

# Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación

*Tomo VI: Análisis de la cadena de valor local y del potencial de exportación de 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

[www.energypartnership.mx](http://www.energypartnership.mx)  
[www.giz.de/en/worldwide/76471.html](http://www.giz.de/en/worldwide/76471.html)

## Edición y supervisión

William Jensen Díaz  
[william.jensen@giz.de](mailto:william.jensen@giz.de)

Lorena Espinosa Flores  
[lorena.espinosa@giz.de](mailto:lorena.espinosa@giz.de)

Javier Arturo Salas Gordillo  
[javier.salasgordillo@giz.de](mailto:javier.salasgordillo@giz.de)

Natalia Escobosa Pineda

## Autores

HINICIO

## Fecha

Octubre 2021

## Versión digital

## Diseñado por

Sk3 Estudio Creativo, CDMX  
[www.sk3.mx](http://www.sk3.mx)

## Créditos de fotografías

- ® petmalinak página 10
- ® petmalinak página 23
- ® petmalinak página 43

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

---

## Agradecimientos especiales

### Agradecimientos especiales

Patrick Maio (HINICIO) Ana Ángel (HINICIO)

Luis Miguel Diazgranados (HINICIO)

Jorge Luis Hinojosa (HINICIO)

Juan Antonio Gutiérrez (HINICIO)

---

# Contenido

---

Editorial	
Agradecimientos	1
Contenido	2
Abreviaturas	4
Lista de tablas	5
Lista de figuras	6
Resumen ejecutivo	7
1. Introducción	10
2. Diagnóstico para el desarrollo de una industria manufacturera de tecnologías de hidrógeno verde en México	11
2.1. Criterios de evaluación del potencial de manufactura en México	11
2.2. Electrolizadores y celdas de combustible	12
2.2.1. Tecnologías de electrólisis y celdas de combustible	12
2.2.2. Potencial de manufactura de electrolizadores y celdas de combustible en México	13
2.3. Equipo de acondicionamiento y transporte	14
2.3.1. Potencial de manufactura de equipo de acondicionamiento y transporte de hidrógeno en México	14
2.4. Almacenamiento de hidrógeno	16
2.4.1. Potencial de fabricación de equipos de almacenamiento de hidrógeno	17
2.5. Turbinas de generación eléctrica	17
2.5.1. Potencial de fabricación de turbinas de generación eléctrica de H <sub>2</sub> en México	17
2.6. Vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV)	19
2.6.1. Potencial de fabricación de FCEV en México	19
2.7. Evaluación del potencial de fabricación de tecnologías de hidrógeno	21
3. Beneficios sociales, ambientales y económicos de la creación de una cadena de valor de hidrógeno verde en México	22
3.1. Metodología	22
3.2. Impacto ambiental	23
3.2.1. Reducción de GEI por sustitución del hidrógeno gris	23
3.2.2. Reducción de GEI por remplazo de los combustibles fósiles	24
3.2.3. Reducción de GEI en el transporte terrestre	26
3.3. Impacto social	27
3.4. Impactos económicos	29

4.	Recomendaciones regulatorias y financieras para impulsar la producción de hidrógeno en México	32
4.1.	Políticas y regulación	33
4.2.	Contexto económico y político	34
4.3.	Tecnología y capital humano	36
4.4.	Experiencias internacionales	36
5.	Identificación de capacidades necesarias	38
5.1.	Capacidades intelectuales	38
5.2.	Capacidades financieras	38
5.3.	Capacidades legales	39
5.4.	Capacidades comerciales	39
6.	Potencial de contribución Mexicana a las necesidades internacionales de hidrógeno verde y transición energética	40
6.1.	El mercado de exportación de hidrógeno	40
6.2.	Análisis de exportación marítima de hidrógeno	40
6.3.	Exportación terrestre de hidrógeno por ducto	43
7.	Conclusiones	44
	Bibliografía	45

## Abreviaturas

BEV	Vehículo eléctrico de batería
CAEX	Camiones de Extracción Minera
CAPEX	Gastos de capital
CFE	Comisión Federal de Electricidad
FC	Fuel Cell, Celda de combustible
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, Vehículo de celda de combustible
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
FTE	Trabajo equivalente de tiempo completo
GHG	Emisiones de gases de efecto invernadero
HDV	Heavy-Duty Vehicle, Camión de Carga Pesada
HRS	Hydrogen Refueling Station, Estación de recarga de hidrógeno
ICEV	Internal Comb. Engine Vehicle, Vehículo de combustión interna
IEA	International Energy Agency
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
IRENA	International Renewable Energy Agency
LCOE	Levelized Cost of Energy, Costo Nivelado de Electricidad
LCOH	Levelized Cost of Hydrogen, Costo Nivelado de Hidrógeno
MW	Megawatt
NDC	Contribuciones determinadas a nivel nacional
NG	Gas natural
O&M	Operación y Mantenimiento
OEM	Fabricante de equipos originales
PEMEX	Petróleos Mexicanos
SENER	Secretaría de Energía
SDGs	Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SMR	Steam Methane Reforming, Reformado de Metano con Vapor
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

## Lista de tablas

Tabla 2-1.	Criterios, peso ponderado y descripción cualitativa para los valores mínimos y máximos de evaluación de la capacidad de manufactura en México.	12
Tabla 2-2.	Evaluación del potencial de manufactura de electrolizadores y celdas de combustible.	13
Tabla 2-3.	Evaluación del potencial de manufactura de equipo de acondicionamiento y transporte de hidrógeno.	15
Tabla 2-4.	Evaluación del potencial de manufactura de equipo de almacenamiento de hidrógeno.	16
Tabla 2-5.	Evaluación del potencial de manufactura de turbinas de generación eléctrica de hidrógeno.	18
Tabla 2-6.	Evaluación del potencial de manufactura de vehículos eléctricos de celda de combustible de hidrógeno.	20
Tabla 3-1.	Empleos creados por el despliegue de infraestructura de producción de hidrógeno verde en México.	20
Tabla 3-2.	Empleos creados en la fabricación de FCEVs en México.	28
Tabla 3-3.	Empleos creados por la construcción y mantenimiento de HRS en México.	28
Tabla 6-1.	Caracterización de los potenciales países importadores de hidrógeno.	41
Tabla 6-2.	Caracterización de los potenciales países exportadores de hidrógeno.	41
Tabla 6-3.	Distancia entre puertos de origen y destino en millas náuticas (NM).	41
Tabla 6-4.	LCOH 2030 en el puerto de destino y ranking de México frente a los competidores.	41
Tabla 6-5.	Proyección de exportaciones de hidrógeno desde México en 2030.	42

