

Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación

Tomo I: Contexto nacional e internacional del hidrógeno verde



Editorial

Comisionado y publicado por

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Oficinas registradas en: Bonn y Eschborn, Alemania

Programa

Alianzas energéticas bilaterales en países emergentes y en desarrollo.
Apoyo a la Implementación de la Transición Energética en México (TrEM)

www.energypartnership.mx
www.giz.de/en/worldwide/76471.html

Edición y supervisión

William Jensen Díaz
william.jensen@giz.de

Lorena Espinosa Flores
lorena.espinosa@giz.de

Javier Arturo Salas Gordillo
javier.salasgordillo@giz.de

Natalia Escobosa Pineda

Autores

HINICIO

Fecha

Octubre 2021

Versión digital**Diseñado por**

Sk3 Estudio Creativo, CDMX
www.sk3.mx

Créditos fotográficos

© Shutterstock (<https://www.shutterstock.com>)
página 7, 10, 11, 18, 20, 23, 25, 27, 35, 44, 49 y 52.

Todos los derechos reservados. El uso de este documento y/o sus contenidos está sujeto a la autorización del Secretariado de la Alianza Energética entre México y Alemania (AE) y del Programa Apoyo a la Transición Energética en México (TrEM).

Los contenidos de este reporte han sido preparados tomando en consideración fuentes oficiales y de información pública. Las aseveraciones y opiniones expresadas no necesariamente reflejan las políticas y posturas oficiales del Secretariado de la AE, del Programa TrEM, del Ministerio Federal de Economía y Energía de la República Federal de Alemania (BMWi), del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de la República Federal de Alemania (BMZ) y de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Este documento no pretende sustituir una investigación detallada o el ejercicio de cualquier estudio profesional. El Secretariado de la AE y el Programa TrEM no garantizan la precisión ni profundidad de la información descrita en este reporte. Asimismo, no se responsabilizan por cualquier daño tangible o intangible causado directa o indirectamente por el uso de la información descrita en este reporte.

Agradecimientos

La Alianza Energética entre México y Alemania y el Programa Apoyo a la Implementación de la Transición Energética en México (TrEM) agradecen la participación y entusiasmo de todas y todos los expertos consultados en la preparación de este estudio.

Federico López de Alba, Responsable de la Gerencia de Protección Ambiental de la Comisión Federal de Electricidad (CFE)

Carlos Morán, Subsecretario de Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT)

Ivonne Vergara, Subdirectora General de Planeación y Desarrollo de la SCT

Carlos Gil, Desarrollo Técnico de la SCT

Salvador Monroy, Asuntos Internacionales de la SCT

Salomón Elnecavé, Director General de Autotransporte Federal de la SCT

Francisco Carrión, Jefe de División en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT)

Javier Guadalupe Ramos, Presidente de la Sociedad Mexicana de Hidrógeno (SMH)

Israel Hurtado, Fundador y presidente de la Asociación Mexicana de Hidrógeno (AMH)

Asunción Borrás, Sr. VP Business Development H2 de Engie

Koen Langie, Desarrollador de soluciones Sr de Hidrógeno de Engie

José Aparicio, Director general y presidente de Siemens Energy México, Centroamérica y Caribe

Enrique König, Gerente de Asuntos Gubernamentales de Siemens Energy

Luis Lozano, CEO de Toyota México

Albes Rafael Urdaneta, Gerente de Energía de Ternium

Edgar Buñuelos, Gerente del Centro de Competitividad de la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas (CANAME)

Carlos Avitia, Director de Comercio y Relaciones Institucionales de la CANAME

José Antonio Aguilar, Director de Administración y Finanzas de ViveEnergía

Ladis Bermúdez, Coordinadora Administrativa de ViveEnergía
Juan Esteban Pérez Salazar, Subdirector de Finanzas de ViveEnergía

Bruno Ramos, CEO y fundador de H2 Seven

Javier Fortuna, Socio y consultor en H2 Total Energy

Vincent Tessé, Gerente de proyectos de hidrógeno renovable de Dhamma Energy

Cristina Martín, Vicepresidenta para Latinoamérica de HDF Energy

Dr. Ulises Cano Castillo, del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL)

Dra. Rosa de Guadaupe González Huerta, de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del Instituto Politécnico Nacional (IPN)

Dr. Omar Solorza Feria, del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINESTAV) CDMX

Dr. Javier Rodríguez Varela, del CINESTAV Saltillo

Dra. Karina Suárez Alcántara, del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Campus Morelia

Dr. Luis Carlos Ordoñez, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)

José Antonio Urtega, del Banco Interamericano de Desarrollo (BID)

Michelle Carvalho, del BID

Juan Herrera, del BID

Marco Jano Ito, del Centro Mario Molina

Carlos Mena, del Centro Mario Molina

Mariano Berkenwald, de la Agencia Internacional de Energía (IEA)

Agradecimientos especiales

Patrick Maio (HINICIO)

Ana Ángel (HINICIO)

Luis Miguel Diazgranados (HINICIO)

Jorge Luis Hinojosa (HINICIO)

Juan Antonio Gutiérrez (HINICIO)

Contenido

| | |
|--|----|
| Editorial | 1 |
| Agradecimientos | 3 |
| Índice | 4 |
| Abreviaturas | 5 |
| Lista de tablas | 5 |
| Lista de figuras | 6 |
| Resumen ejecutivo | 7 |
| 1. Hidrógeno como vector energético: tecnologías y aplicaciones | 12 |
| 1.1 Contexto del hidrógeno verde | 12 |
| 1.2 Almacenamiento de energía renovable (y re-electrificación) | 17 |
| 1.3 Movilidad eléctrica | 20 |
| 1.4 Productos químicos verdes y materias primas industriales | 21 |
| 1.5 Descarbonización de gas natural | 22 |
| 1.6 Calor industrial y energía | 23 |
| 1.7 Edificios | 24 |
| 1.8 Metano 100% renovable | 24 |
| 1.9 Combustibles sintéticos líquidos | 25 |
| 1.10 TRL y CRI de tecnologías del hidrógeno | 25 |
| 2. Antecedentes internacionales del hidrógeno como vehículo de descarbonización | 28 |
| 2.1 Unión Europea | 28 |
| 2.2 Alemania | 30 |
| 2.3 Japón | 32 |
| 2.4 Estados Unidos (California) | 33 |
| 2.5 Chile | 34 |
| 3. Situación actual del hidrógeno en México | 36 |
| 3.1 Mercado del hidrógeno en México | 36 |
| 3.2 Consumidores potenciales de hidrógeno e infraestructura de energía renovable | 37 |
| 3.3 Producción académica | 37 |
| 3.4 Marco Regulatorio Mexicano para el hidrógeno | 44 |
| 3.5 Esfuerzos comerciales | 47 |
| 4. Conclusiones y recomendaciones | 50 |
| 4.1 Conclusiones sobre el contexto global para el hidrógeno | 50 |
| 4.2 Conclusiones sobre el contexto mexicano del hidrógeno | 51 |
| 4.3 Percepción de las partes interesadas mexicanas | 51 |
| Anexo A: Recomendaciones para futuras obras que se llevarán a cabo en profundidad | 52 |
| Bibliografía | 53 |

Abreviaturas

| | |
|--------|--|
| AC | Corriente alterna, por sus siglas en inglés |
| BESS | Sistemas de almacenamiento por baterías, por sus siglas en inglés |
| CAPEX | Gastos de capital |
| CCS | Captura y almacenamiento de carbono, por sus siglas en inglés |
| CCU | Captura y uso de carbono, por sus siglas en inglés |
| CEC | Certificado de Energía Limpia, por sus siglas en inglés |
| CHP | Sistemas combinados de calor y electricidad |
| CO2 | Dióxido de Carbono |
| DC | Corriente Directa, por sus siglas en inglés |
| DLE | Sistema seco de bajas emisiones (en turbinas), por sus siglas en inglés |
| DLN | Sistema seco bajo en NOx, por sus siglas en inglés |
| ESOI | Relación almacenamiento de energía / inversión, por sus siglas en inglés |
| FC | Celda de Combustible, por sus siglas en inglés |
| FCH-JU | Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking |
| FCEV | Vehículo eléctrico a celda de combustible, por sus siglas en inglés |
| GEI | Emisiones de Gases de Efecto Invernadero |
| GN | Gas Natural |
| H2 | Hidrógeno |
| HRS | Estación de recarga de hidrógeno, por sus siglas en inglés |
| IEA | Agencia Internacional de Energía, por sus siglas en inglés |
| MEA | Ensamble Membrana-Electrodo, por sus siglas en inglés |
| NOx | Óxidos de nitrógeno |
| PEM | Membrana de intercambio de protones (Celda de combustible o electrolizador) |
| PEMEX | Petróleos Mexicanos (empresa estatal de petróleo y gas) |
| PV | Energía fotovoltaica |
| SMR | Reformado de Metano a vapor (producción de H2) |
| SOFC | Celda de combustible de óxido sólido (Celda de combustible o electrolizador) |
| WEC | Consejo Mundial de Energía, por sus siglas en inglés |

Lista de tablas

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabla 1. | Tecnologías y colores de producción de hidrógeno (BMW, 2020) | 13 |
| Tabla 2. | Comparación de costos de baterías e hidrógeno para el almacenamiento de energía (NREL, 2019) | 19 |
| Tabla 3. | Resumen de los incentivos al hidrógeno en la Unión Europea | 29 |
| Tabla 4. | Resumen de los incentivos al hidrógeno en Alemania | 30 |
| Tabla 5. | Resumen de los incentivos al hidrógeno en Japón | 32 |
| Tabla 6. | Resumen de los incentivos al hidrógeno en Estados Unidos | 33 |
| Tabla 7. | Proyectos de hidrógeno verde en desarrollo en Chile | 34 |
| Tabla 8. | Producción académica de hidrógeno en el INEEL | 38 |
| Tabla 9. | Producción académica sobre hidrógeno en el IPN | 39 |
| Tabla 10. | Producción académica sobre hidrógeno en el CINVESTAV | 40 |
| Tabla 11. | Producción académica en hidrógeno en el Instituto de Materiales – UNAM | 41 |
| Tabla 12. | Producción académica de hidrógeno en el Instituto de Ingeniería UNAM | 42 |
| Tabla 13. | Producción académica de hidrógeno en el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) | 43 |

Lista de figuras

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 1.0 | Mercado de hidrógeno en México (Secretaría de Economía, 2019 y Fortuna, 2020). | 09 |
| Figura 1-1 | Cadena de valor de hidrógeno (Inicio, 2020) | 12 |
| Figura 1-2 | Intensidad de GEI de la producción de hidrógeno (IEA, 2019) | 14 |
| Figura 1-3 | Costo mundial promedio de producción de H2 por fuente, 2019 (IEA, 2019) | 14 |
| Figura 1-4 | Trayectoria del costo de hidrógeno verde 2020-2030 (Hydrogen Council, 2020) | 14 |
| Figura 1-5 | Previsión del CAPEX para sistemas de electrólisis (FCH-JU, 2014) | 15 |
| Figura 1-6 | Previsión de los costos globales de producción de hidrógeno, 2030 (IEA, 2019) | 15 |
| Figura 1-7 | Costos de producción de hidrógeno en América Latina (IEA, 2019) | 15 |
| Figura 1-8 | Proyección de la demanda de hidrógeno (Hydrogen Council, 2017) | 15 |
| Figura 1-9 | Usos tradicionales y nuevos del hidrógeno (Inicio, 2020) | 16 |
| Figura 1-10 | Energía renovable (Inicio, 2020) | 16 |
| Figura 1-11 | Un electrolizador y una celda de combustible (Inicio, 2020) | 16 |
| Figura 1-12 | Tecnologías de almacenamiento de energía (AIE, 2013) | 17 |
| Figura 1-13 | Almacenadores de hidrógeno y su capacidad (Inicio, 2020) | 17 |
| Figura 1-14 | Comparación entre hidrógeno y baterías en el almacenamiento de energía (Inicio, 2020) | 18 |
| Figura 1-15 | Control de frecuencia secundario con tecnologías de hidrógeno | 19 |
| Figura 1-16 | Comparación de vehículos eléctricos y de celda de combustible (Inicio, 2020) | 20 |
| Figura 1-17 | Comparación de rango entre BEV y FCEV (Inicio, 2020) | 20 |
| Figura 1-18 | Comparación de disponibilidad de vehículo entre BEV y FCEV (Inicio, 2020) | 20 |
| Figura 1-19 | Panorama mundial del despliegue y las metas de la movilidad a hidrógeno, 2030 | 21 |
| Figura 1-20 | Proyectos mundiales de hidrógeno verde para químicos verdes | 22 |
| Figura 1-21 | Límites para mezclas de hidrógeno – gas natural en gasoductos (Dolci, 2019) | 22 |
| Figura 1-22 | Quemador de hidrógeno desarrollado por Toyota y Chugai (Toyota, 2018) | 23 |
| Figura 1-23 | Turbinas de mezcla de gas natural - hidrógeno | 23 |
| Figura 1-24 | Sistemas residenciales combinados de calor y energía. | 24 |
| Figura 1-25 | Proceso de metanización – Proyecto HELMETH (Helmeth, 2017). | 24 |
| Figura 1-26 | Proceso Power-to-Liquids (Instituto Karlsruhe, 2019) | 25 |
| Figura 1-27 | Readiness tecnológica y comercial de nuevas aplicaciones de hidrógeno | 26 |
| Figura 2-1 | Países desarrollando políticas de hidrógeno o proyectos piloto. Adaptado de (WEC, 2020) | 28 |
| Figura 2-2 | CertifHy, el primer esquema de garantía de origen para hidrógeno verde (Inicio, 2018) | 29 |
| Figura 2-3 | Participación Europea en hidrógeno para 2050 (FCH-JU, 2019) | 30 |
| Figura 2-4 | Movilidad a hidrógeno en Alemania | 31 |
| Figura 2-5 | Estado de la movilidad a hidrógeno en Japón (Inicio, 2020) | 32 |
| Figura 2-6 | Estado de la movilidad a hidrógeno en California (CaFCP, 2020) | 33 |
| Figura 2-7 | Potencial chileno de hidrógeno verde (Ministerio de Energía, Chile, 2020) | 34 |
| Figura 2-8 | Contexto chileno para el desarrollo de la estrategia de hidrógeno | 34 |
| Figura 3-1 | Comparación de la distribución de hidrógeno comercial y cautivo | 36 |
| Figura 3-2 | Capacidad de producción de hidrógeno de Pemex. | 36 |
| Figura 3-3 | Mercado internacional de hidrógeno en México (Ministerio de Economía, 2019) | 36 |
| Figura 3-4 | Producción de compañías de gas industrial en México (Fortuna, 2020) | 36 |
| Figura 3-5 | Principales productores y consumidores de hidrógeno en México | 37 |
| Figura 3-6 | Potenciales consumidores de hidrógeno en México. | 37 |
| Figura 3-7 | Infraestructura de energía renovable en México. | 37 |
| Figura 3-8 | Marco regulatorio energético mexicano. | 45 |
| Figura 3-9 | HDF – Energía Los Cabos, proyecto Power to Power. | 47 |
| Figura 3-10 | Dhamma Energy - H2 Guanajuato - Proyecto Power to Hydrogen | 47 |

Resumen Ejecutivo

El hidrógeno como vector energético tiene más de cinco décadas de investigación y desarrollo. En los últimos cinco años, se ha posicionado como una alternativa viable y una prioridad en la agenda energética de muchos países debido a su potencial de descarbonización, la preparación tecnológica a la que ha llegado y la disminución acelerada de los costos de infraestructura.

Durante el siglo XX, la tecnología de producción de hidrógeno más extendida fue el Reformado de Metano a Vapor (SMR, por sus siglas en inglés) debido a sus altas tasas de producción, bajos precios y disponibilidad de materia prima (gas natural). Hoy en día, el SMR sigue siendo la tecnología líder de producción de hidrógeno, con el 95% de la cuota global; sin embargo, el SMR es un proceso contaminante (genera 9 kilogramos de CO₂ por kilogramo de hidrógeno), por lo cual métodos más limpios, como la pirólisis y la electrólisis, se están desarrollando y disminuyendo sus costos.

Para identificar rápidamente la fuente de energía, tecnología de producción y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) relacionadas con la producción de hidrógeno, la comunidad internacional ha asignado "colores" al hidrógeno, siendo el **hidrógeno verde** (energía renovable con al menos un 60% menos de emisiones de GEI, según CertifHy) el más limpio y el más buscado para alcanzar los objetivos de mitigación del cambio climático.

Hoy en día, el hidrógeno verde es entre un 50 y un 300% más caro que el hidrógeno gris y otros combustibles fósiles. Sin embargo, el Hydrogen Council espera que sus costos disminuyan hasta un 60% en los próximos 10 años.

Para 2050, países como Rusia, Corea o Japón, con un bajo potencial de energía renovable, tendrán un costo de producción de hidrógeno verde (promedio por país) superior a 4 USD/kg. En contraste, la región de América Latina tendrá un promedio de 2-2.5 USD/kg, donde el potencial de hidrógeno verde más alto está en Chile, con una previsión de precio por debajo de 1.6 USD/kg, seguido de Brasil, Perú, Argentina y México en el rango de 1.6 – 2 USD/kg. Algunas regiones específicas de países como México podrían lograr costos de hidrógeno tan bajos como 1.2 USD/kg.

A 2020, aproximadamente el 85% de la producción mundial de hidrógeno es captiva¹, debido a grandes consumidores como las empresas petroquímicas, que incorporan plantas de producción de hidrógeno en sus instalaciones de proceso. Sin embargo, la demanda crecerá principalmente en nuevas aplicaciones de energía y transporte. El Hydrogen Council prevé que el 75% de la demanda de H₂ para 2050 se destinará a nuevos usos del hidrógeno.



1. Los mercados de hidrógeno pueden clasificarse en cautivos (hidrógeno producido para autoconsumo en plantas industriales) y comerciales (hidrógeno producido por empresas en venta en upply y la demanda de libre mercado).

Los nuevos usos del hidrógeno se pueden categorizar de la siguiente manera:

Almacenamiento de energía renovable

El hidrógeno en el almacenamiento de energía renovable es un proceso circular de división de agua en un electrolizador alimentado con energía renovable, almacenamiento de hidrógeno y conversión de hidrógeno de nuevo a electricidad o a calor. Esta aplicación crítica podría contribuir al **12% de la demanda de hidrógeno en 2050**.

Movilidad eléctrica

Los vehículos eléctricos a celda de combustible de hidrógeno (FCEV, por sus siglas en inglés) ayudarán a descarbonizar el sector del transporte, especialmente en segmentos de transporte pesado y uso intensivo, como camiones de carga y autobuses de transporte público. La movilidad a hidrógeno podría representar el **28% de la demanda de hidrógeno para 2050**.

Productos químicos verdes

La industria química² consumió el 90% de este hidrógeno. El hidrógeno verde tiene el potencial de reducir las emisiones de CO₂ de la demanda de hidrógeno existente, así como de nuevos usos químicos del hidrógeno, como la reducción del mineral de acero, que utiliza otros agentes de reductores. El sector podría representar del **15 al 20% de la demanda de H₂ en 2050**.

Descarbonización de gas natural

El hidrógeno se puede inyectar en las redes de gas natural para reducir la huella de carbono de la combustión de este. Hoy en día, la mezcla de hidrógeno máximamente factible en gas natural es de aproximadamente el 20%, sobre una base de volumen, que puede reducir la huella de carbono del gas natural hasta un 10%. El sector podría representar aproximadamente **menos del 5% de la demanda de H₂ en 2050**.

Combustibles sintéticos líquidos

Los combustibles sintéticos líquidos se pueden producir en procesos que mezclan hidrógeno con CO₂. Usar hidrógeno verde y CO₂ capturado resulta en un combustible sintético neutro en carbono. Esta tecnología sigue siendo inmadura, pero tiene un enorme potencial para la aviación, un segmento de transporte difícil de electrificar o alimentar mediante la quema de hidrógeno puro, debido a los cambios de presión extrema que experimentan los aviones durante los vuelos. **El sector podría representar del 5-10% de participación de mercado en la demanda de hidrógeno verde mundial de 2050**.

Metano 100% renovable

Al igual que con los combustibles sintéticos líquidos, el metano se puede producir mezclando hidrógeno con CO₂. Usar hidrógeno verde y CO₂ capturado renovable permite la producción de metano neutro en carbono, una alternativa para reducir las emisiones mientras se continúa utilizando la infraestructura existente para acondicionar, transportar y consumir gas. El sector podría representar aproximadamente **menos del 5% de la demanda de H₂ en 2050**.

