina una pila de combustible de hidrógeno (por ejemplo, PEMFC) y baterías/condensadores.

En esta alternativa de transporte híbrido, la pila de combustible proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del vehículo, mientras que las baterías/condensadores pueden proporcionar potencia máxima a los motores para satisfacer aceleraciones rápidas y transitorios.

Un FCEB no requiere ningún trabajo adicional de infraestructura municipal ni permisos aparte de una estación centralizada de repostaje de H₂ (HRS) en el depósito de autobuses.



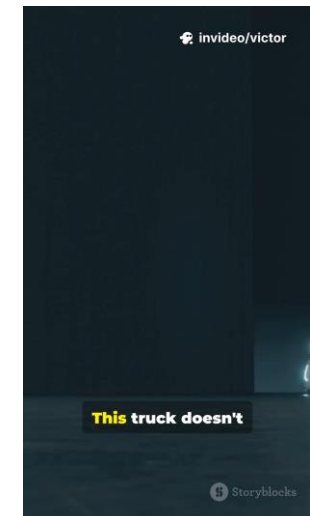
El repostaje del autobús tarda alrededor de 10 minutos para el relleno típico, aunque se espera que este tiempo se reduzca en un futuro corto.

Source: Solaris Bus & Coach sp. z o.o. (2024)

El módulo de energía de la pila de combustible a bordo del autobús genera energía eléctrica mediante una reacción electroquímica, dejando solo agua y calor como subproductos, por lo que no hay emisiones locales.

Además, el calor disipado por la reacción es almacenado por las resistencias de freno y se utiliza para el calentamiento interno de la unidad (comodidad para los pasajeros), aumentando así considerablemente la eficiencia energética.

Uso de celdas de combustible tipo PEM en transporte pesado





MARVID®

© MARVID-Mexico

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162, 163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169, 209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BMARVID is part of the media of MARVID-Mexico., E: 94-443.F: 008- (www.marvid.org/booklets)