## Lista de figuras

Figura 1.	Ranking del potencial de México para la fabricación de tecnologías de H <sub>2</sub> .	7
Figura 2.	Reducción de emisiones de GEI y empleos creados por el hidrógeno verde en México.	7
Figura 3.	Proyecciones del tamaño del mercado de H <sub>2</sub> en México para usos como energético o insumo industrial (PEMEX, CFE e industrias privadas) y para el transporte pesado.	8
Figura 2-1.	Gráfica de radar de puntajes para el potencial de manufactura de electrolizadores y celdas de combustible en México.	14
Figura 2-2.	Gráfica de radar de puntajes para el potencial de manufactura de equipo de acondicionamiento y transporte de H <sub>2</sub> .	15
Figura 2-3.	Desglose de costos de un sistema de almacenamiento de hidrógeno en tanques tipo IV. Fuente: US DOE.	16
Figura 2-4.	Gráfica de radar de puntajes para el potencial de manufactura de equipo de almacenamiento de H <sub>2</sub> en México	17
Figura 2-5.	Gráfica de radar de puntajes para el potencial de manufactura de turbinas eléctricas de hidrógeno en México.	18
Figura 2-6.	Comparación de vehículos eléctricos a batería y de celda de combustible.	19
Figura 2-7.	Gráfica de radar de puntajes para el potencial de manufactura de vehículos de hidrógeno en México	20
Figura 2-8.	Comparativo del potencial de fabricación de tecnologías del hidrógeno en México por criterios de evaluación.	21
Figura 2-9.	Evaluación de la competitividad del potencial de fabricación de tecnologías de hidrógeno en México por calificación ponderada.	21
Figura 3-1.	Proceso metodológico para cuantificar los impactos ambientales, sociales y económicos de la demanda de hidrógeno verde en México.	22
Figura 3-2.	Proyección de emisiones de GEI evitadas por la sustitución del hidrógeno gris por hidrógeno verde.	24
Figura 3-3.	Contribución porcentual a la reducción de emisiones de GEI del reemplazo de H <sub>2</sub> gris por H <sub>2</sub> verde en 2030 y 2050.	24

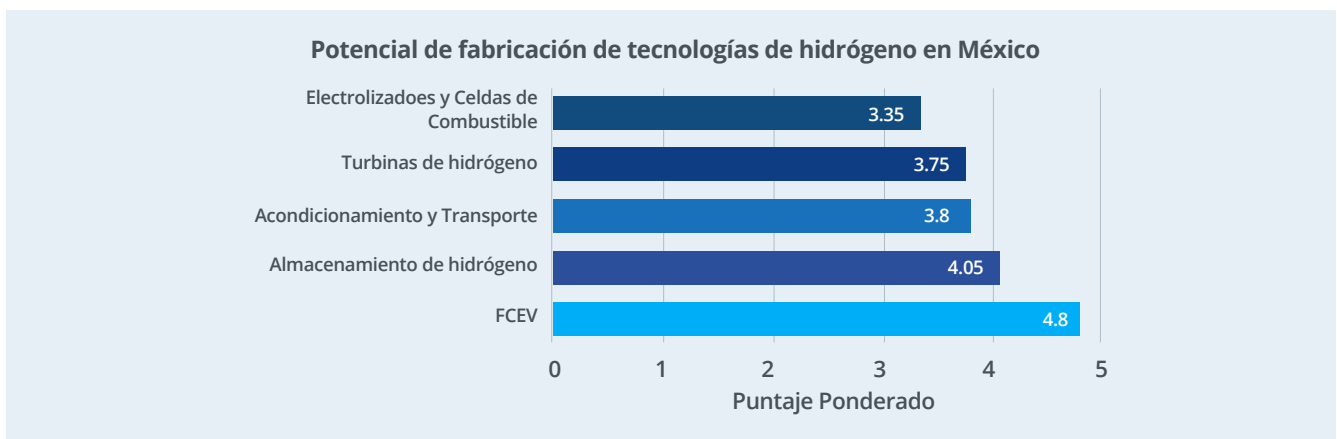
Figura 3-4.	Proyección de emisiones de GEI evitadas por la sustitución de los combustibles fósiles por hidrógeno verde en la generación de energía y la industria.	25
Figura 3-5.	Contribución porcentual a la reducción de emisiones por el reemplazo de combustibles por H <sub>2</sub> verde en aplicaciones térmicas e industriales en 2030 y 2050.	25
Figura 3-6.	Proyección de la reducción de emisiones de GEI por la adopción de la movilidad de hidrógeno en el transporte terrestre.	26
Figura 3-7.	Contribución porcentual a la reducción de emisiones por la adopción del H <sub>2</sub> verde en el sector transporte en 2030 y 2050.	27
Figura 3-8.	Proyecciones de costos de electrólisis por capacidad instalada en México.	29
Figura 3-9.	Tamaño del mercado de hidrógeno para 2050 en los segmentos de consumo de PEMEX y CFE.	30
Figura 3-10.	Tamaño de mercado del hidrógeno verde en el sector privado en 2050.	30
Figura 3-11.	Proyecciones del tamaño de mercado del hidrógeno verde para sus usos como energético en PEMEX, CFE y el sector privado.	31
Figura 3-12.	Tamaño del mercado de hidrógeno para el transporte terrestre pesado de pasajeros y de carga en 2050.	31
Figura 3-13.	Proyecciones del tamaño del mercado de hidrógeno en México por segmento automotriz 2020-2050.	31
Figura 6-1.	Desglose de costos de exportación de hidrógeno verde desde México hacia la Unión Europea en 2030, con transporte marítimo de H <sub>2</sub> líquido.	42
Figura 6-2.	Desglose de costos de la exportación terrestre de hidrógeno de México al estado de California, Estados Unidos en 2030.	43



## Resumen ejecutivo

La economía del hidrógeno en México podría tener impactos significativos en muchas áreas, incluyendo la manufactura, la mitigación del cambio climático, la generación de empleos, las oportunidades de negocios a nivel local e internacional, el fortalecimiento regulatorio y financiero, así como la creación de nuevas capacidades productivas.