Edificios

Los edificios pueden utilizar hidrógeno para la generación de energía y calor utilizando celdas de combustible PEM, que son dispositivos que producen electricidad y calor como subproducto en temperaturas adecuadas para aplicaciones residenciales (60-80°C). El hidrógeno para edificios podría contribuir al **14% de la demanda de hidrógeno para 2050**.

Calor y energía industrial

Quemadores de hidrógeno, turbinas y sistemas de calor y energía (celdas de combustible) pueden suplir a las industrias sus necesidades térmicas y energía eléctrica. El hidrógeno para el calor industrial y energía podría contribuir al **21% de la demanda de hidrógeno para 2050**.

El hidrógeno está tomando un papel destacado en las agendas energéticas de muchos países en todo el mundo.

A septiembre de 2020, 19 países (que acumulan el 44% del PIB mundial) tienen una hoja de ruta o estrategia de hidrógeno en vigor. En muchos casos, las estrategias de hidrógeno se acompañan de fondos de inversión para el desarrollo de proyectos piloto y la habilitación de ecosistemas productivos.

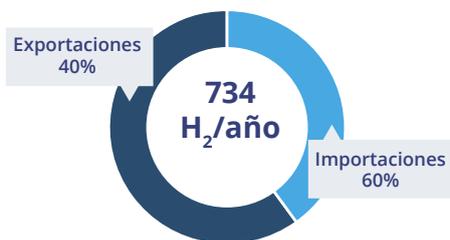
En América Latina, Chile es el país líder en términos de desarrollos de hidrógeno. Su estrategia se publicó a finales de 2020, y algunos proyectos piloto para aplicaciones de alta demanda de energía, como la fabricación de camiones mineros y explosivos, ya están en fase de planificación. La política estatal de hidrógeno de Chile tiene cuatro directrices:

- Transferencia de conocimiento e innovación
- Apoyo a la producción, uso y exportación
- Regulación y normativa
- Desarrollo social y territorial

En México, el mercado de hidrógeno existente está consumiendo más de 220.000 toneladas/año en 2020, de los cuales 98.6% está cautivo en manos de PEMEX, la compañía estatal de petróleo y gas.

Figura 1.0 Mercado de hidrógeno en México (Secretaría de Economía, 2019 y Fortuna, 2020).

Mercado internacional mexicano de hidrógeno



Mercado mexicano de hidrógeno mercantil



La producción de hidrógeno mercantil en México es de aproximadamente 2,650 toneladas por año, la mayoría de las cuales es proporcionada por Air Liquide, Linde y Cryo-Infra.

Hay un pequeño balance comercial internacional de hidrógeno en México, debido a transacciones privadas.

El 40% representa las exportaciones, principalmente a Centroamérica y el Caribe, y el 60% es importado de Estados Unidos. Las importaciones de hidrógeno a México responden a tiempos de inactividad por mantenimientos preventivos y correctivos en las plantas de gas, o solicitudes imprevistas por parte de los clientes en el mercado abierto de hidrógeno industrial.

México está en una posición privilegiada para convertirse en un líder en el desarrollo del hidrógeno verde:

- El país tiene un potencial de energía renovable adecuadamente distribuido.
- México tiene una infraestructura energética bien desarrollada que podría permitir el desenvolvimiento del hidrógeno verde efectivamente.
- Hay al menos un par de empresas internacionales que han visto el potencial de desarrollos de hidrógeno verde en México y ya están conceptualizando sus primeros proyectos piloto en el país.
- El marco regulatorio energético existente permite el uso del hidrógeno como vector de energía.
- Las universidades y centros de investigación mexicanos han estado trabajando en tecnologías de hidrógeno desde la década de 1990. Aquello significa que México tiene la capacidad técnica para aprovechar el desarrollo de proyectos industriales de hidrógeno verde.



En cuanto a las entrevistas de las partes interesadas mexicanas realizadas para este estudio, la mayoría de los actores entrevistados todavía observan cómo el hidrógeno se desarrolla en otras latitudes y mantienen un interés en el tema, pero sin una participación activa.

Sin excepción, los participantes coinciden en que México tiene un alto potencial renovable y una amplia extensión territorial que podría permitir el desarrollo de hidrógeno verde en el país.

En cuanto a las barreras, los actores identifican como la principal barrera para el hidrógeno verde la actual política energética del país y, por lo tanto, el ecosistema adverso de inversión en proyectos renovables en México.

La segunda barrera más importante para el hidrógeno en México es la falta de regulaciones encaminadas a cumplir con los objetivos del Acuerdo de París. Esta falta de regulación en términos de emisiones no ha hecho necesario emitir reglamentos técnicos para las nuevas tecnologías, como la producción y el uso de hidrógeno.





1. Hidrógeno como vector energético: tecnologías y aplicaciones

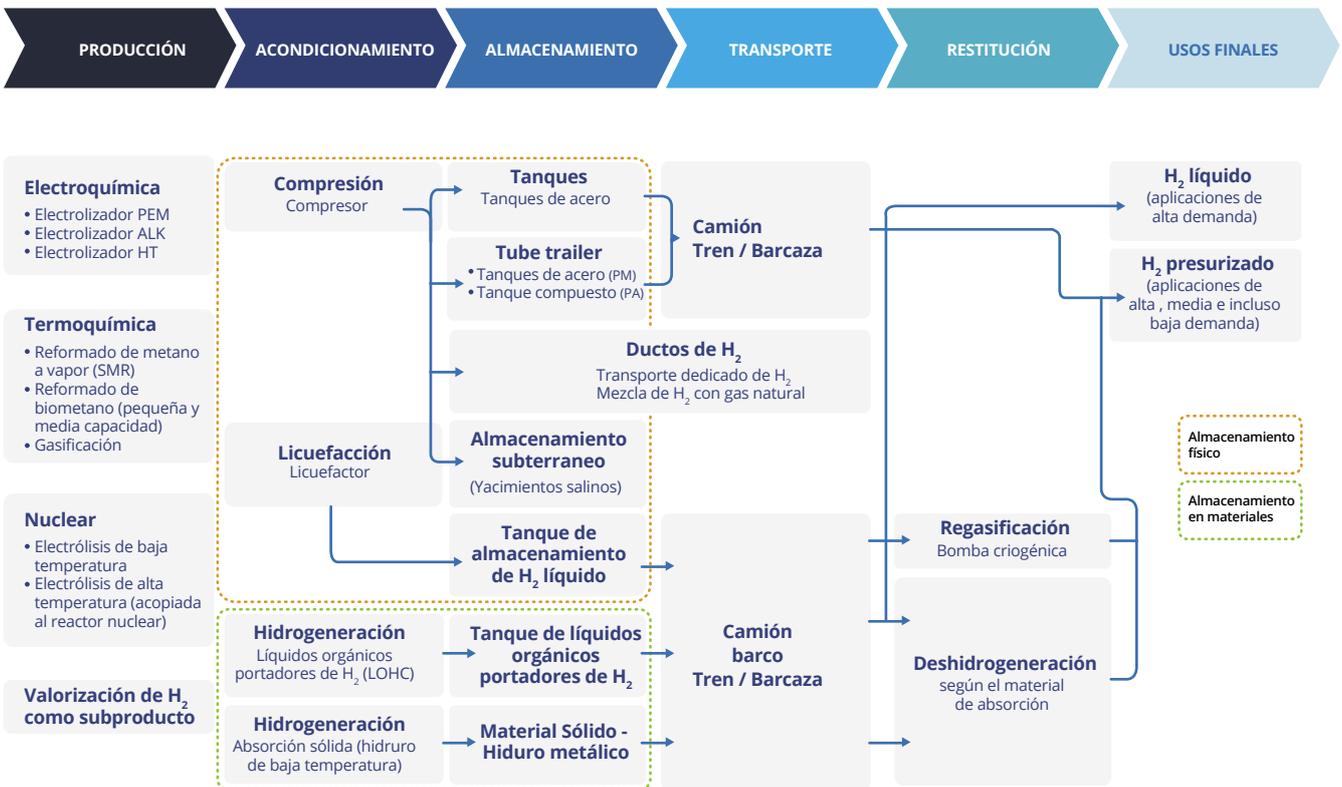
1.1. Contexto del hidrógeno verde

El hidrógeno es el primer elemento de la Tabla Periódica; es químicamente el más simple, el más abundante del Universo, y uno de gran interés en los últimos tiempos debido a su potencial como vector de energía. El hidrógeno no se encuentra en un estado libre en la Tierra, en el aire o en las minas. Es una sustancia que debe obtenerse separándola de compuestos como hidrocarburos o agua.

Desde que fue descubierto en 1766 por Henry Cavendish, el hidrógeno se ha utilizado como materia prima para muchos procesos, especialmente para el sector petroquímico. Los usos tradicionales incluyen desulfuración de gasolinas, además de moléculas orgánicas pesadas o síntesis química, como el amoníaco, el componente más importante de los fertilizantes.

Durante el siglo XX, la tecnología de producción de hidrógeno más extendida fue el Reformado de Metano a Vapor (SMR) debido a sus altas tasas de producción, bajos precios y disponibilidad de materias primas (gas natural). Hoy en día, el SMR sigue siendo el líder en tecnología de producción de hidrógeno, con el 95% de la cuota global, sin embargo, el SMR es un proceso contaminante (generando alrededor de 9 kilogramos de CO₂ por kilogramo de hidrógeno). Se están desarrollando métodos más limpios para producir hidrógeno como la pirólisis, la cual consiste en la degradación térmica de biomasa o biogás dentro de un horno de alta temperatura que resulta en la producción de hidrógeno y de carbón negro sólido; y la electrólisis, un método producción de hidrógeno a partir de la división de la molécula del agua en hidrógeno y oxígeno mediante una corriente eléctrica descargada en el agua.

Figura 1-1. Cadena de valor de hidrógeno (Hinicio, 2020)



Con el fin de identificar fácilmente la fuente de energía, la tecnología de producción y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) relacionadas con la producción de hidrógeno, la comunidad internacional ha asignado "colores" al hidrógeno, siendo el hidrógeno verde el más limpio de todos en términos de potencial de reducción de emisiones, así como en la generación de subproductos.



Tabla 1. Tecnologías y colores de producción de hidrógeno (BMWi, 2020)

| Color del hidrógeno | Fuente de energía | Materia prima | Tecnología de producción | Volúmenes de producción | Contribución a los objetivos de descarbonización |
|---------------------|-------------------------------------|--------------------|---|---------------------------------|--|
| Gris | Combustibles fósiles | Metano Carbón | Reformado de metano a vapor Gasificación | 100-600 ton H ₂ /día | Altos volúmenes de hidrógeno barato para probar nuevas tecnologías de consumo H ₂ . No hay reducción de emisiones de GEI. |
| Azul | Combustibles fósiles | Metano Carbón | Reformado de metano a vapor con captura de carbono Gasificación de carbón con captura de carbono | 100-600 ton H ₂ /día | Altos volúmenes de hidrógeno barato para probar nuevas tecnologías de consumo H ₂ . Reducción de 80-90% de emisiones de GEI. |
| Turquesa | Energía renovable o carbono neutral | Metano o biometano | Pirólisis | Escala de laboratorio | Se espera que produzca grandes volúmenes de H ₂ . No hay emisiones de GEI, pero hay carbono negro presente. |
| Rosa | Energía nuclear | Agua | Electrólisis acoplada con los sistemas de refrigeración de reactores nucleares | 0.1-2 ton H ₂ /día | Se espera un volumen medio de producción de hidrógeno. No hay emisiones de GEI, pero los residuos nucleares siguen presentes. |
| Verde | Energía renovable | Agua | Electrólisis | 0.1-2 ton H ₂ /día | Se espera un volumen medio de producción de hidrógeno. No hay emisiones o residuos de GEI debido a los procesos de materias primas/energía. |

Según el Programa Europeo para Garantías de Origen del Hidrógeno, CertifHy (Inicio, 2015), el hidrógeno verde se produce utilizando energía renovable y una intensidad de GEI al menos un 60% por debajo hidrógeno producido a partir de gas natural.

Figura 1-2. Intensidad de GEI de la producción de hidrógeno (IEA, 2019)

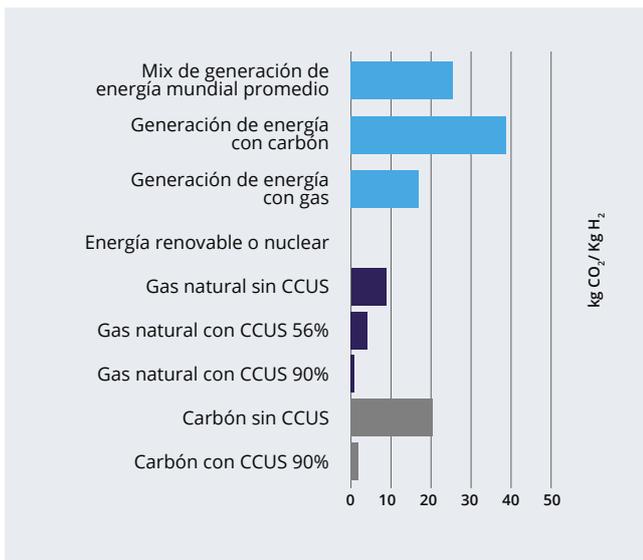
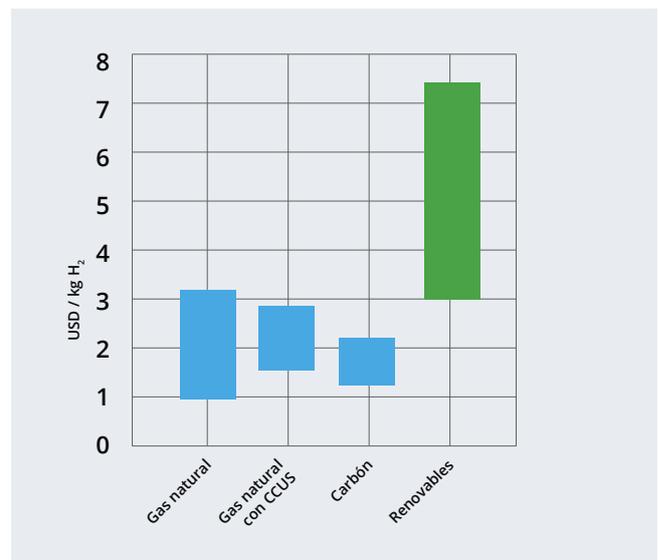


Figura 1-3. Costo mundial promedio de producción de H₂ por fuente, 2019 (IEA, 2019)

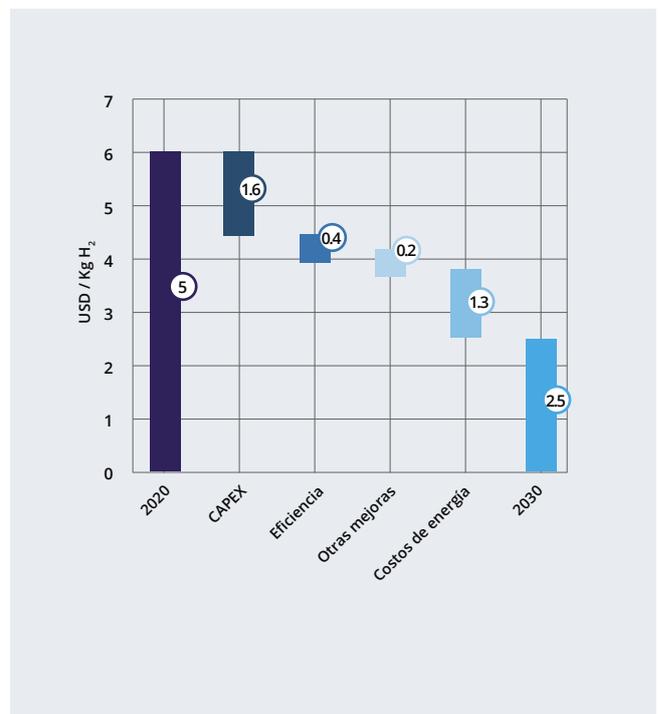


Mientras que el hidrógeno verde es la vía de producción de hidrógeno más limpia, todavía es 50 a 300% más costoso que las vías de combustibles fósiles. Hay múltiples razones detrás de ello:

- **Eficiencia y materiales.** La electrólisis es una tecnología madura; sin embargo, todavía existe el potencial de reducir los costos de los materiales y mejorar la eficiencia.
- **Escala de producción.** Todavía no hay producción en masa de electrolizadores a 2020.
- **Cadenas de suministro.** Todavía deben optimizarse para el suministro de hidrógeno verde.
- **Costo de energía y materias primas.** Dependiendo de la ubicación, las energías renovables podrían ser más costosas que la energía basada en fósiles.

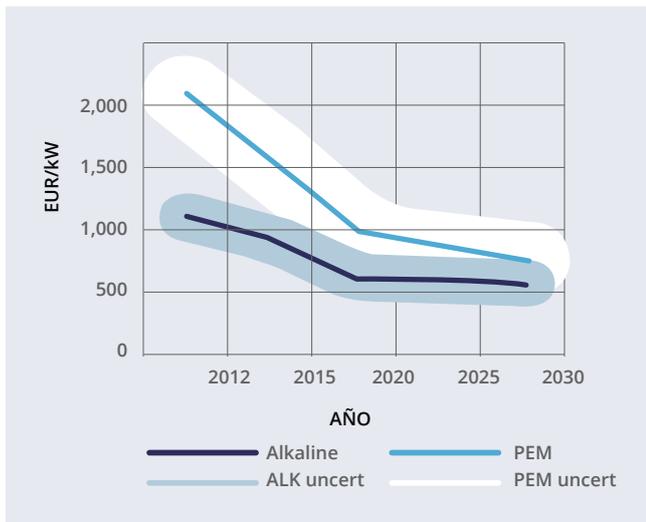
Las entidades privadas y públicas están haciendo esfuerzos en todo el mundo para cerrar la brecha entre el hidrógeno gris y el verde. El cambio climático y la seguridad energética son los principales impulsores detrás del deseo de adoptar el hidrógeno verde.

Figura 1-4. Trayectoria del costo de hidrógeno verde 2020-2030 (Hydrogen Council, 2020)



Según el Hydrogen Council, los costos del hidrógeno verde podrían caer hasta un 60% en los próximos 10 años, impulsado por mejoras en equipamiento CAPEX (incluyendo cadena de suministro, materiales y fabricación), eficiencia (lo que significa menos consumo de energía), costos energéticos, y otros avances en la cadena de valor. Se espera que solo el CAPEX de los electrolizadores disminuya entre el 40 y el 50% en los próximos 10 años.

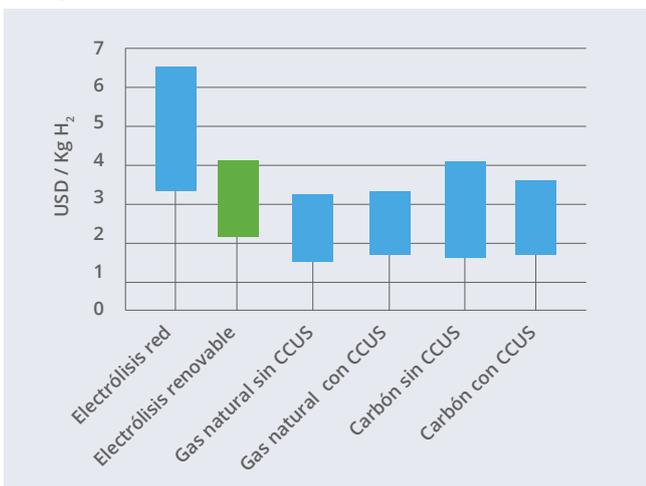
Figura 1-5. Previsión del CAPEX para sistemas de electrólisis (FCH-JU, 2014)



La Agencia Internacional de la Energía estima un costo promedio mundial de 2 a 4 USD/kg de hidrógeno verde para 2030, alcanzando la paridad con tecnologías convencionales como la reforma de metano a vapor y la gasificación del carbón sin captura de carbono. El hidrógeno verde será más competitivo en mercados con altos impuestos al carbono, escasos recursos de combustibles fósiles y altos potenciales de energía renovable.

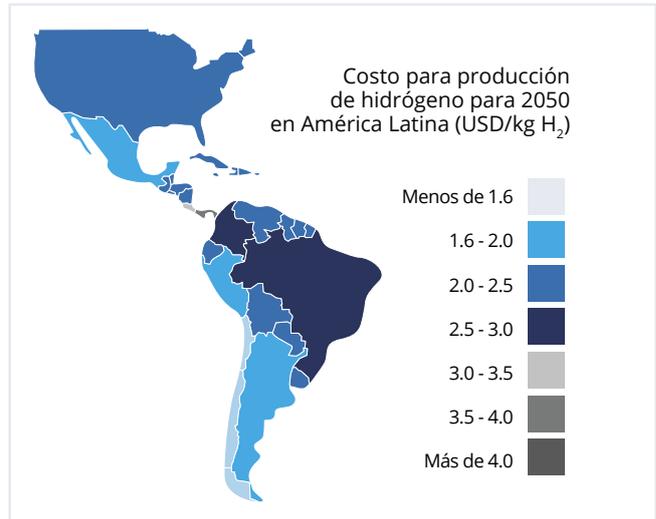
Para 2050, países con poco potencial renovable como Rusia, Corea, o Japón, producirán hidrógeno por encima de 4 USD/kg. Por el contrario, se espera que la región de América Latina alcance precios alrededor de 2 a 2.5 USD/kg.

Figura 1-6. Previsión de los costos globales de producción de hidrógeno, 2030 (IEA, 2019)



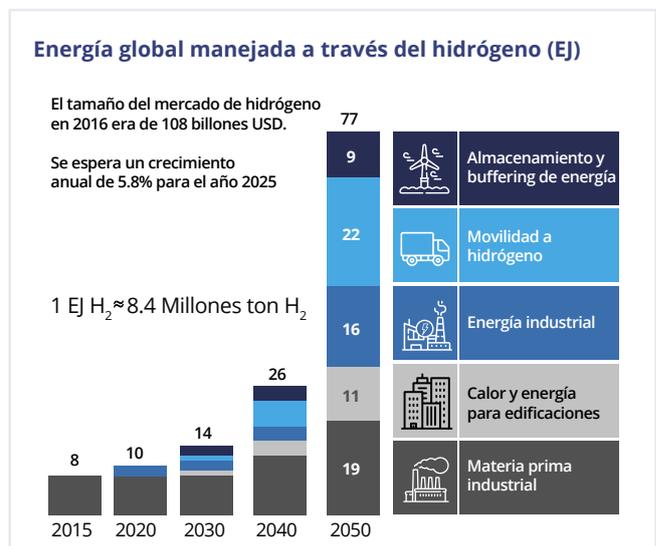
En América Latina, Chile probablemente alcance los costos de producción de hidrógeno más bajos, a 1,6 USD/kg para 2050, seguido por Brasil, Perú, Argentina y México en el rango entre 1,6 – 2 USD/kg.

Figura 1-7. Costos de producción de hidrógeno en América Latina (IEA, 2019)



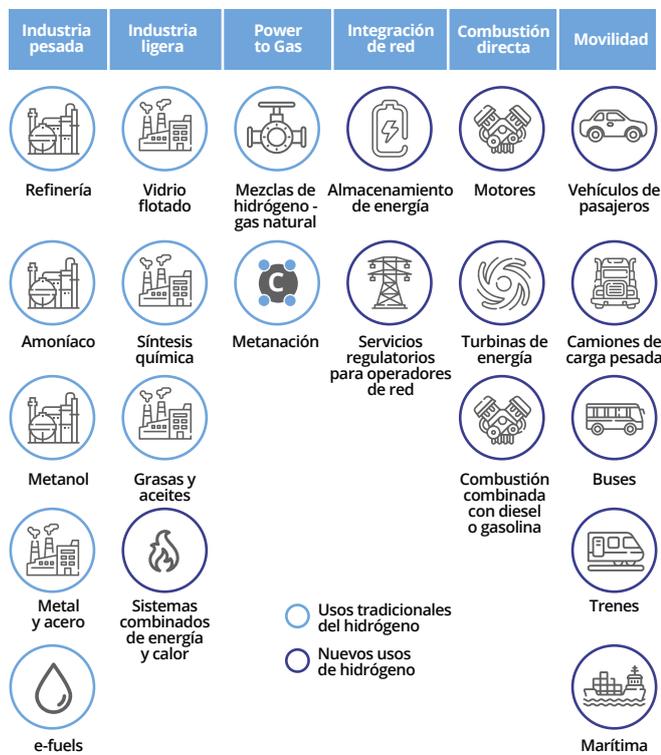
A partir de 2020, alrededor del 85% de la producción mundial de hidrógeno está captiva con instalaciones SMR *in situ* en plantas petroquímicas. Se espera que el hidrógeno mercantil gane cuotas de mercado debido a su adopción en aplicaciones como el transporte y los edificios, donde se espera que muchos proveedores compitan (al igual que sucede hoy en día con la provisión de combustibles líquidos y gas). Se espera que la demanda de hidrógeno crezca principalmente en nuevas aplicaciones como el almacenamiento de energía, la movilidad y la energía para las industrias.

Figura 1-8. Proyección de la demanda de hidrógeno (Hydrogen Council, 2017)



La transición de hidrógeno gris a verde será un proceso gradual. Algunos proyectos innovadores de hidrógeno se están desarrollando con hidrógeno gris o azul, permitiendo la prueba de conceptos y el desarrollo y fortalecimiento de cadenas de valor en la llamada nueva "economía del hidrógeno". Sin embargo, es importante tener en cuenta que, el objetivo final de los gobiernos que impulsan el desarrollo del hidrógeno es migrar al hidrógeno verde, tanto para usos tradicionales como innovadores de H₂. El hidrógeno gris y azul puede apoyar la transición en sus etapas iniciales, pero sólo el hidrógeno verde conducirá a los objetivos de descarbonización establecidos en el Acuerdo de París.

Figura 1-9. Usos tradicionales y nuevos del hidrógeno (Inicio, 2020)



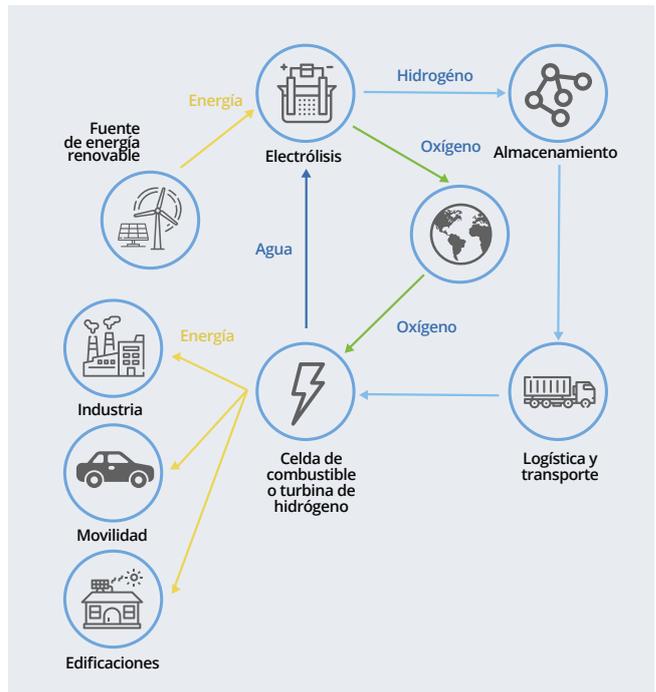
El hidrógeno no es una fuente de energía primaria; es un portador de energía. Las energías renovables de plantas fotovoltaicas, eólicas, geotérmicas o hidroeléctricas se pueden almacenar y transportar como hidrógeno a partir de moléculas de agua divididas (electrólisis).

Los electrolizadores y las celdas de combustible son tecnologías clave para la nueva economía del hidrógeno, ya que permiten almacenar energía renovable variable en forma de hidrógeno, y luego se utilizan como tal (para aplicaciones industriales o de transporte) o se convierten de nuevo en electricidad para inyectarse en la red eléctrica.

El concepto de power-to-x se refiere a la posibilidad de transformar la energía eléctrica (renovable) en una molécula química que puede ser transportada, utilizada para generar calor o energía y como materia prima.

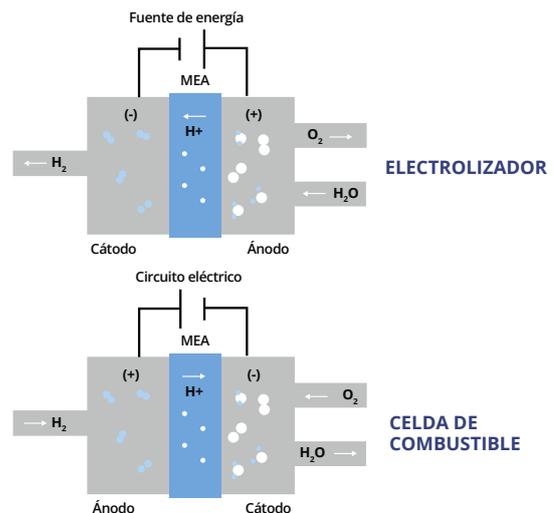
El hidrógeno acoplado a la energía renovable es un proceso circular de división del agua, almacenamiento de hidrógeno y conversión de hidrógeno de nuevo en electricidad o calor.

Figura 1-10. Energía renovable (Inicio, 2020)



Un electrolizador es un dispositivo electroquímico en el que la molécula de agua se divide en hidrógeno y oxígeno. El oxígeno se ventila y el hidrógeno se almacena en tanques o recipientes. Una celda de combustible en un dispositivo con la función opuesta se alimenta con hidrógeno de tanques, toma oxígeno del aire y entrega energía eléctrica y agua. Alternativamente y dependiendo del volumen de hidrógeno disponible, se pueden utilizar turbinas para convertir el hidrógeno en electricidad (ver sección 1.6).

Figura 1-11. Un electrolizador y una celda de combustible (Inicio, 2020)



Las celdas de combustible suministran electricidad a los vehículos de hidrógeno (vehículos eléctricos a celda de combustible). En aplicaciones estacionarias, se utilizan en energía y sistemas de consumo de baja energía de kilowatts a pocos megawatts (casas, antenas de telecomunicaciones, etc.). En aplicaciones energéticas de alta demanda y generación de energía centralizada, el hidrógeno se utiliza como combustible para turbinas de 20-4,00 MW.

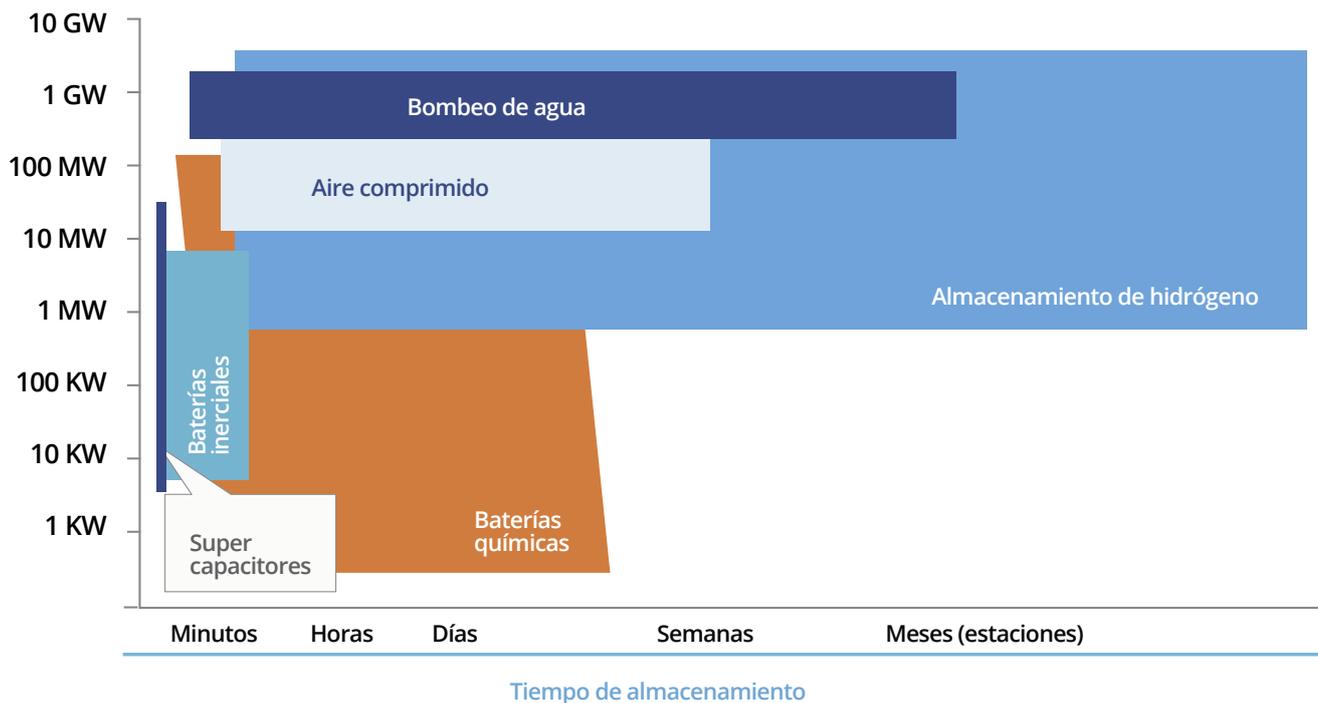
1.2. Almacenamiento de energía renovable (y re-electrificación)

Hay una serie de tecnologías disponibles en el mercado para almacenar energía renovable, como energía hidroeléctrica bombeada, aire comprimido, condensadores, baterías e hidrógeno.

La Figura 1-12 muestra un mapa tecnológico para elegir entre las opciones de almacenamiento de energía según el volumen de energía, el tiempo de almacenamiento y las capacidades técnicas.

El hidrógeno es una opción viable cuando el volumen de energía a almacenar es alto, y la energía debe almacenarse durante largos períodos.

Figura 1-12. Tecnologías de almacenamiento de energía (AIE, 2013)



El hidrógeno es un gas químico que se puede comprimir o licuar y almacenar en diferentes tamaños y tipos de recipientes.

Con capacidades desde algunos gramos a millones de kilogramos, hay una oferta completa de recipientes de hidrógeno. El tamaño del almacenador de hidrógeno determina la capacidad de acumular energía renovable. Algunos almacenadores implican procesos complejos, como los portadores orgánicos de hidrógeno líquido, que necesitan un reactor catalítico para absorber hidrógeno en una molécula orgánica. Posteriormente, se utiliza otro reactor catalítico para recuperar el hidrógeno. Otros almacenes son simplemente recipientes cerrados, como tanques de acero o embalses subterráneos.

Los campos de petróleo y de gas agotados y los depósitos geológicos salinos son compatibles con el almacenamiento de hidrógeno, siendo los depósitos disponibles más extensos, con capacidades de 300.000 kg a 6.000.000 kg de hidrógeno comprimido. Para esta tecnología solo se necesita exploración geológica. Inyectar hidrógeno en depósitos subterráneos es un proceso tecnológico simple de compresión. Los reservorios no requieren mantenimiento, lo que resulta en un bajo costo de almacenamiento por kilogramo de hidrógeno.

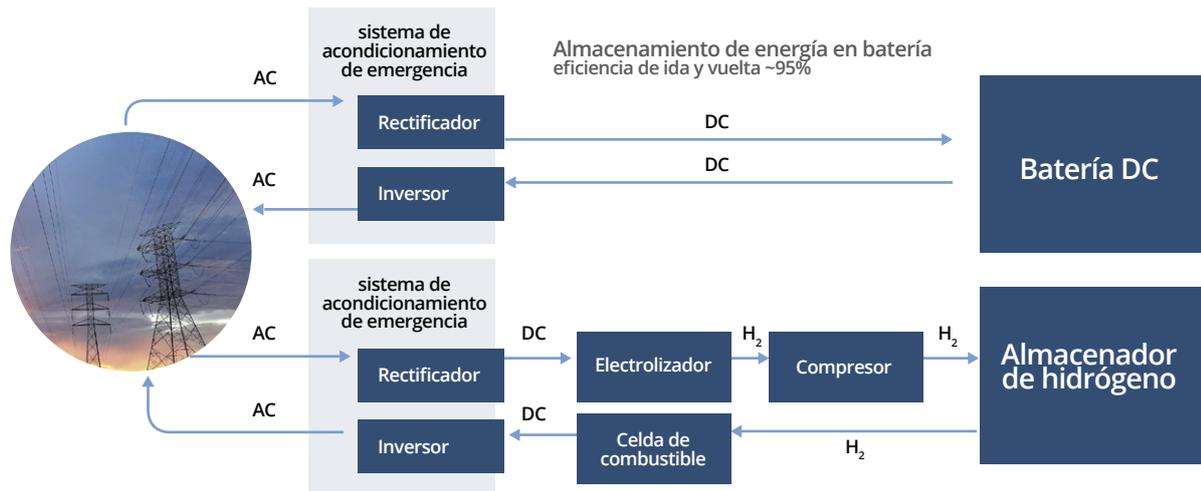
Figura 1-13. Almacenadores de hidrógeno y su capacidad (Inicio, 2020)



Las baterías y el hidrógeno se comparan comúnmente porque ambos son procesos electroquímicos. En el almacenamiento de energía de la batería, los electrones se almacenan directamente en una sustancia química, mientras que el hidrógeno se transforma de energía eléctrica a química.

El hidrógeno debe producirse, comprimirse, almacenarse y convertirse de nuevo en electricidad, y a pesar de la alta eficiencia de los electrolizadores (~60%) y las celdas de combustible (50-60%), las pérdidas acumuladas de energía resultan en un viaje de ida y vuelta, o una eficiencia de ciclo del 35% para los sistemas de celdas de combustible de hidrógeno, mientras que las baterías son 95% eficientes.

Figura 1-14. Comparación entre hidrógeno y baterías en el almacenamiento de energía (Hinicio, 2020)



A pesar de su baja eficiencia de ciclo, las tecnologías de hidrógeno tienen ventajas de ciclo de vida, como una mayor relación energía almacenada en inversión (ESOI, por sus siglas en inglés) en comparación con las baterías. El ESOI está dado por la siguiente ecuación (Pellow, 2015):

Ecuación 1 - Ecuación de la Relación de Energía Almacenada en Inversión

$$ESOI = \frac{[\text{Energía despachada a la red a lo largo de la vida útil}]}{[\text{Energía requerida para manufactura}]}$$

Según Pellow, un sistema de almacenamiento de energía de hidrógeno tiene un ESOI de 59, mientras que un sistema de baterías tiene un ESOI 35. Esto significa que los electrolizadores y las celdas de combustible consumen menos energía y tienen mayores vidas útiles.

Otra ventaja de los sistemas de hidrógeno es su baja tasa de autodescarga y su alta densidad energética. Más energía se puede almacenar en menos masa del sistema, lo que proporciona una oportunidad para aplicaciones móviles de alta demanda de energía, como los camiones mineros.

Es importante recordar que no habrá un "ganador en almacenamiento" absoluto. Es probable que veamos un abanico de tecnologías dependiendo de la aplicación, el volumen de energía a almacenar y el tiempo de almacenamiento.

La Tabla 2 muestra una comparación entre los costos de carga, almacenamiento y descarga de sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS, por sus siglas en inglés), hidrógeno almacenado en tanques e hidrógeno

almacenado en depósitos subterráneos. Incluso cuando la carga y descarga de sistemas de hidrógeno es hasta 9 veces más costosa, el costo de almacenamiento en los depósitos subterráneos es el 0,03% del costo de almacenamiento de la batería. Debido a eso, **el hidrógeno es la mejor opción técnica y económica para grandes volúmenes de energía almacenada.**



Tabla 2. Comparación de costos de baterías e hidrógeno para el almacenamiento de energía (NREL, 2019)

| Tecnología | | Carga (USD/kW) | Almacenamiento (USD/kWh) | Descarga (USD/kWh) |
|-----------------------|--------|----------------|--------------------------|--------------------|
| BESS | Actual | 196 | 218 | 60 |
| | Futuro | 183 | 80 | 60 |
| Hidrógeno en tanques | Actual | 942 | 35 | 574 |
| | Futuro | 432 | 18 | 300 |
| Hidrógeno subterráneo | Actual | 942 | 0.08 | 574 |
| | Futuro | 432 | 0.08 | 300 |

El almacenamiento de energía en hidrógeno tiene:

- Menor costo por kWh almacenado
- Mayores costos para carga y descarga
- Menor eficiencia de ida y vuelta

Equipo de carga

- BESS: rectificador
- Hidrógeno: electrolizador compresor

Equipo de almacenamiento

- BESS: baterías
- Hidrógeno: tanques, reservorios subterráneos

Equipo de descarga

- BESS: inversor
- Hidrógeno: celda de combustible

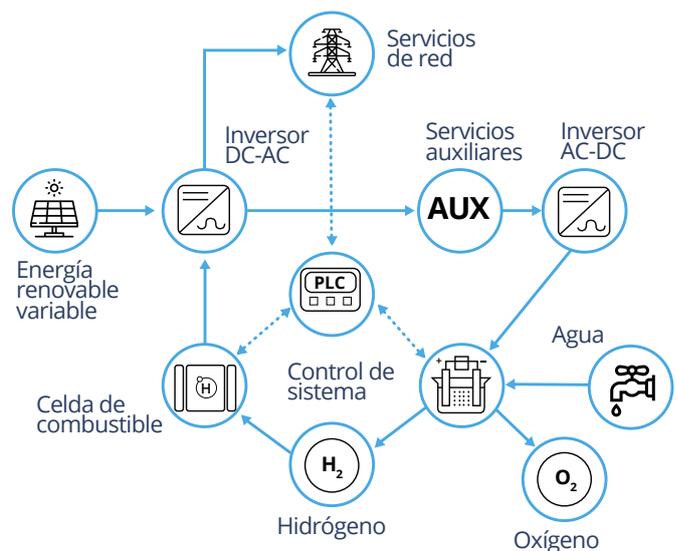
- **Menor eficiencia de ida y vuelta** implica **mayores costos operativos** para el hidrógeno.
- **El menor CAPEX para almacenamiento subterráneo de hidrógeno** reduce el costo total de almacenamiento de energía, pero requiere **mayores volúmenes**
- **El hidrógeno es más competitivo cuando se requieren mayores capacidades de almacenamiento de energía.**

Además de las aplicaciones de almacenamiento de energía del hidrógeno, la electrólisis podría utilizarse para servicios de red en redes de alto contenido de energía renovable variable, por ejemplo, el Control de Frecuencia Secundaria. El control de frecuencia secundaria es el sistema que empareja la generación total del sistema con la demanda total (transmisión, pérdidas y consumo). Corrige las variaciones en la frecuencia del sistema de energía al modificar los cambios a corto plazo en el uso de electricidad que podrían afectar a la estabilidad del sistema de energía. Las deficiencias de producción se pueden compensar con la producción eléctrica de una celda de combustible, mientras que un electrolizador PEM puede absorber el exceso de producción de fuentes renovables variables.