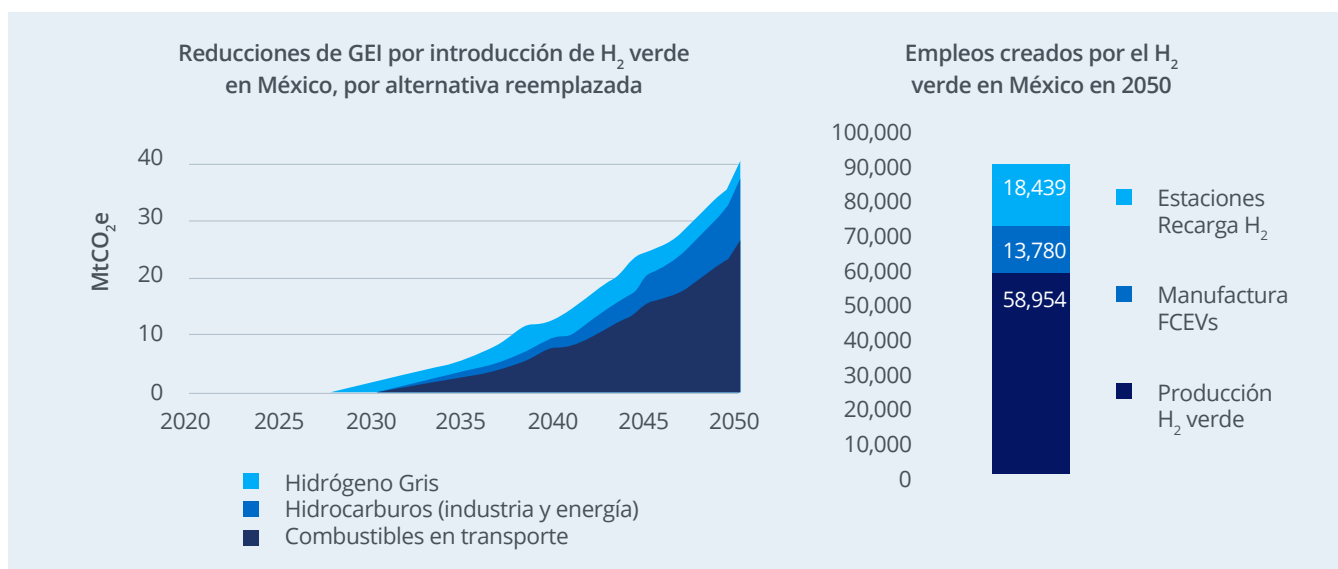
Figura 1. Ranking del potencial de México para la fabricación de tecnologías de H<sub>2</sub>.



El análisis de fabricación de tecnologías de hidrógeno muestra a México como un país con potencial para ser competitivo en la fabricación de turbinas de generación eléctrica de hidrógeno, así como equipos de acondicionamiento, transporte y almacenamiento. La

industria automotriz podría continuar prosperando en el país, aprovechando el robusto ecosistema de fabricación actual para producir vehículos con trenes motrices de hidrógeno. México posee un potencial para posicionarse como un fabricante líder de FCEVs a nivel mundial.

Figura 2. Reducción de emisiones de GEI y empleos creados por el hidrógeno verde en México.



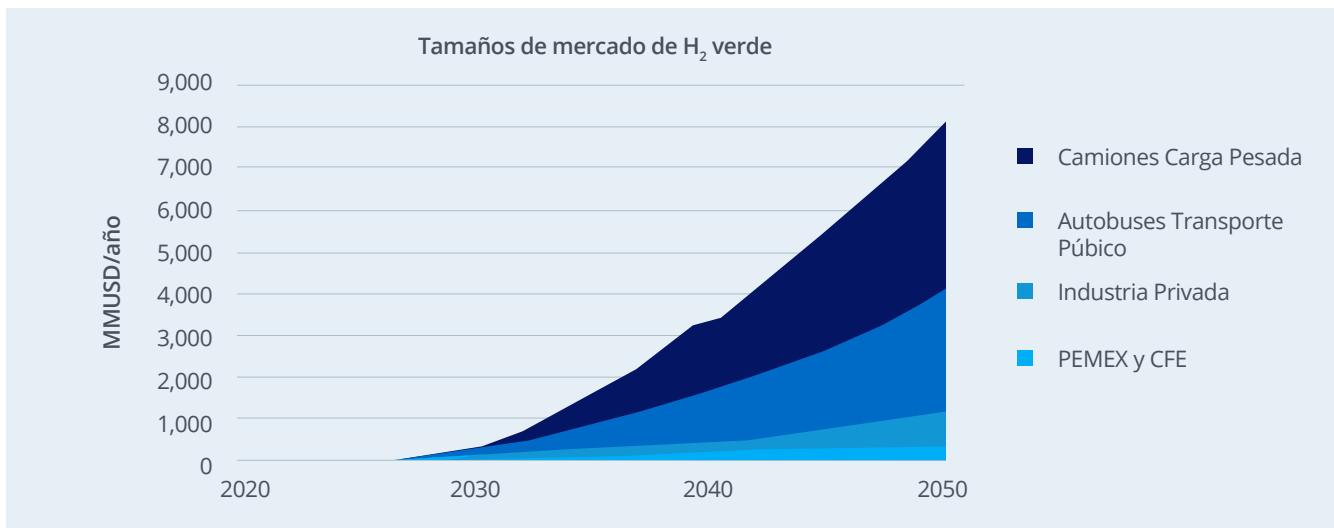
Para 2050, cerca de 300 MtonCO<sub>2</sub>e podrían evitarse ante la adopción del hidrógeno verde en México, de los cuales dos tercios corresponden a la sustitución de los combustibles fósiles por vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV) para el transporte público y de carga. El CO<sub>2</sub> evitado por la introducción del hidrógeno verde por parte de PEMEX en sus refinerías y plantas de producción de amoníaco en México alcanzaría más de 3.2 millones de tonCO<sub>2</sub>e/año para 2050. El reemplazo de

combustibles fósiles por hidrógeno verde en la generación eléctrica y en la industria tiene el potencial de reducir hasta 7,6 millones de tonCO<sub>2</sub>e/año en 2050. Finalmente, el reemplazo de vehículos de combustión interna (ICEV) por vehículos de celda de combustible y querosenos por combustibles sintéticos podría reducir las emisiones de GEI hasta en 26,7 tonCO<sub>2</sub>e/año.