Un electrolizador PEM es una carga dinámica de respuesta rápida cuyo consumo de energía se puede cambiar cada 2 segundos en todo su rango operativo en respuesta a una señal del operador de red. Se puede "ajustar" a la carga total o mínima de su rango de operación completo si es necesario.

Es posible (y se recomienda) asignar dinámicamente una porción de la capacidad de funcionamiento de una planta de electrólisis para la regulación de frecuencias y otros servicios auxiliares.

Figura 1-15. Control de frecuencia secundario con tecnologías de hidrógeno (Hidrogenics, 2018)



1.3 Movilidad eléctrica

El hidrógeno puede impulsar el transporte eléctrico cuando se utiliza en vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV). Los FCEV no queman hidrógeno en un motor de combustión interna, sino que convierten hidrógeno en electricidad dentro de una celda de combustible para conducir un tren motriz eléctrico.

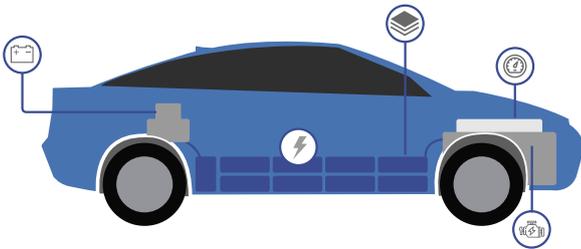
Figura 1-16. Comparación de vehículos eléctricos y de celda de combustible (Inicio, 2020)



Vehículos eléctricos a batería (BEV)

- ✗ Reabastecimiento de 40min - 8hrs para 200-300 km
- ✓ Menor costo, mayor eficiencia

- Mejor para:**
- Vehículos ligeros
 - Distancias cortas a medias
 - Uso privado



Vehículos eléctricos a celda de combustible (FCEV)

- ✓ Reabastecimiento de 4 - 6min para 200 - 300km
- ✗ Mayor costo, menor eficiencia

- Mejor para:**
- Transporte de mercancía y buses
 - Distancias largas
 - Uso intensivo (comercial)

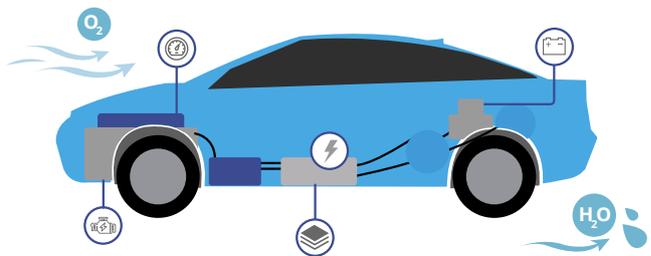


Figura 1-17. Comparación de rango entre BEV y FCEV (Inicio, 2020)

Los FCEV han estado en desarrollo desde la década de los 2000 por fabricantes de automóviles europeos y japoneses como Mercedes Benz, Toyota y Honda. Durante la primavera de 2015, Toyota comenzó a operar la primera línea de producción en todo el mundo para un vehículo FCEV, el Mirai, un vehículo de pasajeros sedán (Mirai significa "futuro" en japonés).

Los FCEV se están posicionando como competidores frente a las baterías para la movilidad eléctrica en los segmentos donde el reabastecimiento de combustible rápido y las autonomías largas son críticas, como en autobuses y camiones de carga. Como se menciona en la sección 1.2, el hidrógeno tiene una densidad energética muy alta, acumulando más energía por kilogramo de sistema de almacenamiento que otras tecnologías, como las baterías. Esta es una ventaja crítica para el segmento de transporte comercial, ya que un FCEV permite transportar más pasajeros, o más carga útil, por el mismo peso total del vehículo, en comparación con las baterías. Una mayor densidad energética también se traduce en más autonomías altas; los FCEV en todos los segmentos de transporte tienen la misma autonomía que los vehículos de motor de combustión interna (ICEV, por sus siglas en inglés), mientras que los vehículos eléctricos a batería (BEV, por sus siglas en inglés) suelen tener autonomías inferiores al 70% de las de los ICEV.

El reabastecimiento de hidrógeno tarda el mismo tiempo que el reabastecimiento de gasolina o diésel, mientras que las baterías normalmente necesitan ser enchufadas durante algunas horas para recargar completamente, comprometiéndose la disponibilidad del vehículo.

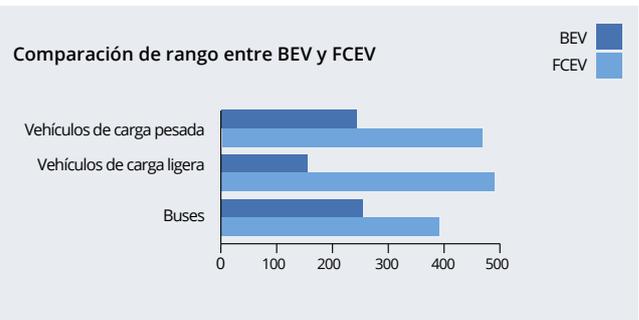
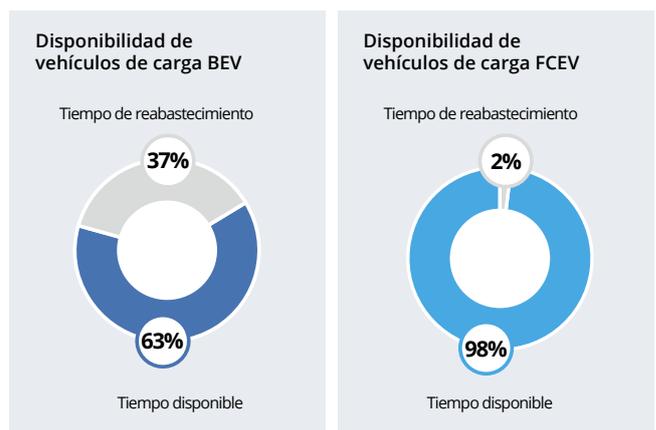


Figura 1-18. Comparación de disponibilidad de vehículo entre BEV y FCEV (Inicio, 2020)



En Estados Unidos, el estado más activo en la adopción de hidrógeno para el transporte es California, posicionándose como líder internacional en la adopción de FCEV. California tiene la mayor proporción de FCEV de pasajeros en el mundo, con más de 8000 coches de hidrógeno a septiembre de 2020. California también está liderando el despliegue de camiones de celdas de combustible para descarbonizar el transporte de carga, ya con un proyecto piloto en marcha en 2020 en el puerto de Long Beach.

China tiene la flota más grande de autobuses de celdas de combustible, mientras que Suiza recibió recientemente una

orden de 50 camiones de carga mediana de Hyundai, el primer lote de un pedido de 1600 unidades que se desplegará a 2025.

En Latinoamérica, los primeros 4 vehículos de pasajeros a hidrógeno están operando en Costa Rica como taxis para el sector turístico de alta gama. Este proyecto también incluye un autobús de celda de combustible, en funcionamiento desde 2018. El esfuerzo costarricense para la adopción del hidrógeno está liderado por la "Alianza por el Hidrógeno", una asociación de empresas privadas que promueven el hidrógeno.

Figura 1-19. Panorama mundial del despliegue y las metas de la movilidad a hidrógeno, 2030



1.4 Productos químicos verdes y materias primas industriales

Según el Hydrogen Council, el sector industrial demanda el 90% del hidrógeno producido hoy en día en el mundo. Sin embargo, el 95% de este hidrógeno se produce a partir de fuentes fósiles como carbón, gas natural o petróleo crudo.

Por lo tanto, cambiar de hidrógeno gris a verde representa una gran oportunidad para la descarbonización de esta industria. Los electrolizadores acoplados a activos de energía renovable pueden ayudar a descarbonizar muchas industrias, como se muestra a continuación.



En todo el mundo y con el fin de demostrar el uso de hidrógeno verde para procesos químicos, varios proyectos piloto están en etapas operativas o de planeación. En América Latina, uno de los más importantes es el proyecto ENAEX-Engie en Chile para producir explosivos mineros verdes con una planta Power-to-Ammonia, lo que reduciría las emisiones de CO2 en más de 600.000 toneladas/año.

Figura 1-20. Proyectos mundiales de hidrógeno verde para químicos verdes



1.5 Descarbonización de gas natural

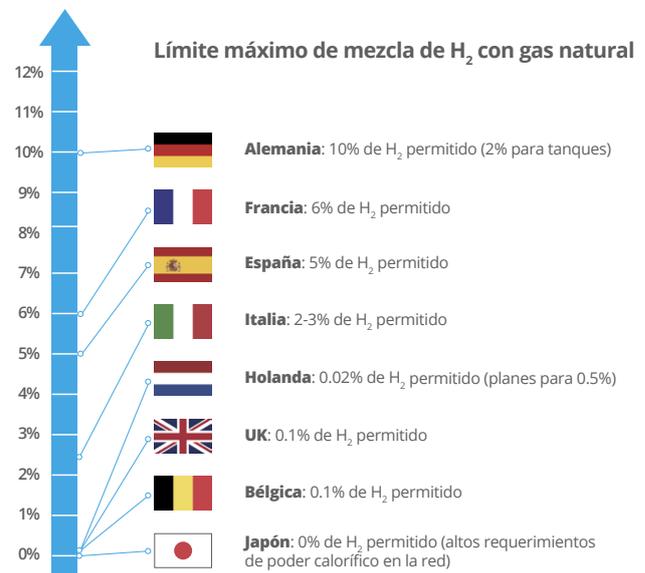
El hidrógeno puede reducir las emisiones de carbono cuando se mezcla con otros combustibles como el gas natural. Se puede transportar como una mezcla con gas natural en las redes de gasoductos, y quemado como una mezcla de combustible en varios equipos de uso final como calderas o turbinas.

Técnicamente existe un límite para la mezcla hidrógeno-gas natural, que varía en función de las características del equipo que utiliza la mezcla (hornos, quemadores, calderas, etc.). Se estima que el porcentaje máximo de mezcla H₂-GN posible sin realizar modificaciones en los sistemas de consumo de gas es del 20%. Las regulaciones actuales en los países europeos aceptan un máximo del 10% del H₂ mezclado con gas natural. Algunos proyectos piloto se están ejecutando hoy en día con mayores porcentajes de hidrógeno en la mezcla. HyDeploy, un proyecto del Reino Unido, ha demostrado que es factible una mezcla de hasta el 20% del hidrógeno sobre una base de volumen cuando se inyecta en gasoductos de gas natural. No obstante, es importante tener en cuenta que estos ensayos se desarrollan en condiciones controladas y en redes de gas pequeñas y delimitadas.

El hidrógeno tiene 1/3 de densidad de energía por volumen con respecto a la densidad del gas natural.

Esta es la razón por la que la reducción de las emisiones no es proporcional a los porcentajes de H₂ inyectados. Una mezcla del 20% de hidrógeno en gas natural reduce las emisiones en alrededor de un 10%.

Figura 1-21. Límites para mezclas de hidrógeno - gas natural en gasoductos (Dolci, 2019)

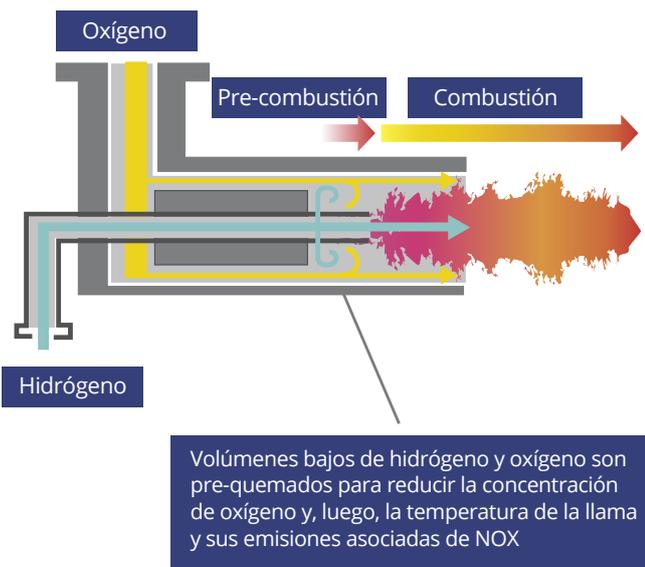


1.6 Calor industrial y energía

Una de las ventajas del hidrógeno como vector energético es transformar la energía eléctrica (renovable) en energía química. Como el hidrógeno tiene una alta densidad de energía por unidad de masa, se puede utilizar como una fuente de calor para aplicaciones industriales. La combustión de hidrógeno puede alcanzar temperaturas superiores a 1000°C, por lo que, dependiendo de la configuración del quemador, el H₂ se puede utilizar para producir altas (>400 °C), medias (150-400 °C) y bajas temperaturas (<150 °C).

La combustión de hidrógeno no está ampliamente extendida hoy en día porque el gas no está disponible en abundancia, y continúa siendo más costoso que los combustibles fósiles.

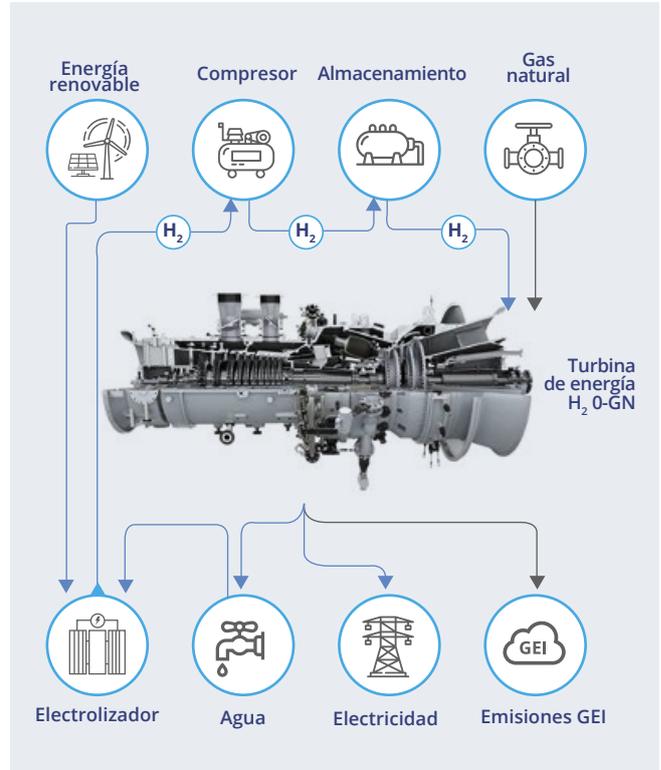
Figura 1-22. Quemador de hidrógeno desarrollado por Toyota y Chugai (Toyota, 2018).



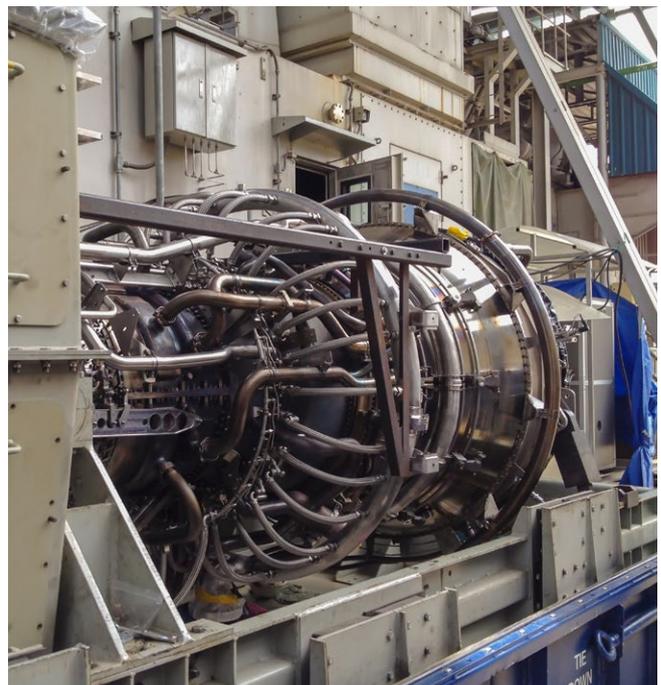
El hidrógeno es un subproducto de muchos procesos industriales, como el reformado del petróleo y la producción de cloro. Desde la década de 1990, las empresas productoras de hidrógeno residual han utilizado este elemento para generar electricidad a través de turbinas. La empresa obtiene hidrógeno como subproducto de la producción de cloro y quema H₂ mezclado con diésel en sus calderas.

Empresas como General Electric y Siemens tienen al menos 25 años de diseñar turbinas de gas que permiten mezclas de hidrógeno en proporciones del 10-50%. Esta mezcla ayuda a reducir las emisiones de CO₂. Por ejemplo, una turbina de 265MW que quema 5% de hidrógeno evitaría 19.000 toneladas de CO₂ anualmente. Los fabricantes de turbinas, como Siemens, están planeando aumentar las mezclas aceptables de gas natural e hidrógeno y producir turbinas que operen con hidrógeno puro para 2030.

Figura 1-23. Turbinas de mezcla de gas natural - hidrógeno (Inicio, 2020).



La combustión de hidrógeno es un proceso altamente exotérmico que produce óxidos de nitrógeno (NO_x). Para evitar las emisiones de este gas contaminante, los fabricantes de turbinas están desarrollando quemadores especializados que reducen la temperatura de las llamas. Estos quemadores se denominan Dry Low Emission o Dry Low NO_x.



1.7 Edificios

La versatilidad del hidrógeno permite su uso no sólo en actividades de alta demanda, como el calor y la generación de energía para la industria, sino también para aplicaciones menos intensivas en energía como el uso en edificios residenciales y comerciales. Las celdas de combustible producen electricidad y calor. Dependiendo de la tecnología de celdas de combustible, pueden producir temperaturas superiores a 900°C (celdas de combustible de óxido sólido), o entre 70 y 80°C (PEM).

Las celdas de combustible PEM se pueden utilizar en edificios para producir electricidad y calefacción con eficiencias eléctricas del 45% y eficiencias globales de hasta el 90%.

Japón es líder en el desarrollo y adopción de sistemas combinados de calor y energía para aplicaciones residenciales. Desde 1999, Japón ha desarrollado estos sistemas y, durante la década del 2000, ha promovido la adopción a través de programas de demostración financiados por el METI (Ministerio de Economía, Comercio, e Industria). Hay unas 300.000 unidades CHP (Calor y Energía Combinados) instaladas en Japón, reduciendo las emisiones entre 35 y 40%. Incluso usando hidrógeno gris, existe una reducción de emisiones asociada a la alta eficiencia del proceso en comparación con los sistemas tradicionales basados en combustibles fósiles. (Centro de Cooperación Industrial UE-JP, 2019).

Figura 1-24. Sistemas residenciales combinados de calor y energía.



1.8 Metano 100% renovable

Otra alternativa que ofrece el hidrógeno para seguir utilizando la infraestructura existente para el gas natural es la producción sintética de metano, un proceso conocido como metanización. El metano sintético se produce a partir de hidrógeno electrolítico y CO₂ capturado (de la industria o del aire).

La metanización representa una oportunidad para producir un gas 100% carbono neutral, manteniendo al mismo tiempo el uso de la infraestructura convencional, como redes de gasoductos y otros equipos de uso final. Las desventajas de la metanización incluyen entre un 25 y un 40% de pérdida de energía asociada a la eficiencia del proceso de síntesis.

La Unión Europea ha desarrollado algunos proyectos piloto para probar este concepto, por ejemplo, el proyecto HELMETH. Este proyecto fue desarrollado entre 2014 y 2017. Este proyecto logró una eficiencia de proceso del 76% y redujo las emisiones de carbono en 150 gramos de CO₂/kWh equivalente de gas producido.

Figura 1-25. Proceso de metanización – Proyecto HELMETH (Helmeth, 2017).



1.9 Combustibles sintéticos líquidos

Además de la producción de combustibles gaseosos como el metano, el hidrógeno ofrece la posibilidad de sintetizar combustibles líquidos. Aunque este proceso tiene una eficiencia de ida y vuelta de sólo el 41%, ofrece la oportunidad de utilizar infraestructura crítica sin modificaciones, mientras descarboniza algunos sectores industriales. Un ejemplo de lo anterior es la aviación, que, debido a los cambios de presión de los aviones a diferentes alturas, se enfrentaría a dificultades para transportar combustible gaseoso. La síntesis de Jet fuel a partir de CO₂ capturado e hidrógeno verde permitiría la descarbonización del sector de la aviación, que contribuyó con 915 millones de toneladas de CO₂ a nivel mundial en 2019.

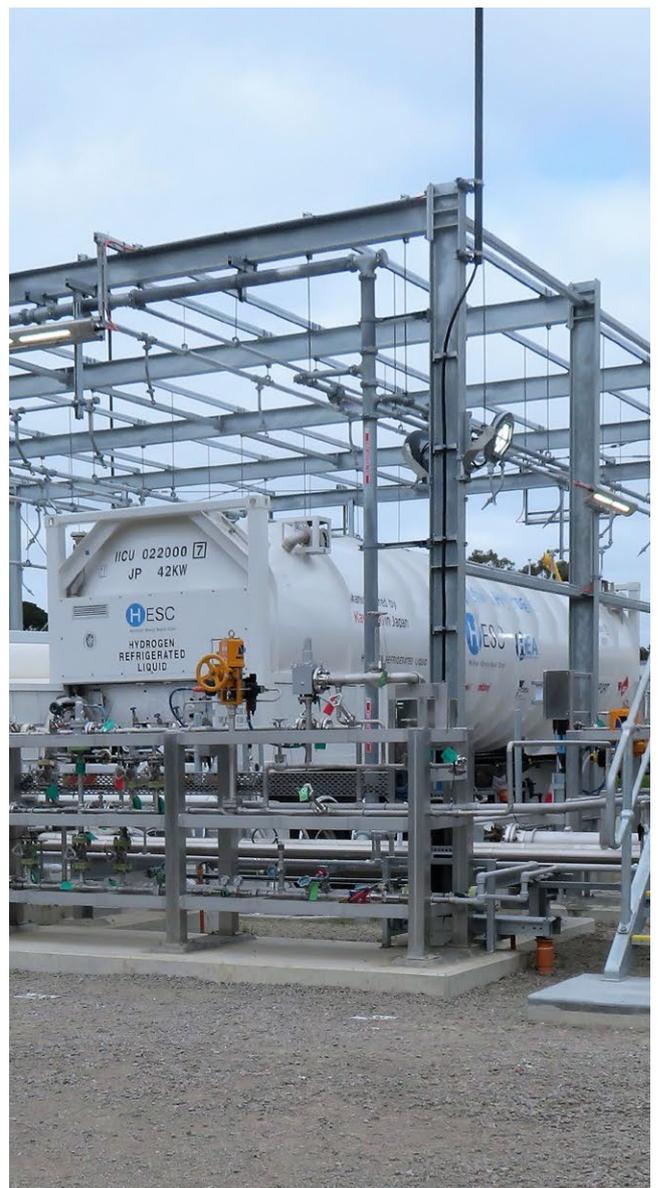
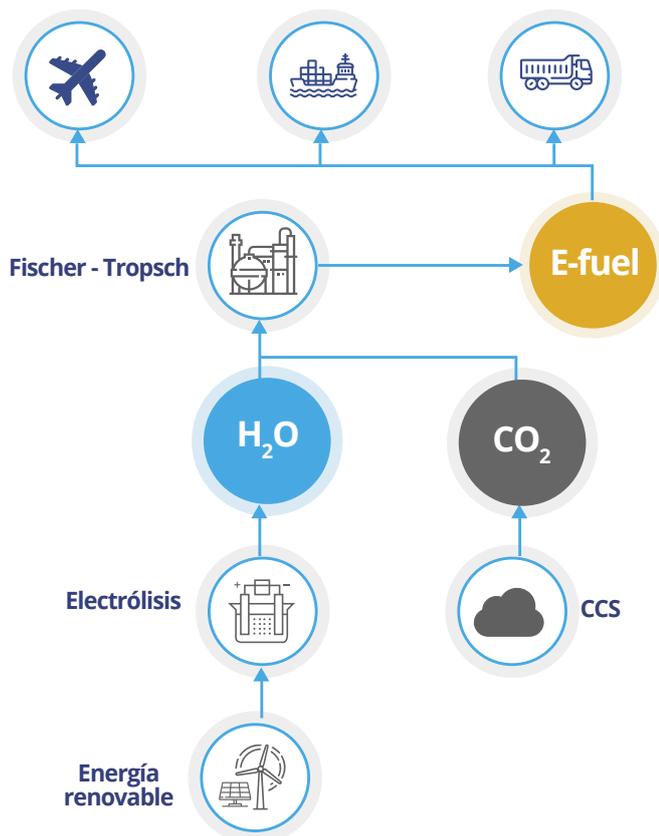
1.10 TRL y CRI de tecnologías del hidrógeno

Todas las tecnologías de hidrógeno que se han mencionado hasta ahora tienen diferentes niveles de madurez tecnológica. La NASA desarrolló una metodología para evaluar la madurez técnica de las nuevas tecnologías con una escala de 9 puntos.

Hinici desarrolló una escala de 5 niveles para evaluar la madurez comercial, asignando 5 a tecnologías que se han utilizado durante más de 10 años y 1 a la tecnología que acaba de salir del laboratorio y está empezando a probarse en proyectos piloto.

El siguiente gráfico muestra un esquema de TRL (Technology Readiness Level o Nivel de Madurez Tecnológica) y CRI (Commercial Readiness Level o Nivel de Adopción Tecnológica) del hidrógeno para diferentes aplicaciones.

Figura 1-26. Proceso Power-to-Liquids (Instituto Karlsruhe, 2019)





H₂

H₂ HYDROGEN POWER

CLEAN ENERGY OF THE FUTURE



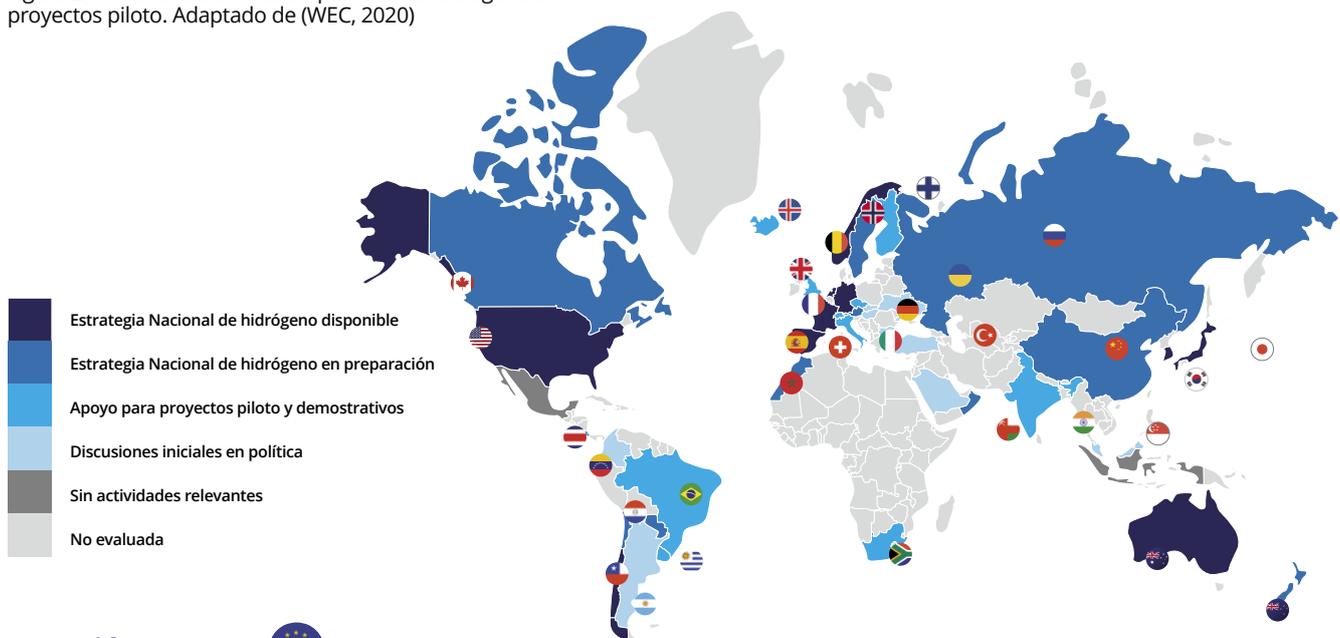
2. Antecedentes internacionales del hidrógeno como vehículo de descarbonización

Durante los últimos 5 años, el interés por las tecnologías de hidrógeno ha crecido exponencialmente. A septiembre de 2020, 19 países del mundo ya tienen una hoja de ruta o estrategia para desarrollar el hidrógeno verde. Algunos de ellos incluyen planes de cooperación internacional para la futura creación de mercados mundiales de hidrógeno.

Otros países están preparando hojas de ruta, al tiempo que promueven proyectos piloto para generar capacidades técnicas y establecer el mercado.

Hasta hace unos años, sólo la Unión Europea, Japón y Estados Unidos tenían planes para el hidrógeno; sin embargo, América Latina está tomando hoy un papel importante. Chile es el país líder en la región con proyectos piloto y una estrategia en desarrollo (que se publicó a finales de 2020). Otros estados como Costa Rica, Colombia, Uruguay y Argentina también están tomando medidas y preparando el desarrollo del hidrógeno verde.

Figura 2-1. Países desarrollando políticas de hidrógeno o proyectos piloto. Adaptado de (WEC, 2020)



2.1 Unión Europea

La Unión Europea ha sido el líder mundial indiscutible en la promoción y desarrollo de tecnologías de hidrógeno. En 2008, la Comisión Europea fundó la Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU), una asociación público-privada para el desarrollo del hidrógeno en la UE. Desde entonces, el FCH-JU ha invertido más de 2 billones de euros en múltiples proyectos.

En los últimos 12 años, se han emitido múltiples políticas de la Comisión Europea y de los gobiernos de los países. Los dos más relevantes hasta ahora son el European Green Deal (2019) y Estrategia Europea del Hidrógeno (2020).

El European Green Deal es un documento marco que proporciona un plan de acción para promover el desarrollo

sostenible y adoptar una economía circular en Europa para mitigar el cambio climático.

Dentro de este documento, el hidrógeno se identifica como un vector esencial de transición e integración de múltiples sectores. La Estrategia Europea del Hidrógeno proporciona un plan de acción para el H₂ en todas las aplicaciones descritas en la sección 1 de este documento.

Un ejemplo importante del compromiso de la UE con la adopción del hidrógeno verde es la creación de CertifHy, el primer sistema de garantía de origen del hidrógeno verde y bajo en emisiones de carbono en el mundo.

Los objetivos de CertifHy son:

| | |
|--|--|
| Cumplir con los objetivos de descarbonización | Crear un market pull para "Hidrógeno Premium" |
| Mejorar los casos de negocio de la producción de hidrógeno verde | Empoderar a los clientes y permitirles tomar decisiones informadas |

Figura 2-2. CertifHy, el primer esquema de garantía de origen para hidrógeno verde (Inicio, 2018)

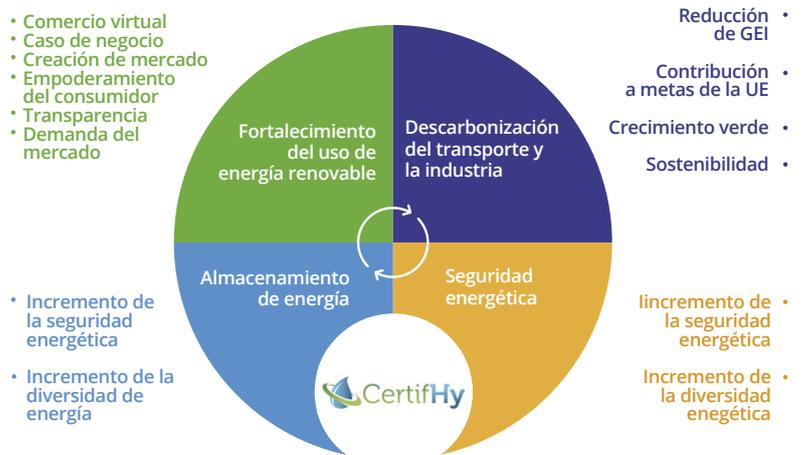


Tabla 3. Resumen de los incentivos al hidrógeno en la Unión Europea

| Sector | Tipo de política | Nombre y detalles de la política | Detalles |
|-----------------------|------------------|---|--|
| Transporte | Créditos | Directiva (UE) 2015/652 (2016) | Establecer los métodos para calcular la intensidad de GEI de los combustibles y el factor de eficiencia de los trenes de potencia a celda de combustible. |
| Transporte | Mandato | Directiva (UE) 2015/1513 (2015) | Definición y directrices del hidrógeno como combustible de transporte gaseoso, renovable y de origen no biológico. |
| Generación de energía | Regulación | Reglamento (UE) 2017/2195 de la Comisión (2017) | Establecer una directriz sobre el equilibrio de la electricidad, incluidas las tecnologías de hidrógeno, como opción para la integración de redes. |
| Intersectorial | Estrategia | European Green Deal (2019) | El European Green Deal proporciona un plan de acción para impulsar el uso eficiente de los recursos al transicionar hacia una economía circular, restaurar la biodiversidad y reducir la contaminación. El hidrógeno se describe como un instrumento clave para alcanzar objetivos energéticos clima-neutrales y seguros. |
| Intersectorial | Estrategia | Estrategia Europea del Hidrógeno (2020) | La Estrategia de Hidrógeno de la UE da un impulso a la producción limpia de hidrógeno en Europa y promueve su uso como materia prima, combustible o portador y almacenador de energía, así como muchas aplicaciones posibles que reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero en todos los sectores de la industria, el transporte, la energía y la construcción. El plan de recuperación económica de la Comisión "Next Generation EU" destaca el hidrógeno como una prioridad de inversión. |

Según la hoja de ruta para el despliegue del hidrógeno en Europa, el hidrógeno podría proporcionar hasta el 24 % de la demanda total de energía, o hasta 2.250 TWh, en la UE para 2050. Este despliegue proyectado de hidrógeno crearía una industria estimada en € 130 000 millones para hidrógeno y sus equipos asociados para empresas de la UE en 2030, alcanzando los € 820 000 millones en 2050.

La Comisión Europea ha creado un grupo informal de expertos, formado por representantes de los ministerios encargados de la política energética en los Estados

Miembro de la UE. Este grupo de expertos, llamado la Hydrogen Energy Network (HyENet), tiene como objetivo apoyar a las autoridades nacionales encargadas de la política energética en desarrollar las oportunidades que el hidrógeno ofrece como portador de energía.

En Europa, otro actor importante es Hydrogen Europe, una asociación que promueve el hidrógeno como facilitador de una sociedad de cero emisiones y cuenta con más de 120 miembros de la industria, con empresas de diversos tamaños.

Figura 2-3. Participación Europea en hidrógeno para 2050 (FCH-JU, 2019)



2.2 Alemania

Alemania ha demostrado un liderazgo notable como nación individual desarrollando y financiando proyectos de H₂ dentro de sus fronteras. También ha llevado a cabo muchos proyectos de colaboración con otros países.

Existen planes para la adopción del hidrógeno centrados en: movilidad, industria, uso residencial, generación de energía y proyectos power-to-x. Algunos aspectos destacados para estos sectores incluyen:

Sector residencial: desarrollo de proyectos piloto de CHP. Más de 5.000 instalados, con capacidades de 50 a 60 kW.

Sector transporte: con >600 FCEV circulando, > 15 autobuses de pasajeros, y > 75 estaciones de suministro de hidrógeno. Alemania ocupa el puesto 4 del mundo en infraestructura de reabastecimiento de combustible de H₂.

Sector industrial: con un consumo de 15 billones Nm³ /año de hidrógeno: Alemania tiene planes de descarbonizar su sector industrial con ayuda del hidrógeno.

Generación de electricidad: empresas alemanas como Siemens desarrollan turbinas que pueden utilizar H₂ para producir electricidad. Los desarrollos actuales permiten alimentar turbinas con hasta un 60% de hidrógeno.

Sector de generación de energía de respaldo: Alemania cuenta con más de 700 sistemas de celdas de combustible como UPS o como respaldo de su red de radio digital.

Power-to-x: Durante 2019, se planificaron más de 50 plantas power-to-gas con capacidad de 55 MW. El primer proyecto con una capacidad de 10 MW comenzará a funcionar a finales de 2020. El primer sistema de 100 MW fue anunciado por el operador Tennet. Aprovechará el potencial eléctrico del norte de Alemania para producir hidrógeno, principalmente a partir de energía eólica.

Tabla 4. Resumen de los incentivos al hidrógeno en Alemania

| Sector | Tipo de política | Nombre y detalles de la política | Detalles |
|----------------|------------------|--|--|
| Intersectorial | Estrategia | Crecimiento, cambio estructural y empleo | El hidrógeno verde y el power-to-gas se mencionan en una de las recomendaciones clave en el contexto de la creación de nuevas cadenas de valor para tecnologías innovadoras en las regiones afectadas por la eliminación gradual del carbón. El informe también enumera medidas y proyectos concretos en las diferentes regiones, varios de ellos vinculadas al hidrógeno. |

| Sector | Tipo de política | Nombre y detalles de la política | Detalles |
|----------------|--------------------------------|--|--|
| Transporte | Incentivo financiero | Apoyo financiero a los coches eléctricos | Otorga un subsidio de 4.000 euros. Para autos híbridos, asciende a 3.000 euros. Los beneficios son solo para autos con un precio de listado de máximo 60.000 EUR (modelo base). La promoción tiene una duración máxima de 400.000 coches. Esta promoción finaliza en 2020. |
| Transporte | Incentivos y metas financieras | NIP II call 2018 | Objetivos de estaciones de reabastecimiento de H ₂ : 100 para 2020, 400 para 2025. Subsidios para la construcción/instalación de estaciones de acceso público para el transporte por carretera. |
| Transporte | Incentivos y metas financieras | Programa Nacional de Innovación | Para 2021, habrá 14 trenes operando en Baja Sajonia. El NIP proporcionó apoyo financiero para el desarrollo y despliegue de trenes Alstom. |
| Intersectorial | Estrategia | Estrategia Nacional de Hidrógeno de Alemania | Es un documento que expresa el interés de Alemania por ser líder en tecnologías de hidrógeno. Identificar actores y dar forma a una estrategia para lograr la visión del país a través de 38 medidas en 8 sectores de desarrollo. |

Durante la década de 2010 se creó un ecosistema de desarrollo de hidrógeno en Alemania. En 2020, alcanzó un hito significativo con la publicación de la Estrategia Nacional de Hidrógeno. Este documento fue publicado junto con un anuncio de inversión de 9 billones de euros, de los cuales 7 billones se destinarán para el desarrollo del hidrógeno en Alemania y 2 billones para la cooperación internacional y ayudar a otras naciones a desarrollar capacidades.

La Estrategia Nacional de Hidrógeno de Alemania fue coordinada por el Ministerio de Energía del país y establece la visión de del país como un líder en la tecnología del hidrógeno. Además, reconoce la necesidad de que el país importe hidrógeno y propone acciones de cooperación con otras naciones que podrían ayudar a satisfacer las necesidades alemanas de hidrógeno.

Figura 2-4. Movilidad a hidrógeno en Alemania



La estrategia en resumen



Generalidades

- Publicado por el Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) el 10 de junio de 2020
- Alemania espera convertirse en el líder global en tecnologías de hidrógeno (y asegurar el mercado para industria internacionalmente reputado)
- El hidrógeno verde es considerado la única solución sostenible en el largo plazo. El hidrógeno bajo en carbono solo se utilizará en una base de transición
- Planea incrementar la capacidad de producción de hidrógeno a 5 GW para 2030 y 10GW para 2040.