En cuanto a generación de empleos, para 2050 más de 90,000 personas podrían trabajar en actividades relacionadas con el hidrógeno en México. El mayor potencial de creación de empleo se encuentra en el despliegue de la infraestructura necesaria para la producción del hidrógeno. La segunda actividad con mayor potencial de generación de empleo sería en la instalación

de infraestructura de reabastecimiento de hidrógeno vehicular, y en tercer lugar, la industria automotriz. En cuanto a la creación de mercados e inversiones, el tamaño del mercado esperado para satisfacer la demanda de PEMEX y CFE es de aproximadamente 100 millones de dólares por año para 2030 y más de 1.3 mil millones de dólares anuales para 2050. Las mayores oportunidades previstas para el sector privado están en los camiones de extracción minera (CAEX) y en la reducción directa de minerales (DRI), que en conjunto representan casi el 80% del impacto económico valorado en 800 millones de dólares/año para 2050. Las inversiones acumuladas para el suministro de hidrógeno para PEMEX y CFE se proyectan en cerca de 2.6 mil millones para mediados de siglo, y en casi 8.5 mil millones para el sector privado.

Figura 3. Proyecciones del tamaño del mercado de H<sub>2</sub> en México para usos como energético o insumo industrial (PEMEX, CFE e industrias privadas) y para el transporte pesado.



Los abundantes recursos de energía renovable de México y su posición privilegiada le brindan un gran potencial para exportar hidrógeno a los mercados internacionales. En 2030 más de 300 millones de dólares de H<sub>2</sub> verde podrían exportarse al extranjero. En comparación con otros potenciales exportadores de hidrógeno verde, México se coloca como un exportador competitivo a los mercados de Europa y Asia, principalmente debido al bajo costo de producción de H<sub>2</sub> verde y su posición geográfica privilegiada junto a los EE.UU. Además, cuenta con acceso a los océanos Atlántico y Pacífico en una latitud norte que le permite competir estrechamente con Chile y Australia. En 2030, el H<sub>2</sub> verde mexicano podría entregarse marítimamente en Europa a aproximadamente 6 USD/kg y por ducto a los estados fronterizos de Estados Unidos a 2.5 USD/kg.

## Recomendaciones y creación de capacidades

### Políticas y regulación:

México podría actualizar su política de cambio climático y reconocer los beneficios potenciales del hidrógeno para desarrollar una estrategia u hoja de ruta nacional (o múltiples estatales) para apoyar su despliegue. El desarrollo de una Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde con objetivos específicos y acciones para alcanzarlos junto con regulaciones específicas para el hidrógeno en sus diferentes aplicaciones, ha demostrado a nivel internacional ser una práctica para impulsar la economía del hidrógeno.

### Contexto económico y político:

Al impulsar la energía renovable desde políticas públicas y regulación, se ponen en marcha medidas que faciliten el acceso a la infraestructura energética para el desarrollo de proyectos de hidrógeno y fomentar la colaboración entre empresas especializadas en hidrógeno y PEMEX y CFE. Se podrían poner en marcha sistemas de Garantía de Origen para el hidrógeno verde para estimular su exportación e incentivar su adopción reconociendo sus beneficios ambientales.

### Financiamiento y capital humano:

Proporcionar financiamiento y/o asistencia financiera como un instrumento adicional para acelerar el despliegue del hidrógeno verde. El financiamiento podría provenir de la banca pública, privada, multilateral o de una combinación de ellas.

Será necesario comunicar activamente sobre el funcionamiento y los beneficios del hidrógeno verde a todos los posibles actores interesados, crear misiones de aprendizaje y alianzas internacionales que incluyan programas de transferencia del conocimiento en temas de H<sub>2</sub>.

Es recomendable establecer una estrategia para desarrollar talento calificado en hidrógeno verde mediante el fomento a la capacitación dedicada, las asociaciones académico-industriales y la cooperación internacional en educación superior, investigación, desarrollo e innovación.

### Experiencia internacional:

Este estudio presenta un compilado de las mejores prácticas y recomendaciones internacionales para permitir el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde. Muchas de ellas se superponen con los descritos anteriormente, lo que refleja su alineación con la experiencia internacional.

### Desarrollo de capacidades:

México tiene muchas capacidades bien desarrolladas, intelectuales, financieras y legales en los sectores de energía e industria. Sin embargo, la adopción de la economía del hidrógeno verde exigirá que el país desarrolle nuevas capacidades mediante el impulso de nuevos recursos humanos calificados, así como la expansión de las capacidades financieras, legales y comerciales.



# 1. Introducción

Este informe presenta un diagnóstico para el desarrollo de una industria manufacturera de tecnologías de hidrógeno verde en México. El diagnóstico identifica fortalezas y áreas de oportunidad del país para desarrollar la infraestructura de fabricación de tecnologías dentro de la cadena de valor del hidrógeno verde. Se enfoca en los principales equipos de la cadena de valor del H<sub>2</sub>: electrolizadores y celdas de combustible, equipos para el acondicionamiento, transporte y almacenamiento de hidrógeno, turbinas eléctricas de hidrógeno y vehículos eléctricos de celda de combustible de hidrógeno (FCEV).

Se evalúan también los beneficios sociales, ambientales y económicos de la creación de una cadena de valor del hidrógeno verde en México, proporcionando una cuantificación de la reducción de emisiones de GEI, de la creación de empleo, y beneficios económicos de la adopción del hidrógeno en el país.

Se diagnostican barreras regulatorias y financieras para el desarrollo de una economía verde del hidrógeno, y se hacen recomendaciones para impulsar la producción y el uso del hidrógeno en México al abordarlas. Se realiza un análisis similar para diagnosticar las capacidades a desarrollar en México para un despliegue acelerado de la infraestructura de hidrógeno.