Objetivos y ambiciones

- Asumir responsabilidad global
- Hacer competitivo al hidrógeno
- Desarrollar un mercado local para tecnología del hidrógeno en Alemania y sentar las bases para la importación
- Hacer del hidrógeno una materia prima para la industria sostenible
- Mejorar la infraestructura de transporte y distribución
- Apoyar la investigación y entrenar personal calificado
- Establecer mercados de hidrógeno internacionales y cooperación

Fondos para hidrógeno

- Se aprobó el futuro paquete para el Comité de Coalición el 3 de junio de 2020
- 7 billones de euros a hacerse disponibles para el crecimiento de mercado de las tecnologías de hidrógeno en Alemania
- 2 billones de euros para alianzas internacionales

2.3 Japón



Japón es posiblemente el país más entusiasta en la adopción del hidrógeno y sus aplicaciones. Al igual que Alemania, Japón reconoce que sus capacidades de producción serán limitadas, por lo que están dedicando un gran esfuerzo para convertirse en un productor de tecnología líder y generar un plan de acción para importar H₂ de diferentes países del mundo para abastecer sus equipos.

Desde 2017, Japón cuenta con una de las estrategias nacionales más ambiciosas de hidrógeno; establece la mayor cantidad de objetivos cuantitativos para la demanda de hidrógeno y la adopción de vehículos, sistemas CHP y otras tecnologías.

Hacia 2030, Japón planea desarrollar una cadena de suministro de hidrógeno comercial de alrededor de 300 mil toneladas de hidrógeno, a un costo de 3 USD /kg H₂ o menos. En cuanto a movilidad, su objetivo es la instalación de 900 estaciones de recarga de hidrógeno para abastecer a 800.000 vehículos, 1.200 autobuses y más de 10.000 montacargas.

Hacia 2050 las metas se vuelven aún más ambiciosas, buscando un costo de hidrógeno de 2 USD / kg o menos y un reemplazo total de la movilidad de combustión interna convencional por movilidad eléctrica con altas tasas de participación de FCEV.

Tabla 5. Resumen de los incentivos al hidrógeno en Japón

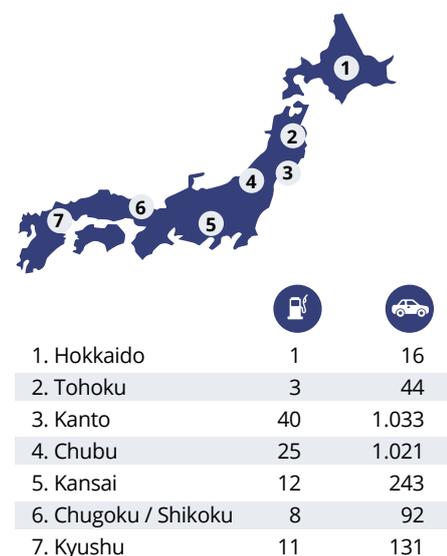
| Sector | Tipo de política | Nombre y detalles de la política | Detalles |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--|
| Producción | Objetivos + Incentivo financiero | Estrategia Básica de Hidrógeno (2017) | Adquirir 300.000 toneladas de hidrógeno/año para 2030. Reducir el costo del hidrógeno a JPY30/Nm ³ (para 2030) y JPY 20/Nm ³ (en el futuro). Subsidios para I+D y demostraciones. |
| Transporte | Objetivos + Incentivo financiero | Estrategia Básica de Hidrógeno (2017) | Objetivo de 40.000 FCEVs para 2020, escalado a 200.000 unidades para 2025 y 800.000 unidades para 2030. Subsidio para la compra. |
| Construcción | Objetivos + Incentivo financiero | Estrategia Básica de Hidrógeno (2017) | Celda de Combustible Residencial (micro-CHP: Ene Farm) 5,3 millones de unidades (en stock) para 2030. |
| Generación de energía | Objetivos + Incentivo financiero | (iniciativa del gobierno nacional) | Japón tiene como objetivo comercializar la generación de energía de hidrógeno, así como las cadenas internacionales de suministro de hidrógeno y reducir el costo unitario de generación de energía de hidrógeno a 17 yen/kWh (0.15 USD/kWh) alrededor de 2030. Subsidios para I+D y demostraciones. |

Japón aspira a contar con un sistema de suministro de hidrógeno libre de CO₂ para 2040. Este hidrógeno libre de CO₂ está planeado para provenir principalmente de lignito combinado con almacenamiento y captura de carbono (CCS) y energía renovable.

Hay incentivos gubernamentales otorgados no sólo a los consumidores finales (FCEV, FC residenciales), sino también a los desarrolladores de tecnología. Esto ha dado lugar a una rápida reducción de los costos asociados con la cadena de suministro de hidrógeno en Japón, por ejemplo, el programa de marketing de celdas de combustible más exitoso del mundo. ENE-FARM ha apoyado el despliegue de más de 120.000 unidades residenciales de pilas de combustible (2015).

Algunas de las empresas más grandes que ofrecen productos y servicios para la economía del hidrógeno son Toyota, Honda, Toshiba, Panasonic, Denso, Fuji, Hitachi y Mitsubishi.

Figura 2-5. Estado de la movilidad a hidrógeno en Japón (Inicio, 2020)



2.4 Estados Unidos (California)

California se ha distinguido como un estado de desarrollo tecnológico y con una profunda preocupación por el medio ambiente. Por lo tanto, no es de extrañar que sea el polo de desarrollo de hidrógeno de los Estados Unidos.

California cuenta con más de 480 sistemas estacionarios de celdas de combustible instalados, con más de 210 MW de capacidad de generación. Sin embargo, ha centrado sus esfuerzos en el sector de la movilidad más que en cualquier otra aplicación del hidrógeno. California es la región del mundo con la mayor cantidad de vehículos de celda de combustible por millón de personas. Ya hay 42 estaciones de recabastecimiento de hidrógeno (HRS, por sus siglas en inglés) instaladas para 2020 y más de 8.600 FCEV en las carreteras de California. En 2020, se esperaba una demanda de aproximadamente 9 toneladas de hidrógeno al día, sólo para el sector del transporte.

El compromiso californiano con el hidrógeno verde establece que todas las HRS deben utilizar al menos un 33% de hidrógeno renovable para 2020. El Estado ha proporcionado varios incentivos para el hidrógeno verde para lograr planes tan ambiciosos.

Tabla 6. Resumen de los incentivos al hidrógeno en los Estados Unidos

| FCEV | Proyectos H ₂ |
|---|---|
| <p>Proyecto de reembolso de vehículos limpios de California</p> <p>Compradores o arrendatarios de FCEV, BEV, PHEV y ZEM.</p> <ul style="list-style-type: none"> Reembolsos de hasta 5.000 USD por compra o alquiler | <p>Estándar de combustible bajo en carbono (Junta de Recursos del Aire de California)</p> <p>Proveedores de combustible de California.</p> <ul style="list-style-type: none"> Créditos de cumplimiento para proveedores, basados en la eficiencia de su combustible. Los créditos se monetizan comprando y vendiendo en un mercado activo. |
| <p>Calcomanía CAV (Clean Air Vehicle)</p> <p>Usuarios de ZEV, incluidos FCEVs.</p> <ul style="list-style-type: none"> Autoriza el uso de carriles para vehículos de alta ocupación a vehículos de un solo ocupante. | <p>Crédito para refinerías con hidrógeno renovable (programa piloto)</p> <p>Refinerías que utilizan hidrógeno verde en lugar de hidrógeno gris.</p> <ul style="list-style-type: none"> Créditos de cumplimiento para proveedores, basados en la cantidad de carbono en el hidrógeno que consumen. Créditos monetizables a través de la compraventa. |
| <p>Aparcamiento gratuito en hoteles participantes</p> <p>Usuarios de ZEVs.</p> <ul style="list-style-type: none"> Los hoteles participantes en CA ofrecen aparcamiento gratuito y/o libre de pago (EV y PHEV) en sus instalaciones. | <p>Estándar de combustible renovable</p> <p>Proveedores de combustible en todo el país (biocombustibles y combustibles renovables).</p> <ul style="list-style-type: none"> Ingresos de crédito para el suministro y venta de combustibles renovables. |

| FCEV | Proyectos H ₂ |
|--|--------------------------|
| <p>Estacionamiento gratuito en hoteles participantes</p> <p>Compradores o arrendatarios (individuales o empresas) de vehículos limpios en San Joaquín Valley, CA</p> <ul style="list-style-type: none"> Reembolsos de hasta 3.000 USD por la compra o alquiler de FCEV | |
| <p>Proyecto de Ley del Senado 1505</p> <p>Uso obligatorio del hidrógeno verde en las HRS, independientemente de su apoyo o subsidio.</p> <ul style="list-style-type: none"> El 33,3% del hidrógeno debe provenir de fuentes renovables | |

California tiene el objetivo de llegar a 200 estaciones de hidrógeno para 2025; y mil estaciones y un millón de FCEV para 2030. Las proyecciones actuales para el estado, proporcionadas por los fabricantes de FCEV, predicen 26.900 FCEV en 2022 y 48.000 FCEV en 2025.

Se espera que la red de suministro de hidrógeno de California siga cumpliendo con el requisito mínimo de energía renovable del 33%, con potencial para una mayor implementación renovable en el futuro. El programa de crédito Low Carbon Fuel Standard for Hydrogen Refueling Infrastructure requiere la implementación de hidrógeno 40% renovable.

Figura 2-6. Estado de la movilidad a hidrógeno en California (CaFCP, 2020)

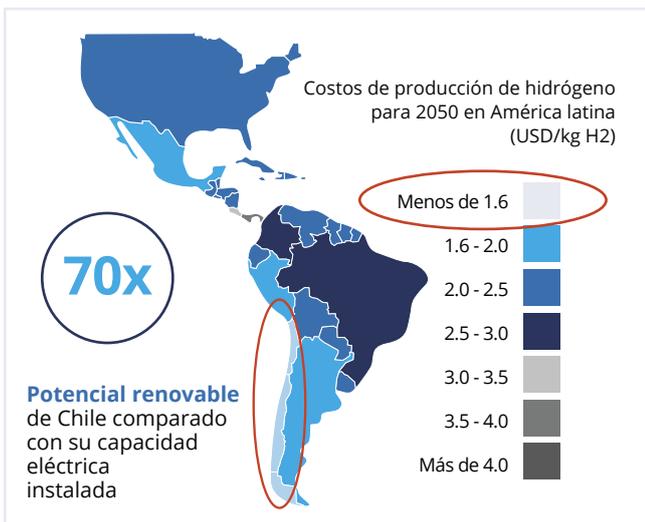


2.5 Chile

Chile es el líder latinoamericano en políticas de hidrógeno y desarrollo de proyectos. Desde 2018, el Ministerio de Energía ha estado muy activo en la organización de eventos para la transferencia de conocimiento, impulsando el desarrollo de la regulación y la legislación, realizando estudios y promoviendo el desarrollo de proyectos piloto.

Impulsado por su potencial de energía renovable, Chile ha desarrollado múltiples estudios para cuantificar su potencial, encontrando que para 2050 sus costos de producción de hidrógeno verde podrían estar entre los más bajos del mundo con menos de 1,6 USD/kg.

Figura 2-7. Potencial chileno de hidrógeno verde (Ministerio de Energía, Chile, 2020)



Chile tiene una política energética con ambiciosos objetivos de descarbonización desde 2015, incluyendo un objetivo para la producción renovable del 70% para 2050. Ha publicado una hoja de ruta para alcanzar sus objetivos, que apoyan la generación de la Estrategia Chilena del Hidrógeno.

Uno de los objetivos más notables de Chile es ser exportador de hidrógeno a Estados Unidos, Asia y Europa. Algunos de sus proyectos de hidrógeno verde más emblemáticos incluyen la planta de hidrógeno verde para explosivos mineros liderados por Engie y Enaex, o el proyecto Hydra, liderado por Engie y MINAE3 para el desarrollo de camiones mineros de celdas de combustible.

Chile, un país con una importante industria minera, ve el hidrógeno como la oportunidad de descarbonizar una de las industrias más exigentes energéticamente.

Figura 2-8. Contexto chileno para el desarrollo de la estrategia de hidrógeno

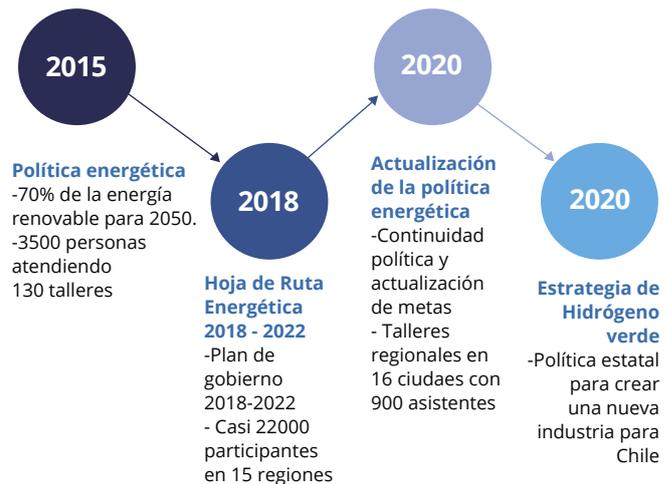


Tabla 7. Proyectos de hidrógeno verde en desarrollo en Chile

| | | |
|---|--|---|
|  | Engie y Enaex firmaron un acuerdo en 2019 para evaluar la viabilidad de una planta Power to Ammonia en Mejillones. Planta de hidrógeno (electrolizador de 800MW, 62000 ton H ₂ /año) y planta de amoníaco de 350,000 M ton/a NH ₃ . Se espera que la primera fase del proyecto inicie operaciones antes de 2025. |  |
|  | Proyecto piloto de producción de combustibles sintéticos en Magallanes. Lanzamiento oficial en octubre 2 (www.hif.cl) involucra a ENAP, ENEL, Siemens y Andes Mining and Energy (AME). |  |
|  | Proyecto piloto para un camión minero de combustión dual bajo un consorcio liderado por ALSET, con un presupuesto de CLP 12,000 MM (4,000 MM financiados por Corfo). Se espera que el camión prototipo inicie operaciones <i>in situ</i> en 2021. |  |
|  | Proyecto Hydra (2023): Proyecto para diseñar y manufacturar un prototipo de tren motriz para camión minero (CAEX) a celda de combustible a ser probado en condiciones de laboratorio que limiten la operación real del vehículo. |  |
|  | Walmart está implementando flotas de montacargas a hidrógeno en 3 de sus centro logísticos en Chile. Se espera que la primera flota entre en operación en 2021 con 180-200 vehículos. Proyecto desarrollado por Plug Power y Engie. |  |
|  | Piloto de hidrógeno verde (planta fotovoltaica), con una capacidad de producción de 2kg/día para operar a una grúa de montacarga. Desarrollado por Tractebel y Engie. |  |



3. Situación actual del hidrógeno en México

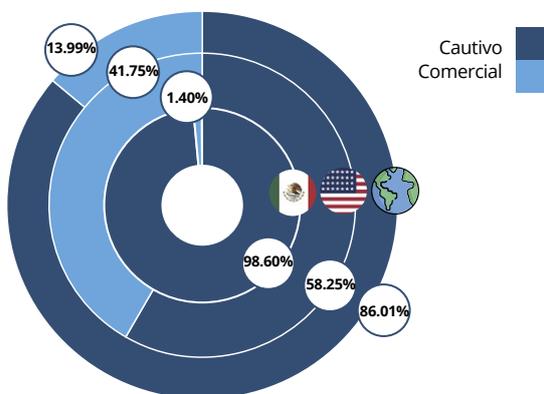
3.1 Mercado del hidrógeno en México

En México, ya existe un mercado de hidrógeno impulsado por la refinación y la petroquímica. A nivel mundial, el 86% del hidrógeno está cautivo y el 14% es comercial. En México, 98.6% del hidrógeno está cautivo, y sólo el 1,4% es comercial.

El hidrógeno cautivo en México es producido por PEMEX, con aproximadamente 218 kilo toneladas de H₂ para sus procesos de refinación y producción de amoníaco. La producción de hidrógeno de PEMEX se distribuye a través de sus 6 refinерías. El 42% se obtiene de plantas reformadoras de vapor y el 58% de lo reformado de nafta (producto intermedio del refino de petróleo crudo). Menos del 10% del hidrógeno de PEMEX está destinado a la producción de amoníaco. Las plantas de producción de amoníaco de PEMEX 2019 no funcionaron.

Hay un pequeño balance comercial internacional de hidrógeno en México, debido a la actividad de compañías privadas. De las 734 toneladas de hidrógeno al año en el mercado internacional mexicano, el 40% representa exportaciones principalmente a Centroamérica y el Caribe, y el 60% son importaciones de Estados Unidos. Las importaciones mexicanas de hidrógeno tienen que ver con tiempos de inactividad en plantas de gas o solicitudes imprevistas por parte de los clientes.

Figura 3-1. Comparación de la distribución de hidrógeno comercial y cautivo



La producción de hidrógeno comercial en México es de aproximadamente 2,650 toneladas por año, con virtualmente todo en manos de 3 empresas: Air Liquide, Linde y Cryo - Infra.

Figura 3-2. Capacidad de producción de hidrógeno de Pemex.

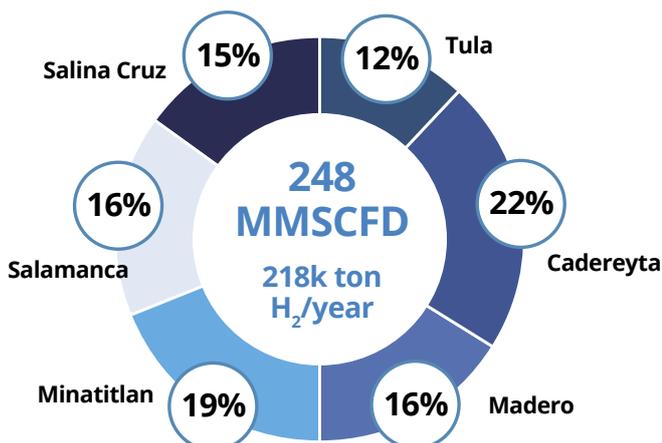


Figura 3-3. Mercado internacional de hidrógeno en México (Ministerio de Economía, 2019)

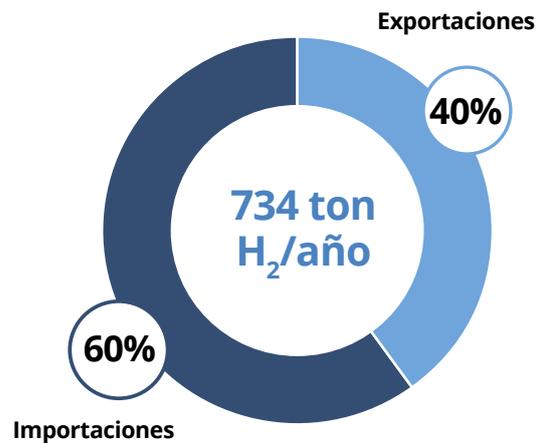
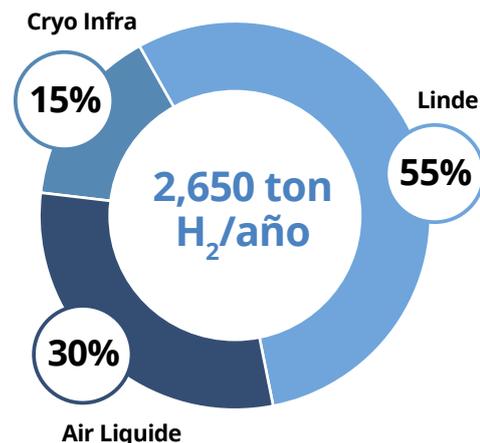
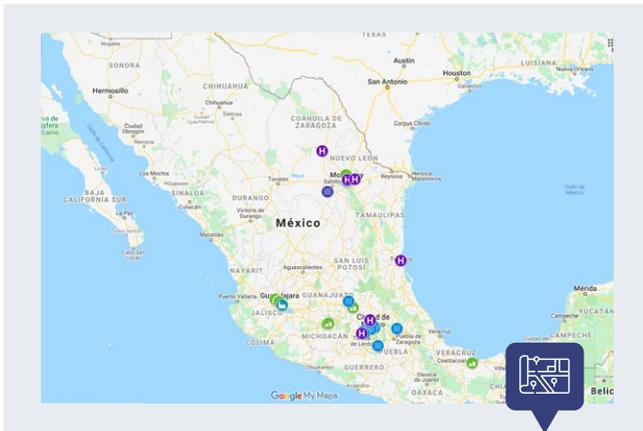


Figura 3-4. Producción de compañías de gas industrial en México (Fortuna, 2020)



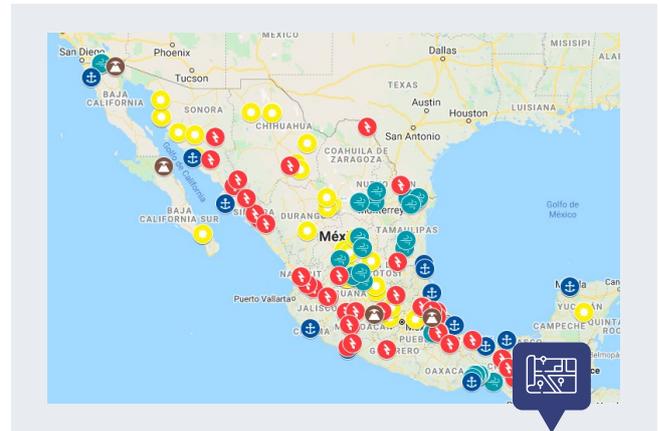
Actualmente, tanto la producción de hidrógeno cautiva como la comercial se encuentran en la zona central del país, cerca de sitios industriales (empresas productoras de acero, vidrio, grasas alimentarias, etc.).

Figura 3-5 – Principales productores y consumidores de hidrógeno en México



[Click para visitar](#) / Mapa interactivo del diagnóstico del hidrógeno verde en México

Figura 3-7 Infraestructura de energía renovable en México.



[Click para visitar](#) / Mapa interactivo del diagnóstico del hidrógeno verde en México

3.2 Consumidores potenciales de hidrógeno e infraestructura de energía renovable

La infraestructura energética en México coincide con la ubicación de potenciales consumidores futuros de hidrógeno, que están distribuidos homogéneamente en todo el país. Algunos de los potenciales consumidores de hidrógeno identificados son empresas de producción siderúrgica, minas de extracción con la mayor producción a nivel nacional, y las redes eléctricas de la península de Baja California y Yucatán. Un ejemplo de tal coincidencia entre la oferta y la demanda se puede ver en el municipio de Mulegé, que tiene un sistema eléctrico aislado, minas de cobre, potencial renovable significativo, y una región de generación geotérmica cercana.

Figura 3-6 – Potenciales consumidores de hidrógeno en México.



[Click para visitar](#) / Mapa interactivo del diagnóstico del hidrógeno verde en México

3.3 Producción académica

En México, hay muchos investigadores en diferentes universidades y centros de investigación que desarrollan tecnologías de hidrógeno. Se han identificado desarrollos y prototipos para la mayor parte de la cadena de valor del hidrógeno, desde la producción hasta las aplicaciones de consumo. A través de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno (SMH), se identificaron más de 10 grupos de investigación.

Cada año se presentan entre 100 y 130 artículos académicos sobre el tema en el congreso internacional de la SMH. Algunos de los grupos líderes en investigación del hidrógeno pertenecen al Instituto Politécnico Nacional (IPN), el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Centro De Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ) y el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

A continuación, se presenta un resumen de los trabajos de los grupos de investigación anteriores sobre temas relacionados al hidrógeno.

Tabla 8. Producción académica de hidrógeno en el INEEL

| Producción | Acondicionamiento | Almacenamiento | Transporte | Reacondicionamiento | Sistemas de consumo |
|--|--|-------------------------|-----------------------|---|---------------------|
| X | X | | | X | X |
| Departamento | Energía renovable | | Personas en el equipo | Ulises Cano-Castillo, Félix Loyola-Morales, J. Roberto Flores-Hernández, Lorena Albarrán-Sánchez, Tatiana Romero-Castañón, Manuel López-Pérez | |
| Descripción de la investigación | Es un grupo de RD&T que trabaja en tecnologías de H ₂ desde el año 2000. Cuenta con su propia tecnología PEMFC (pilas y sistemas MEA) y electrolisis PE (pilas MEA pequeñas). Han evolucionado en cuanto al desarrollo de proyectos para movilidad eléctrica utilizando tecnologías de H ₂ y otros sistemas de almacenamiento electroquímico para transporte con tracción totalmente eléctrica. La institución integró uno de los primeros sistemas de H ₂ verde (solar) en 2003. | | | | |
| Años en la línea de investigación | 20 años | Fuentes de financiación | | Proyectos gubernamentales y de la industria privada. | |
| Proyectos destacados | 3-4 proyectos representativos y su descripción. | | | | |
| Producciones científicas o tecnológicas destacadas de la investigación | <p>Producción de hidrógeno verde solar. En 2003, INEEL diseñó un sistema fotovoltaico para aprovechar el excedente de energía para alimentar un electrolizador de 1m³/hr de capacidad, específicamente bajo condiciones pico de energía fotovoltaica. El sistema fotovoltaico se conectó directamente al electrolizador, evitando electrónica de potencia costosa.</p> <p>Vehículo híbrido utilitario totalmente eléctrico de celda de combustible de hidrógeno Este proyecto reunió a 4 universidades más el INEEL para desarrollar, desde cero, un vehículo híbrido utilitario. La planta de energía fue integrada por una celda de combustible de hidrógeno PEM de 3kW desarrollada por el INEEL, un vehículo diseñado y fabricado por CIMAITESM y electrónica de potencia de CENIDET. El proyecto desarrolló un vehículo utilitario con un sistema de tracción eléctrica basado en el sistema PEMFC del INEEL, baterías de iones de litio y supercapacitores. El enfoque se centró en la eficiencia energética aprovechando configuraciones híbridas y utilizando frenado regenerativo. El vehículo, su control, algunos aparatos electrónicos de potencia y la central eléctrica de PEMFC (INEEL) fueron desarrollados en México por participantes.</p> <p>Extensor de alcance basado en PEMFC para un vehículo GRT. El proyecto exploró y propuso un extensor de alcance basado en una celda de combustible para un vehículo eléctrico de transporte rápido de pasajeros desarrollado por una empresa mexicana. La configuración propuesta añadió la posibilidad de entregar energía del PEMFC, así como de las baterías, ampliando la funcionalidad de la planta de energía PEMFC desde el extensor de alcance hasta una configuración eléctrica híbrida que da flexibilidad a la operación del vehículo.</p> | | | | |
| Número de profesionales formados en el grupo de investigación | El INEEL recibe a muchos estudiantes para cumplir con su trabajo experimental en tecnologías en las que son expertos. La mayoría de los proyectos no requieren realizar trabajo de tesis, ya que están abiertos a todos los niveles de educación, desde la escuela secundaria hasta los posgrados. Aproximadamente han recibido más de 100 estudiantes desde la fundación del grupo. Algunos de sus estudiantes ahora forman parte de organizaciones internacionales que trabajan en tecnologías relacionadas con el hidrógeno en Canadá, Estados Unidos, Reino Unido, Suiza y Alemania. | | | | |



Tabla 9. Producción académica sobre hidrógeno en el IPN

| Producción | Acondicionamiento | Almacenamiento | Transporte | Reacondicionamiento | Sistemas de consumo |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--|---------------------|
| X | X | | | | |
| Departamento | Instituto Politécnico Nacional-ESIQIE | | Personas en el equipo | 10 investigadores permanentes | |
| Descripción de la investigación | Desarrollo de tecnologías de hidrógeno, gestión de energías renovables (solar, eólica, oceánica) y sistemas de almacenamiento. Síntesis y caracterización de electrocatalizadores y preparación de conjuntos de membranas de electrodos (MEA) para celdas de combustible y electrolizadores PEM. Desarrollo de reactores alcalinos para combustión dual hidrógeno - fósil. | | | | |
| Años en la línea de investigación | 15 años para el grupo consolidado | Fuentes de financiación | | Proyectos internos del IPN, instituciones gubernamentales (CONACYT, SECTEI). | |
| Proyectos destacados | Desarrollo de energía solar-hidrógeno doméstica sostenible con gestión energética. Sistemas integrales híbridos de hidrógeno. Diseño de electrolizadores alcalinos para la integración en motores diésel o de gasolina para reducir la emisión de contaminantes. Innovación y fabricación de quemadores para combustión de hidrógeno y ahorro de gas natural en hornos. Estudio cinético de la reacción de reducción de oxígeno y el rendimiento de las celdas de combustible PEM. | | | | |
| Producciones científicas o tecnológicas destacadas | Artículos JCR: 50. Derechos de autor: 2 patentes asignadas; 2 marcas registradas y 3 diseños industriales asignados. Libros: 3 sobre tecnologías de hidrógeno. Editores de 2 libros sobre tecnologías de hidrógeno. | | | | |
| Número de profesionales formados en el grupo de investigación | Recursos Humanos: 37 estudiantes de pregrado, 20 de maestría y 4 de doctorado, 2 premios a mejor tesis de grado y 5 de máster. Un post doctorado ha trabajado en el grupo. En proceso (2020): 8 doctorados, 8 másteres y 6 estudiantes de pregrado. | | | | |



Tabla 10. Producción académica sobre hidrógeno en el CINVESTAV

| Producción | Acondicionamiento | Almacenamiento | Transporte | Reacondicionamiento | Sistemas de consumo |
|---|--|----------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------|
| X | X | | | | |
| Departamento | Departamento de Química | | Personas en el equipo | 18 investigadores permanentes | |
| Descripción de la investigación | Electrocatalisis y celdas de combustible: Síntesis y caracterización de catalizadores con bajo contenido de platino para aplicaciones de celdas de combustible PEM. Diseño y fabricación de transporte híbrido con PEMFCs y baterías recargables. | | | | |
| Años en la línea de investigación | 25 años | | Fuentes de financiación | CONACyT (Presupuesto nacional) | |
| Proyectos destacados | i) Mexican contributions for the improvement of electrocatalytic properties for the oxygen reduction reaction in PEM fuel cells. <i>Int. J. Hydrogen Energy</i> , 44(2019) 12477-12491. ii). Chapter 6 Development and applications of portable systems based on conventional PEM fuel cells, in <i>Portable hydrogen energy systems: Fuel cell and storage fundamentals and applications</i> . Paloma Ferreira-Aparicio and Antonio M. Chaparro Eds. Academic Press. Pp 91-106, 2018. ISBN 978-0-12-813128-2. Más de 170 artículos científicos. | | | | |
| Número de profesionales formados en el grupo de investigación | 19 PhD en aplicaciones energéticas de H ₂ ; Electrocatalisis y celdas de combustible. | | | | |



Tabla 11. Producción académica en hidrógeno en el Instituto de Materiales – UNAM

| Producción | Acondicionamiento | Almacenamiento | Transporte | Reacondicionamiento | Sistemas de consumo |
|---|--|----------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|
| | | X | | | |
| Departamento | Instituto de Investigación de Materiales- Unidad de Morelia | | Personas en el equipo | 2 investigadores permanentes | |
| Descripción de la investigación | Desarrollo de materiales para el almacenamiento de hidrógeno. Desarrollo de aparatos para el almacenamiento de hidrógeno. | | | | |
| Años en la línea de investigación | 25 años | | Fuentes de financiación | CONACyT, SENER | |
| Proyectos destacados | <ul style="list-style-type: none"> -NaAlH₄ de latas de Al / NaH recicladas (tanque de ~ 250g de material) -Desarrollo de aparatos para caracterización del almacenamiento de hidrógeno -Desarrollo de tanques de almacenamiento de hidrógeno llenos de hidruros metálicos y alanato de sodio. | | | | |
| Producciones científicas o tecnológicas destacadas | <ul style="list-style-type: none"> -Alanates, a Comprehensive Review. Materials 2019, 12, 2724; doi:10.3390/ma12172724 -From the can to the tank: NaAlH₄ from recycled aluminum. Int. J. Hydrogen Energy, 2019, 44, 20183–20190. DOI: /10.1016/j.ijhydene.2019.06.033. -Low-cost Sieverts-type apparatus for the study of hydriding/dehydriding reactions. HardwareX, 2018, 4, e00036–14. DOI: 10.1016/j.ohx.2018.e00036. -Solicitud de patente: Producción de Na₃AlH₆ y NaAlH₄ como materiales almacenadores de hidrógeno a partir de NaH, Al reciclado proveniente de latas de bebidas. En trámite, MX/a/2019/002891, 13-Mar-19. | | | | |
| Número de profesionales formados en el grupo de investigación | Licenciados: 7; Másters: 1; Doctorado: 2 (en curso). | | | | |

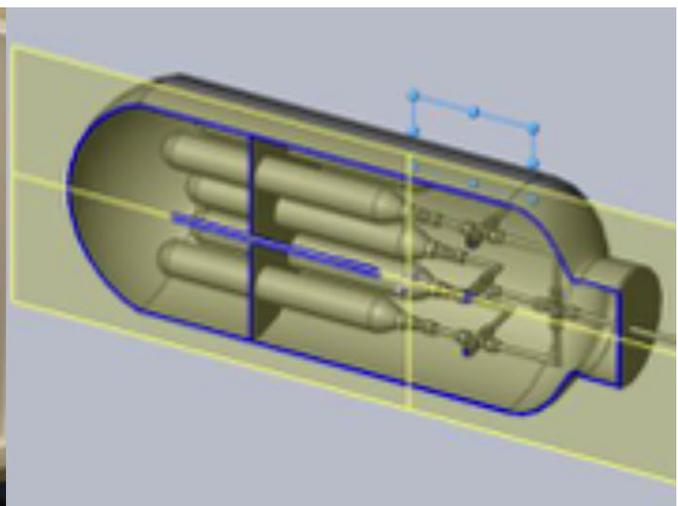


Tabla 12. Producción académica de hidrógeno en el Instituto de Ingeniería UNAM

| Producción | Acondicionamiento | Almacenamiento | Transporte | Reacondicionamiento | Sistemas de consumo |
|---|---|----------------|-------------------------|---|---------------------|
| X | | | | | |
| Departamento | Unidad Académica, Juriquilla Querétaro | | Personas en el equipo | 12 investigadores permanentes | |
| Descripción de la investigación | Enfocado en procesos biológicos para aguas residuales y fracción orgánica de tratamiento de residuos sólidos. Generación gaseosa de biocombustibles (hidrógeno, metano) y productos de valor añadido. | | | | |
| Años en la línea de investigación | 25 años | | Fuentes de financiación | CONACYT, Unión Europea, UNAM, SENER, Empresas privadas. | |
| Proyectos destacados | Clúster de biocombustibles gaseosos. Proyecto financiado por el Fondo de Sustentabilidad Energética Producción de biohidrógeno a través de fermentación oscura y fotofermentación Producción de biohidrógeno a través de sistemas bioelectroquímicos. | | | | |
| Producciones científicas o tecnológicas destacadas | Alrededor de 250 artículos internacionales en revistas científicas de alto rango (ISI-JCR), 5 patentes y más de 500 publicaciones diversas. | | | | |
| Número de profesionales formados en el grupo de investigación | Alrededor de 50 licenciados, 100 másters, 25 doctores y 15 post doctores han obtenido su grado dentro del grupo. | | | | |



Tabla 13. Producción académica de hidrógeno en el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)

| Producción | Acondicionamiento | Almacenamiento | Transporte | Reacondicionamiento | Sistemas de consumo |
|---|--|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------|
| X | | | | | X |
| Departamento | Departamento de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). | | Personas en el equipo | 10 investigadores permanentes | |
| Descripción de la investigación | Bioenergía, sistemas híbridos de energía, tecnologías electroquímicas para energía. | | | | |
| Años en la línea de investigación | 10 años | Fuentes de financiación | | Convocatorias del Gobierno, industria | |
| Proyectos destacados | Celdas de combustible con arquitecturas novedosas para el suministro de aire y combustible sin necesidad de servicios auxiliares. Producción de hidrógeno con sistemas de electrólisis por membrana de intercambio iónico. Simulación numérica para determinar el efecto de la entropía topológica en el coeficiente de transporte eficaz de los compuestos unidireccionales Biocarbón activado por KOH derivado de algas marinas para aplicaciones de reducción de oxígeno electrocatalítica y supercapacitores. | | | | |
| Producciones científicas o tecnológicas destacadas | 209 artículos científicos (JCR), 6 patentes. | | | | |
| Número de profesionales formados en el grupo de investigación | 71 máster en ciencias, 20 PhD. | | | | |



3.4 Marco Regulatorio Mexicano para el Hidrógeno

El marco regulatorio mexicano está compuesto por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, trece leyes federales, 7 reglamentos, 7 lineamientos, bases de un mercado eléctrico, 4 disposiciones y criterios adicionales para los documentos enumerados.

Dentro de este marco regulatorio, el hidrógeno se menciona en algunos documentos, de la siguiente manera:



Ley de la Industria Eléctrica

| Última actualización | El hidrógeno se menciona en: | La mención dice: |
|---|---|---|
|  03-Mar-2021 |  <ul style="list-style-type: none"> - Artículo 3 - Numeral XXII - Energía limpia - Opción (g) | (Se considera como una energía limpia): La energía generada por el uso de hidrógeno a través de su combustión o su uso en pilas de combustible, siempre y cuando la eficiencia mínima establecida por la CRE y los criterios de emisión establecidos por la SEMARNAT en su ciclo de vida. |

Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios

| Última actualización | El hidrógeno se menciona en: | La mención dice: |
|---|---|--|
|  07-Feb-2020 |  <ul style="list-style-type: none"> - Bioenergía - 6.1.2 Energía limpia - 6.1 Rutas de acción estratégica - 6. Objetivos de generación de energía limpia | (Tabla 19): Principales tecnologías eficientes para el uso de bioenergía: Gasificación de biomasa (Baja TRL y adopción nula en México) |

Programa Sectorial de Energía

| Última actualización | El hidrógeno se menciona en: | La mención dice: |
|---|---|--|
|  08-Jul-2020 |  <ul style="list-style-type: none"> - 6. Fortalecer el sector energético nacional para promover el desarrollo - 6.6 Pertinencia del objetivo prioritario | Aprovechar, de manera sostenible, todos los recursos energéticos de la Nación... Además, explorar el uso de otras fuentes de energía, como el hidrógeno. |

Directrices para la emisión y adquisición de CELs

| Última actualización | El hidrógeno se menciona en: | La mención dice: |
|---|--|--|
|  21-Ene-2019 |  <ul style="list-style-type: none"> - Punto 14 del acuerdo - Título 6° - Caso IV | Energía producida por el uso de hidrógeno a través de su combustión o su uso en celdas de combustible, siempre y cuando se cumpla con la eficiencia mínima establecida por el CRE y los criterios de emisión establecidos por la SEMARNAT en su ciclo de vida. |

Figura 3-8. Marco regulatorio energético mexicano.



Todas las menciones al hidrógeno en el marco regulatorio mexicano identificaron el hidrógeno como una posibilidad para valorizar el biogás, o como un vector de energía independiente cuando el hidrógeno se obtiene como subproducto. El hidrógeno puede incluso acceder a la emisión de certificados de energía limpia; sin embargo, no hay una definición formal de este gas como una molécula de energía. No hay planes de adopción ni incentivos para las tecnologías del hidrógeno.

Más allá de las referencias explícitas al hidrógeno dentro de las leyes y regulaciones, el marco regulatorio mexicano ofrece posibilidades para la producción y uso de hidrógeno dentro del país, que actualmente es utilizado por los productores privados de este gas. Las normas y leyes de referencia para las principales etapas de la cadena de valor del hidrógeno se identifican a continuación.

- Producción:** Si la producción de hidrógeno implica el consumo de gas natural (plantas de reformado), se deberán obtener permisos para su procesamiento, transporte, almacenamiento o manipulación (según corresponda) por parte de la Comisión Reguladora de Energía, cuyos criterios de otorgamiento se estipulan en la Ley de Hidrocarburos.