Finalmente, se presenta un análisis de producción y exportación de hidrógeno verde desde México para contribuir a las necesidades internacionales de hidrógeno y transición energética. Se cuantifica el potencial del país para la exportación de hidrógeno a través de algunos casos de negocio.

Dada la diversidad de los análisis realizados, la metodología seguida para cada uno de ellos se detalla en el capítulo correspondiente.



## 2. Diagnóstico para el desarrollo de una industria manufacturera de tecnologías de hidrógeno verde en México

La adopción de la economía del hidrógeno a nivel local y global podría presentar oportunidades para México en la fabricación de componentes tecnológicos a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno verde, desde la producción, almacenamiento, acondicionamiento, transporte y hasta los usos finales en aplicaciones de generación de energía o movilidad.

Con el fin de evaluar el desarrollo de una industria manufacturera de tecnologías de hidrógeno verde en México, se desarrolló un proceso metodológico para evaluar las condiciones y capacidades del país en diferentes dimensiones y segmentos industriales.

Se comenzó con la evaluación del potencial del país y capacidades para fabricar cada categoría de equipo o componentes de la cadena de valor del hidrógeno y posteriormente se evaluaron los segmentos específicos para identificar, comparar y clasificar las oportunidades de negocio dentro del país.

Los componentes de la cadena de valor del hidrógeno se agrupan en categorías de hardware según el tipo de dispositivos y su lugar en la cadena: electrolizadores y celdas de combustible, equipos de acondicionamiento y transporte, almacenamiento de hidrógeno, turbinas de generación eléctrica y vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV).

### 2.1. Criterios de evaluación del potencial de manufactura en México

Cada segmento se evalúa a través de siete criterios, los cuales se describen en el recuadro a la derecha:

Para cada dimensión, el país recibe una puntuación que va de menos competitivo (1) a más competitivo (5), lo que permite construir gráficos de radar para el potencial de cada segmento y obtener una calificación ponderada para clasificarlos. Los criterios se ponderan, dando un valor grande a las consideradas más relevantes, y uno menor a aquellas con un impacto atribuido menor.

- **Disponibilidad de recursos naturales** evalúa si México es un productor, exportador o importador de los recursos naturales claves necesarios para fabricar los componentes tecnológicos para una aplicación determinada, así como la dificultad o facilidad para obtener esos recursos cuando no se producen a nivel nacional.
- **El acceso a la cadena de suministro** indica la existencia o facilidad de desarrollo de la cadena de valor dentro del país para la integración de los componentes involucrados. Esto podría ir desde una presencia establecida de la industria hasta dificultades o bloqueos para el desarrollo de las cadenas de suministro en el segmento.
- **Talento y recursos humanos** se refiere a la presencia de personal calificado en cadenas de valor similares o relacionadas que eventualmente podrían participar en la fabricación de los componentes o equipos de hidrógeno. Se evalúan desde “inexistentes” hasta “reconocidos con renombre internacional”.
- **Capacidad de producción instalada** muestra si algunos componentes dentro de la cadena de valor o estrechamente relacionados ya se producen en México, con la infraestructura de fabricación y la experiencia asociadas. Este criterio se evalúa desde la falta de cualquier infraestructura relacionada hasta tener una base de fabricación existente para equipos relacionados.
- **Desarrollo del ecosistema manufacturero** tiene como objetivo cuantificar qué tan favorables son las condiciones para el desarrollo de la industria, qué tan establecida y de rápido crecimiento es el segmento en México, y si existen planes para fortalecer las capacidades; pasando de condiciones desfavorables a tener una industria establecida y en crecimiento en el sector.

- **Experiencia nacional en el desarrollo de nuevas cadenas de valor** indica el nivel de experiencia en el país para el desarrollo de nuevas cadenas de valor en sectores relacionados, y cuán actuales y adecuadas podrían ser para las tecnologías del hidrógeno. El criterio se evalúa desde “inexistente” hasta “una amplia y reciente experiencia en el segmento”.

- **Contexto comercial con los potenciales países consumidores** se refiere al estado de las relaciones comerciales activas de México con los países con gran potencial como consumidores del componente tecnológico de hidrógeno. Se evalúa desde “relaciones comerciales adversas” hasta “relaciones comerciales activas y existencia de acuerdos comerciales con los países clientes”.

Tabla 2-1. Criterios, peso ponderado y descripción cualitativa para los valores mínimos y máximos de evaluación de la capacidad de manufactura en México.

Criterio	Peso	Rango inferior (1)	Rango Superior (5)
Disponibilidad de recursos naturales	15%	México es un importador neto de recursos de interés para la actividad	México se encuentra entre los 10 principales exportadores mundiales de recursos de interés para la actividad
Acceso a la cadena de suministro	10%	México tiene bloqueos o incapacidades explícitas para el desarrollo de cadenas de suministro en este sector.	México tiene fácil acceso a cadenas de suministro vinculadas al desarrollo de la producción de este equipo
Talento y recursos humanos	15%	México no tiene recursos humanos ni experiencia en su desarrollo para actividades similares	México es reconocido mundialmente por su conocimiento en la materia
Capacidad de producción instalada	10%	México no tiene experiencia con esta actividad o actividades relacionadas	México ya fabrica equipos o sistemas completos relacionados con este sector
Desarrollo del ecosistema de manufactura	20%	México tiene condiciones desfavorables para el desarrollo de una industria en el sector	México tiene una industria plenamente establecida con un crecimiento continuo en el sector
Experiencia nacional en el desarrollo de nuevas cadenas de valor	20%	México no tiene experiencia en el desarrollo de nuevas cadenas de valor en el sector	México tiene una enorme y fresca experiencia en el desarrollo de nuevas cadenas de valor en el sector
Contexto comercial con los potenciales países consumidores	10%	Las relaciones comerciales mexicanas con clientes potenciales están dañadas	México tiene una relación comercial activa con clientes potenciales para la solución
<b>Ponderación total</b>	<b>100%</b>		

## 2.2. Electrolizadores y celdas de combustible

### 2.2.1. Tecnologías de electrólisis y celdas de combustible

Los **electrolizadores** y las **celdas de combustible** son dispositivos electroquímicos que utilizan agua y electricidad para producir hidrógeno (electrolizadores) y el proceso opuesto (celdas de combustible). Los electrolizadores son la piedra angular del desarrollo del hidrógeno verde, siendo el único método económicamente viable para producir hidrógeno de cero carbono, a diferencia del reformado convencional de metano de vapor (SMR) o la gasificación del carbón, que son procesos de bajo costo pero intensivos en emisiones.