Si el hidrógeno se va a producir mediante electrólisis, los permisos necesarios son los que normalmente se solicitan para una planta química, por ejemplo: Manifestaciones de Impacto Ambiental (Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental - SEMARNAT), permisos de operación y registro de actividades (Secretaría de Economía) y cumplimiento de las Normas

- Oficiales Mexicanas de la actividad, por ejemplo, NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas, NOM-002-STPS-2010 Prevención y protección contra incendios, NOM-005- STPS-1998 Manejo, transporte y almacenamiento de sustancias peligrosas, NOM-020-STPS-2011 Recipientes a presión y calderas.
- En caso de que el proyecto considere la instalación de una central eléctrica para alimentar los electrolizadores es necesaria la obtención de un permiso de generación de la CRE, independientemente de si este se conecta o no a la red.
- Acondicionamiento y manipulación:** El acondicionamiento y manipulación de hidrógeno es algo que las empresas de gas realizan en la actualidad de acuerdo con la normativa de seguridad ocupacional de México (STPS) y algunas normas técnicas de Estados Unidos como la Norma ASME B31.12 para Tuberías de Hidrógeno y Ductos o NFPA Código 2 - Tecnologías de hidrógeno. No se requieren permisos especiales de las entidades reguladoras de energía de México para estas actividades.
- Transporte:** El transporte terrestre de hidrógeno está regulado por el "Reglamento para el transporte terrestre de materiales peligrosos y residuos peligrosos" (SCT), que no hace mención específica al hidrógeno, pero que su descripción se incluye en la "Clase 2, el cual incluye gases comprimidos, refrigerados, licuados o disueltos a presión ", división 2.1" Gases inflamables: Sustancias que a 20 ° C y una presión normal de 101,3 kPa se queman cuando se encuentran en una mezcla del 13% o menos en volumen de aire "

El transporte de hidrógeno por ductos en México no se practica actualmente, pero podría depender de permisos de la Comisión Reguladora de Energía y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (análisis de impacto ambiental y permisos de paso).

- **Uso en generación de energía:** La generación de energía eléctrica por combustión (turbinas) o celdas de combustible (proceso electroquímico) está contemplada por la Ley de la Industria Eléctrica y su Reglamento, siempre que el proceso cumpla con los requisitos técnicos de la CRE (la eficiencia mínima de no será inferior al 70% del poder calorífico de los combustibles utilizados en la producción de dicho hidrógeno), la cual es una aplicación de la Guía para la Evaluación de Nuevas Tecnologías y su Formulario de Aplicación (SENER). En el caso de un generador de energía, para ser conectado a una red eléctrica, el sistema de energía debe cumplir con los lineamientos del "Manual de Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga". En caso de que la autoridad reguladora (CENACE) considere que el equipo no ha sido suficientemente probado en campo en su país de origen o en México, podría exigir pruebas de desempeño, realizadas por laboratorios autorizados, como LAPEM, de la CFE.

En caso de que el hidrógeno se utilice para generación en una nueva central eléctrica, ya sea a través de combustión o celdas de combustible, también sería necesario presentar una Evaluación de Impacto Social a la SENER.

- **Uso como químico:** Actualmente, el uso de hidrógeno como materia prima es una práctica común en México. Las plantas de margarina, vidrio, acero y resinas sintéticas manipulan y consumen hidrógeno para sus procesos. La normativa que debe cumplirse en este caso ya ha sido descrita en los apartados de producción, almacenamiento y manipulación y transporte. Son reglamentos técnicos. No existen regulaciones específicas que controlen el mercado del hidrógeno en México; hasta ahora se considera una sustancia química dentro de un mercado de libre competencia.

- **Uso en aplicaciones de movilidad:** la movilidad del hidrógeno es en realidad una categoría de movilidad eléctrica. El FCEV se mueve mediante motores eléctricos que funcionan con una celda de combustible de hidrógeno, en lugar de una batería. Considerando esto, su base legal se encuentra en la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética. Esta estrategia identifica la necesidad de promover el uso de vehículos híbridos y eléctricos con tecnologías eficientes, entre los que se podrían incluir los FCEV.

Para ser legal en México, un vehículo debe estar registrado en el Registro Público Vehicular (REPUVE). Para conseguir el registro es necesario cumplir con algunas normativas en cuanto a:

- **Emisiones:** (NOM-044-SEMARNAT-2017, NOM-167-SEMARNAT-2017, entre otras, según combustible y tipo de vehículo) que no aplicaría en el caso de un vehículo eléctrico.
- **Funciones de seguridad:** NOM-194-SCFI-2015, Dispositivos de seguridad esenciales en vehículos nuevos - Especificaciones de seguridad.
- **Homologación:** Realizada por laboratorios nacionales o internacionales certificados a tal efecto en diferentes directivas como el marco CE para los diferentes tipos de vehículos (coches, autobuses, camiones, remolques, motos, etc.)

Se han identificado algunas acciones necesarias para la consideración de la energía de hidrógeno verde (sin incluir ningún incentivo) en el marco regulatorio mexicano:

- Definición explícita del hidrógeno como molécula de energía e identificación de sus posibles fuentes y aplicaciones. La definición podría incluirse en leyes o regulaciones.
- Definir, dentro de las leyes o regulaciones, las capacidades del Estado y las empresas privadas para la producción, transporte, almacenamiento y consumo de hidrógeno como vector de energía.
- Diferenciar responsabilidades y requisitos de cumplimiento para los usuarios de hidrógeno verde con fines energéticos o como materia prima industrial.
- Incluir la cadena de valor del hidrógeno verde (y no sólo algunas aplicaciones aisladas) en los mecanismos de Certificados de Energía Limpia, las normas del Mercado Nacional de Electricidad y otras directrices técnico-legales.
- Definir los requisitos legales (permisos, participantes permitidos, volúmenes de energía, condiciones para la conexión, etc.) para el acoplamiento de plantas de producción de hidrógeno a plantas de generación renovable o a la red eléctrica.
- Definir los requisitos legales (permisos, participantes permitidos, volúmenes de energía, condiciones para la conexión, etc.) para el acoplamiento de los sistemas Power to Power al Sistema Eléctrico Nacional.
- Crear regulaciones técnicas y de seguridad para plantas, sistemas y equipos en toda la cadena de valor de hidrógeno verde (electrolizadores, celdas de combustible, equipos de equilibrio de plantas, tuberías, camiones, etc.)

3.5 Esfuerzos comerciales

México tiene oficinas de muchas empresas internacionales que desarrollan proyectos de hidrógeno verde en Europa, Estados Unidos y otras latitudes; sin embargo, no se ha identificado prácticamente ningún esfuerzo para promover estas tecnologías en México.

Se identificaron dos empresas con planes para desarrollar proyectos de H₂ en México (ambos todavía están en la etapa de conceptualización). A continuación se muestra un resumen de estos proyectos.

HDF, Energía los Cabos

- Planta de generación fotovoltaica acoplada a un sistema Power to Power.
- El sistema Power to Power incluye un electrolizador, tanques de almacenamiento de hidrógeno y una celda de combustible para reelegir el hidrógeno almacenado.
- También se incluyen baterías de litio para gestionar y amortiguar las fluctuaciones energéticas. Energía Los Cabos producirá 22MW durante el día y 6MW durante la noche.
- La producción anual de energía será de 115 GWh, equivalente al consumo de energía de 60000 personas.

Figura 3-9 HDF – Energía Los Cabos, proyecto Power to Power.



Dhamma Energy

- Desarrollo, construcción y operación de una planta de producción de hidrógeno utilizando electrólisis de agua y energía fotovoltaica (PV).
- Una planta solar fotovoltaica alimenta un electrolizador que divide moléculas de agua en hidrógeno y gases de oxígeno.
- Off-takers de hidrógeno: Movilidad eléctrica (vehículos de pasajeros, autobuses, barcos, trenes, etc.) e industria (cemento, refinerías, fabricantes de acero, etc.)

Figura 3-10 Dhamma Energy - H₂ Guanajuato - Proyecto Power to Hydrogen

Solar PV + H₂ Plant

- Área: **220 ha**
- Capacidad solar PV: **120 MWac**
- Capacidad de electrólisis: **100 MWac**
- Producción anual de hidrógeno: **12.6 k ton H₂**
- Reducción de Emisiones GEI: **110,000 tCO₂/año**
- Ubicación: **Guanajuato**
- Off-takers: **movilidad e industria**
- Listo para construcción: **Q2-2022**
- Construcción: **2023**





eH₂

350bar
BUS

Energie Euro
Abgabe kg
Messanlage mit Fernanzeige

VATTENFALL



4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones sobre el contexto global para el hidrógeno

Las tecnologías de hidrógeno se han desarrollado desde la década de 1960, cuando la NASA probó la propulsión a hidrógeno. Desde entonces, muchas tecnologías de H₂ han evolucionado y alcanzando la madurez técnica necesaria para estar disponibles comercialmente hoy, por ejemplo, las FCEV.

El hidrógeno no es una fuente de energía; es un integrador de sectores y un búfer de intermitencia de energía renovable que proporciona energía confiable para procesos críticos y continuos.

Hasta el mes de julio de 2021, más de 20 países (que acumulan más del 44% del PIB mundial*) han publicado una hoja de ruta o estrategia para promover e integrar hidrógeno en sus sistemas energéticos. A nivel latinoamericano, Chile presentará su estrategia a finales de 2020.

Los países que impulsan las tecnologías de hidrógeno tienen en común una o más de las siguientes características:

- Planes de descarbonización ambiciosos (acuerdos políticos)
- Necesidad de independencia energética (aplicable a México)
- Necesidad de diversificación del suministro energético (aplicable a México)
- Necesidad de flexibilidad en la red al tiempo que se introducen las energías renovables aplicable a México)
- Planes para el desarrollo de nuevas cadenas de valor en el sector energético
- Planes para una recuperación verde de la economía

Países con alto potencial de energía renovable, como Chile, Marruecos y Australia, planean ser enormes exportadores de hidrógeno para abastecer a los adoptantes del H₂ como Japón, Corea del Sur o la Unión Europea.

Algunas tecnologías de hidrógeno, como turbinas, quemadores y sistemas de co-generación, todavía están en desarrollo. Otras tecnologías como las FCEV y los electrolizadores necesitan ser producidas a gran escala para lograr reducciones de costos.

Las cadenas de valor del hidrógeno son diversas, con múltiples vías de producción y entrega. La magnitud de los volúmenes de hidrógeno también varía según cada aplicación, por lo que es necesario analizar caso por caso las aplicaciones de uso y los modelos de negocio.

Cada aplicación de hidrógeno compite contra diferentes tecnologías convencionales, por lo que su competitividad económica depende de factores locales como la ubicación, la disponibilidad de recursos, las regulaciones, etc.

Los estados más avanzados en la carrera mundial del hidrógeno son Japón, la UE, Alemania, California y Corea del Sur. Todos ellos tienen en común un profundo interés por descarbonizar su matriz energética y mitigar los efectos del cambio climático, la necesidad de seguridad energética y el interés por crear nuevas cadenas de valor en el sector energético.

Sólo el hidrógeno verde permitiría una descarbonización completa del sistema energético mundial. Sin embargo, muchos países también están considerando una transición basada en hidrógeno azul para reducir los costos y poner en marcha las nuevas cadenas de valor del hidrógeno.

Desde la década de 1990, muchas economías fuertes como la Unión Europea, Japón o los Estados Unidos han financiado programas para el desarrollo de tecnologías y proyectos de demostración; han costeado una buena proporción de la curva de aprendizaje. Los países latinoamericanos que hoy entran en el negocio no tendrán una curva de aprendizaje tan pronunciada. Sin embargo, si los países latinoamericanos siguen rezagados, perderán la oportunidad de desarrollar capacidades, lo que resultará en una menor cuota de mercado en los futuros mercados mundiales de energía.

La Estrategia o Hoja de Ruta del Hidrógeno de cada país responde a su contexto específico y planes nacionales de desarrollo. No obstante, en la mayoría de ellas se expresan ideas comunes:

- El hidrógeno es claramente reconocido como un elemento esencial de un sistema energético descarbonizado.
- El potencial de energía renovable guía la decisión: ser exportador de hidrógeno, importador o autosuficiente.
- Las grandes asociaciones industriales serán esenciales para la producción, exportación e importación de hidrógeno.
- Las medidas actuales son insuficientes para catalizar el fuerte crecimiento previsto.
- Las políticas deben centrarse en la comercialización.
- La aceptación pública es clave.

4.2 Conclusiones sobre el contexto mexicano del hidrógeno

México ya tiene un mercado de hidrógeno que representa el 0,3% del mercado global (70 MM de toneladas en 2019). Todo ello es hidrógeno gris por ahora. Este hidrógeno se suministra principalmente a refinerías, pero también a plantas químicas y de producción de acero.

Todavía no hay evidencia de producción de hidrógeno verde en México. Para que este mercado se desarrolle, es necesario establecer las políticas adecuadas.

México tiene una infraestructura energética bien desarrollada que efectivamente podría permitir el desarrollo del hidrógeno verde. Además, cuenta con una serie de puertos marítimos internacionales, sólidas redes de transmisión de energía y gas, y plantas hidroeléctricas, fotovoltaicas, eólicas y otras plantas de energía renovable.

El Marco Regulatorio Mexicano ya considera algunos usos energéticos del hidrógeno; sin embargo, se requiere una inclusión formal, definición y regulación. Es necesaria una clara diferenciación entre los usos de energía y materias primas, así como incentivos que ayuden a impulsar los desarrollos de hidrógeno verde.

Hay al menos un par de empresas internacionales que han visto el potencial de desarrollos de hidrógeno verde en México, y que ya están conceptualizando sus primeros proyectos piloto en el país.

Las regiones con mayor potencial de energía renovable en México coinciden con la ubicación de los potenciales consumidores de hidrógeno. Por ejemplo, la Municipalidad de Mulegé tiene una importante relación de irradiación, minas de cobre y una red de energía aislada.

La parte más significativa del mercado del hidrógeno está cautiva en manos de PEMEX. Esto tiene algunas implicaciones:

- Sólo hay algunas partes interesadas en el negocio del hidrógeno, dejando la decisión de pasar del hidrógeno gris al verde en manos de un número reducido de entidades.
- El mercado del hidrógeno verde en México aún no ha emergido, lo que potencialmente podría traer oportunidades para los nuevos participantes.

Los principales productores de hidrógeno comercial (gris) en México (Air Liquide, Linde y Cryo-Infra/Air Products) participan en proyectos de hidrógeno verde en todo el mundo. Estas empresas introducirán naturalmente el hidrógeno verde en México, una vez en su lugar.

Las universidades y centros de investigación mexicanos han estado trabajando en tecnologías de hidrógeno desde la década de 1990. Aquello significa que México tiene capacidad técnica para aprovechar el desarrollo de proyectos industriales de hidrógeno verde.

4.3 Percepción de las partes interesadas mexicanas

En general, la mayoría de los actores entrevistados todavía observan cómo el hidrógeno se desarrolla en otras latitudes y mantienen un interés en el tema, pero sin una participación activa.

Para las empresas que ya están desarrollando proyectos de hidrógeno verde en otros países, México aún no es un país interesante, ya que no hay una política nacional a su alrededor. Debido a las políticas de priorización de recursos, están asignando sus fondos de I+D en países africanos como Marruecos o Sudáfrica, donde ya hay interés gubernamental en el tema, o en países latinos como Costa Rica y Chile.

Sin excepción, los actores entrevistados coinciden en que México tiene un alto potencial renovable y una amplia extensión territorial que podría permitir el desarrollo de hidrógeno verde en el país.

Otros motivadores identificados son el tamaño de algunos sectores industriales en México, la proximidad a Estados Unidos y el TLCAN como posibles habilitadores de las exportaciones de hidrógeno e incluso la experiencia del país con la adopción de nuevas tecnologías energéticas, su capacidad de manufactura eléctrica y la disponibilidad de recursos humanos.

En cuanto a las barreras, los actores identifican como la principal barrera para el hidrógeno verde, la actual política energética del país y, por lo tanto, el ecosistema adverso de inversión en proyectos renovables en México.

La segunda barrera más importante para el hidrógeno en México es la falta de regulaciones encaminadas a cumplir con los objetivos del Acuerdo de París. Esta falta de regulación en términos de emisiones no ha hecho necesario emitir reglamentos técnicos para las nuevas tecnologías, como la producción y el uso de hidrógeno.

La visión generalizada de los actores entrevistados es que el hidrógeno llegará a México, es sólo cuestión de tiempo: cuanto más rápido exista un marco regulatorio, más pronto llegará.

Algunas acciones se consideran necesarias a corto plazo, como desarrollar una hoja de ruta o estrategia nacional del hidrógeno, desarrollar proyectos piloto e identificar oportunidades inmediatas para la adopción de hidrógeno verde, posiblemente montacargas, camiones mineros o islas energéticas y penínsulas. La exportación de hidrógeno desde México es una posibilidad que también está a la vista.

Anexo A: Recomendaciones para futuras obras que se llevarán a cabo en profundidad

Desde la experiencia sobre el esfuerzo de otros países en el desarrollo de la economía del hidrógeno, sería recomendable que México lleve a cabo algunos estudios adicionales con mayor profundidad. El objetivo de los estudios es ampliar la comprensión del beneficio potencial que el hidrógeno podría traer a México en los campos social, económico y ambiental.

- Estudios ex ante de la política pública para la adopción del hidrógeno en México: evaluación preliminar del impacto y posibles consecuencias de la aplicación de distintas políticas para la adopción del hidrógeno en México. Se sugiere analizar el impacto de estas posibles políticas en los ámbitos económico, fiscal, ambiental (por matriz ambiental), social y de política interna y externa.
- Cuantificación de impactos sociales: análisis de la creación de empresas y puestos de trabajo debido a las nuevas cadenas productivas de hidrógeno verde, análisis de empleos desplazados en otras industrias, así como reducción de la pobreza energética, reducción de la desigualdad y otros cobeneficios sociales de las renovables.
- Análisis de impactos ambientales de la adopción del hidrógeno verde: análisis detallado del impacto ambiental de diferentes aplicaciones del hidrógeno verde. Se recomiendan las evaluaciones de ciclo de vida para comprender mejor el impacto global de las tecnologías de hidrógeno en las emisiones atmosféricas, el consumo de agua, energía y otros recursos no renovables.
- Estudio de los impactos macroeconómicos del hidrógeno en México: identificación y cuantificación de impactos de la adopción del hidrógeno verde según distintos indicadores en México. Algunos ejemplos incluyen el PIB o la balanza comercial energética. Este estudio podrá incluir una identificación de las nuevas rutas en la compra y venta de hidrógeno entre sectores y su impacto en la matriz insumo - producto de la economía mexicana.
- Estudios de mayor resolución para aplicaciones específicas de hidrógeno con alto potencial en México: se pueden analizar con mayor profundidad sectores como la movilidad, la generación eléctrica o el hidrógeno como materia prima, analizando más aplicaciones del hidrógeno, haciendo mapeos más profundos sobre los posibles productores y compradores de hidrógeno y ampliar el número de “drivers” que podrían llevar a la sustitución de los combustibles fósiles por hidrógeno verde en las operaciones de cada sector.
- Análisis de oportunidades regionales para el H₂ en México: actualmente existe una tendencia en el mundo para la adopción de hidrógeno verde: la creación de hubs regionales. Regiones con alto potencial renovable, buenos niveles de industrialización y acceso a infraestructura energética pueden desarrollar clústeres industriales para producir hidrógeno en altos volúmenes (aprovechando economías de escala) y consumirlo en diferentes aplicaciones, como movilidad, calor industrial, materia prima, etc. Este estudio podría identificar el potencial real para desarrollar hubs de hidrógeno en algunas regiones que intuitivamente parecen interesantes en México, como el Noreste, Noroeste y la región del Bajío.



Bibliografía

BMW, F.M. (2020). The National Hydrogen Strategy. Berlín, Alemania: BMW - Ministerio Federal de Asuntos Económicos y Energía

Dolci, F. (2019). Incentives and legal barriers for power-to-hydrogen pathways: An international snapshot. *Hydrogen Energy*, 11394-11401.

Centro de Cooperación Industrial UE-JP. (2019). Hydrogen and Fuel Cells in Japan. UE.

FCH-JU. (2014). Development of Water Electrolysis in the European Union. UE: FCH-JU.

FCH-JU. (2019). Hydrogen Roadmap Europe. Comisión Europea.

Fortuna, J. (2020, 12 de octubre). Hidrógeno comercial en México. (J. A. Gutiérrez, Entrevistador)

Hinicio. (2015). CertifHy D2.2 Structured list of requirements for green hydrogen. Bruselas: New Energy World JU.

Hydrogen Council. (2017). Hydrogen - Scaling up. Bélgica: HC.

Hydrogen Council. (2020). Path to hydrogen competitiveness A cost perspective. Bélgica.

Hydrogenics. (2018). Markham Energy. Recuperado de <http://www.h2gta.ca/wp-content/uploads/2018/06/AMurray-Hydrogenics-Markham-Energy-Storage-Facility-061318.pdf>

IEA. (2013). Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. IEA.

IEA. (2019). The Future of Hydrogen. IEA.

Secretaría de Economía. (2019). SIAVI - Sistema de Información Comercial por Internet. NA.

Ministerio de Energía, Chile. (2020). Estrategia Nacional Hidrógeno Verde. Santiago: ME Chile.

NREL. (2019). Energy Storage: Days of Service Sensitivity Analysis. NREL.

Pellow, M. A. (2015). Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis. Londres: Royal Society of Chemistry.

WEC. (2020). International Hydrogen Strategies. Alemania: World Energy Council.