Los **electrolizadores** tienen como entradas agua y electricidad. Utilizan la corriente eléctrica para dividir la molécula de H<sub>2</sub>O en hidrógeno y oxígeno, produciendo H<sub>2</sub> de cero carbono cuando la electricidad usada es renovable. Todos los electrolizadores están formados por un ánodo y un cátodo separados por un electrolito, y las dos tecnologías principales de electrolizadores son alcalinas (ALK) y de membrana de intercambio protónico (PEM).

La electrólisis ALK es una tecnología madura con un alto número de proyectos en operación y óptima para la producción de H<sub>2</sub> verde a gran escala con demandas constantes o predecibles, por ejemplo, en la industria pesada. La electrólisis PEM es una tecnología menos madura con menos proyectos en operación y óptima para proyectos con demandas variables e impredecibles, espacio restringido o suministro de H<sub>2</sub> simultáneamente para más de una aplicación, por ejemplo, para proporcionar servicios de estabilidad de la red o energía en el sitio a proyectos de movilidad.

Las **celdas de combustible** utilizan la energía química del hidrógeno para producir electricidad, tomando oxígeno del aire y mezclándolo con hidrógeno para generar una corriente eléctrica, teniendo sólo agua y calor como subproductos. Pueden proporcionar energía para una amplia gama de aplicaciones, siendo la generación de energía eléctrica la más relevante a diferentes escalas,

incluida la energía primaria y de respaldo, así como para diferentes modos de movilidad, desde montacargas dentro de almacenes y fábricas hasta el transporte por carretera en FCEV, transporte ferroviario, marítimo y aéreo.

Al igual que los electrolizadores, las celdas de combustible se componen de dos placas de electrodos, un ánodo y un cátodo, dispuestos alrededor de una membrana electrolítica. Las celdas de combustible tienen eficiencias más altas que los motores de combustión interna y no tienen partes móviles, lo que las hace silenciosas y más confiables. Por último, las celdas de combustible son escalables y se pueden configurar en arreglos en serie o paralelo de celdas unitarias para obtener mayores potencias eléctricas. El mercado global de celdas de combustible está creciendo rápidamente a medida que la adopción de sus aplicaciones aumenta tanto en aplicaciones estacionarias como en movilidad a través de FCEV.

### 2.2.2. Potencial de manufactura de electrolizadores y celdas de combustible en México

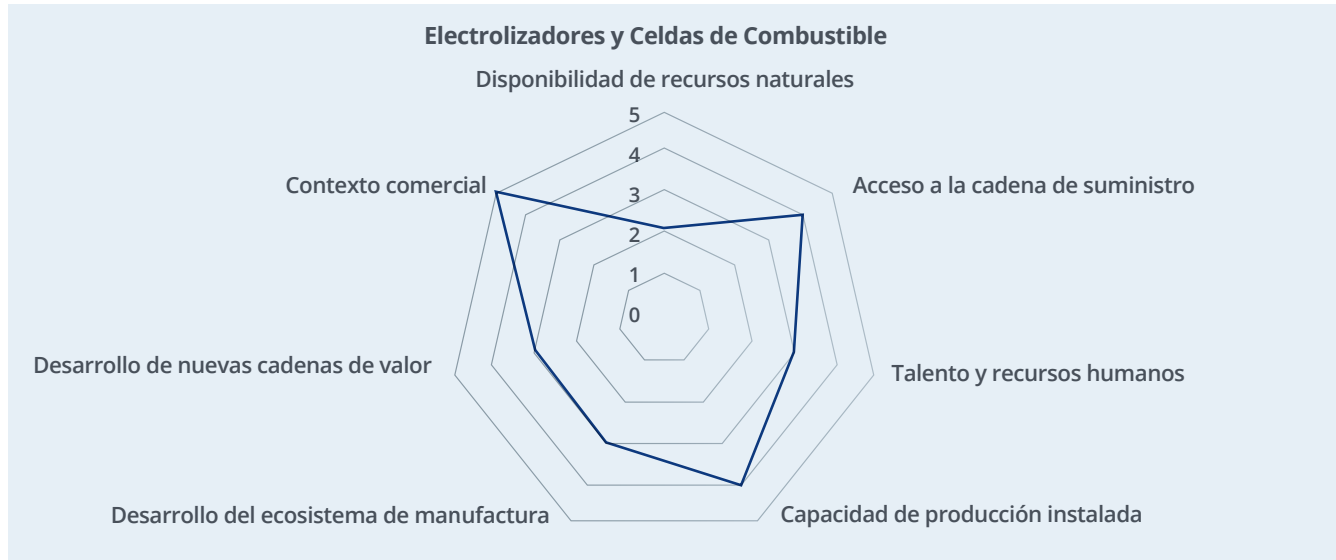
Los resultados del análisis y evaluación de cada criterio para la fabricación de electrolizadores y celdas de combustible se presentan en la siguiente tabla, describiendo brevemente el argumento detrás de la puntuación para cada criterio.

Tabla 2-2. Evaluación del potencial de manufactura de electrolizadores y celdas de combustible.

Criterio	Puntaje	Argumento
Disponibilidad de recursos naturales	2	A pesar de que México es un importante fabricante de cobre y acero y tiene una producción moderada de grafito, no tiene metales catalíticos como platino o iridio necesarios para la producción de catalizadores.
Acceso a la cadena de suministro	4	México actualmente importa platino y otros catalizadores metálicos para aplicaciones distintas de la electrólisis.
Talento y recursos humanos	3	En México, los prototipos de electrolizadores y pilas de combustible se han desarrollado a pequeña escala; sin embargo, no hay experiencia en el escalamiento de estos desarrollos.
Capacidad de producción instalada	4	Existe una pequeña y mediana industria manufacturera de reactores químicos y equipos de proceso en México. Las piezas de fabricación metalmecánica se fabrican en México, mientras que los equipos de instrumentación y control se importan de los EE. UU., China y Europa.
Desarrollo del ecosistema de manufactura	3	La industria química en México solo aumentó su contribución al PIB en 1% de 2012 a 2019. Otro indicador importante es la industria manufacturera, que creció de 15,9% del PIB en 2007 a 17,3% del PIB en 2017, mostrando un leve incremento.
Experiencia nacional en el desarrollo de nuevas cadenas de valor	3	No se ha identificado el desarrollo de una nueva cadena de valor tecnológica en los últimos años. A pesar de los recientes descubrimientos de minas de litio en México, el desarrollo de fábricas de baterías aún no se ha visto. En el sector solar, la última planta de fabricación de inversores se instaló hace más de 10 años (Fronius - Monterrey).
Contexto comercial con los países consumidores potenciales	5	México es un país con múltiples tratados de libre comercio; cuenta con acuerdos firmados con países con metas ambiciosas para la adopción del hidrógeno, entre ellos Japón, Corea y con la Unión Europea.
<b>Puntaje ponderado</b>	<b>3.35</b>	

Las fortalezas potenciales se ven en el acceso a la cadena de suministro con las importaciones existentes, la capacidad de producción instalada de fabricación metalmeccánica, y las relaciones comerciales favorables que tienen acuerdos comerciales con Alemania, Japón y Corea, es decir, grandes mercados futuros de tecnologías de hidrógeno. Esto le da a México una **calificación ponderada de 3.35/5 en potencial para fabricar celdas de combustible y electrolizadores.**

Figura 2-1. Gráfica de radar de puntajes para el potencial de manufactura de electrolizadores y celdas de combustible en México.



### 2.3. Equipo de acondicionamiento y transporte

Los equipos de acondicionamiento y transporte incluyen dispositivos para la purificación, compresión y transporte de hidrógeno. El hidrógeno se produce como un gas generalmente a presiones de alrededor de 20-30 bar y necesita ser comprimido antes del transporte, almacenamiento o uso. Las presiones más comunes para la compresión de hidrógeno son 350 bar y 700 bar, siendo a 350 bar (H<sub>35</sub>) el estándar para las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno para recargar vehículos de celda de combustible pesados, como los autobuses o los camiones de carga.

La mayoría de los **compresores** utilizados actualmente para el hidrógeno gaseoso son compresores centrífugos o compresores de desplazamiento positivo. Los compresores centrífugos funcionan girando una turbina a altas velocidades para comprimir el gas H<sub>2</sub> y son los más utilizados para aplicaciones de transporte por ducto dado su alto rendimiento, aunque proporcionan una relación de compresión moderada. Los compresores de desplazamiento positivo impulsan un pistón hacia adelante y hacia atrás para comprimir el gas hidrógeno y son los más utilizados para aplicaciones que requieren altas relaciones de compresión.

Como su nombre indica, los **purificadores** de hidrógeno eliminan las impurezas del gas para proporcionar hidrógeno de alta calidad para aplicaciones específicas, como el uso en celdas de combustible PEM o según

sea necesario para su uso como reactivo en procesos de producción especializados, como la deposición química de vapor para producir películas delgadas para semiconductores. Se emplean diferentes tecnologías, como la purificación de la membrana de paladio, la purificación de membrana de metales delgados densos, la adsorción de oscilación de presión, la recombinación catalítica o purificación de desoxigenación y la purificación electroquímica.

Los **gasoductos de hidrógeno se pueden utilizar para transportar H<sub>2</sub> gaseoso** de manera rentable para grandes volúmenes de una manera similar a como se transporta actualmente el gas natural. Se deben tener en cuenta algunas limitaciones técnicas para evitar fugas de gas y fragilización de materiales cuando se utilizan gasoductos de gas natural convencionales. Algunas soluciones propuestas incluyen el uso de tuberías de polímero reforzado con fibra (FRP) que son alrededor de un 20% menos costosas que las tuberías de acero debido a la fabricación de la tubería de fibra de polímero y los requisitos de soldadura específicos de esta tecnología.

#### 2.3.1. Potencial de manufactura de equipo de acondicionamiento y transporte de hidrógeno en México

Los resultados del análisis de cada criterio para la fabricación de equipos de acondicionamiento y transporte se presentan en la siguiente tabla, describiendo brevemente el argumento detrás de la puntuación para cada criterio.



Tabla 2-3. Evaluación del potencial de manufactura de equipo de acondicionamiento y transporte de hidrógeno.

Criterio	Puntaje	Argumento
Disponibilidad de recursos naturales	3	México tiene un buen nivel de producción de acero, carbón y otros elementos asociados a la fabricación de equipos de acondicionamiento (compresores, refrigeradores, etc.) y transporte (tanques, contenedores, etc.)
Acceso a la cadena de suministro	5	La industria de fabricación de compresores, válvulas y ductos existe en México. Aunque no está especializada en el transporte de hidrógeno, podría adecuarse rápidamente.
Talento y recursos humanos	3	Aunque la fabricación mexicana de equipos para el manejo de gases especiales no cuenta con la historia de Francia, Alemania o Estados Unidos, en México hay personal familiarizado con la fabricación y operación de este tipo de equipos.
Capacidad de producción instalada	4	La mayoría de los equipos para acondicionamiento y manejo de gases industriales están integrados en México con bienes de producción nacional o importados.
Desarrollo del ecosistema de manufactura	3	La industria de fabricación de equipos en México está creciendo a tasas más altas que la economía nacional, sin embargo, no se identifican estímulos adicionales para su crecimiento.
Experiencia nacional en el desarrollo de nuevas cadenas de valor	4	El sector de la fabricación de equipos a través de procesos metalmecánicos adopta actualmente nuevas tecnologías de fabricación y automatización.
Contexto comercial con los países consumidores potenciales	5	México es un país con múltiples tratados de libre comercio. Entre los países con los que México tiene un acuerdo firmado se encuentran Japón, Alemania y Corea, todos ellos países con metas ambiciosas para la adopción del hidrógeno.
<b>Puntaje ponderado</b>	<b>3.80</b>	

México ya cuenta con una industria activa de fabricación de compresores, válvulas y ductos para el transporte de gases, siendo la experiencia y capacidad instalada las mayores fortalezas, con notable acceso a las cadenas de suministro y un contexto comercial favorable, resultando en una **calificación ponderada de 3.80/5 para la fabricación de equipos de acondicionamiento y transporte de hidrógeno.**

Figura 2-2. Gráfica de radar de puntajes para el potencial de manufactura de equipo de acondicionamiento y transporte de H<sub>2</sub>



### 2.4. Almacenamiento de hidrógeno

El almacenamiento de hidrógeno se puede hacer en un amplio rango de escalas de tiempo y volumen, desde cavernas salinas para almacenamiento estacional a gran escala hasta tanques presurizados para usos tan pequeños como montacargas. El hidrógeno se almacena típicamente como un gas comprimido a alta presión (de 350 a 700 bar). Estas presiones son adecuadas para uso estacionario, pero también para aplicaciones de movilidad.

El hidrógeno se almacena comúnmente en tanques compuestos de fibra de carbono que son recipientes de gas comprimido de alta presión con un revestimiento de polímero de alta densidad para evitar fugas de gas y se clasifican como tanques tipo IV. Estos tanques han sido desarrollados principalmente por fabricantes de FCEV y han soportado pruebas balísticas, de caída, de choque y de fuego. El componente de mayor costo de estos tanques corresponde a la fibra de carbono, representando el 60% del costo del sistema de almacenamiento, como se muestra en la Figura 2-3.

Figura 2-3. Desglose de costos de un sistema de almacenamiento de hidrógeno en tanques tipo IV. Fuente: US DOE.

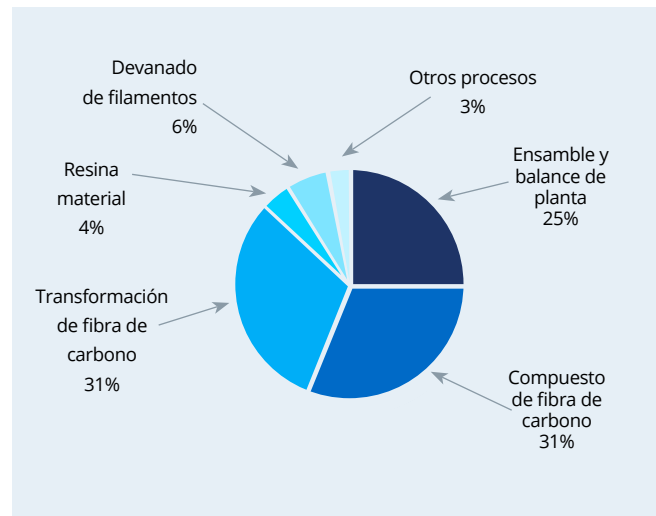


Tabla 2-4. Evaluación del potencial de manufactura de equipo de almacenamiento de hidrógeno.

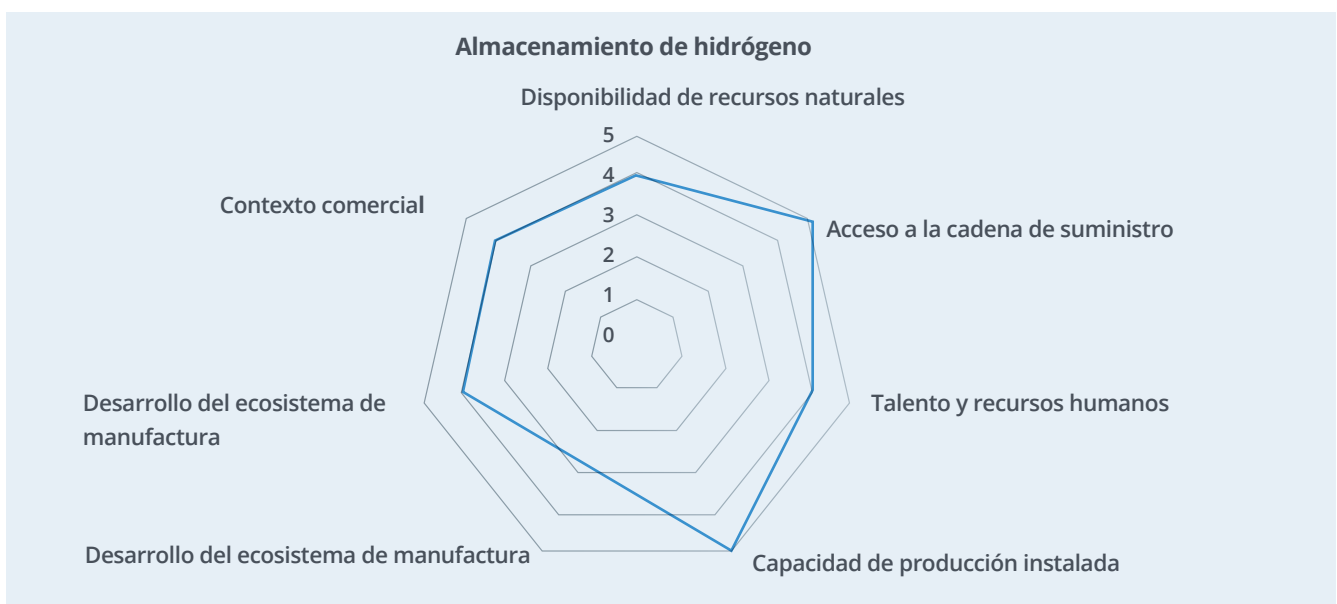
Criterio	Puntaje	Argumento
Disponibilidad de recursos naturales	4	México es el 15º país productor de acero y el 6º mayor productor de fibra de carbono del mundo. Esto lo posiciona como un actor relevante para la fabricación de contenedores de almacenamiento de hidrógeno.
Acceso a la cadena de suministro	5	México actualmente produce contenedores de acero y tiene acceso a la materia prima para fabricar contenedores de mayor presión (fibra de carbono).
Talento y recursos humanos	4	La fabricación de tanques de presión y el cumplimiento de las normas ASME tienen madurez en México. Los recursos humanos sólo tendrían que adaptar estos conocimientos a la fabricación de tanques compuestos.
Capacidad de producción instalada	5	México ya cuenta con fábricas dedicadas a la producción de tanques de presión para gases.
Desarrollo del ecosistema de manufactura	3	Al ser considerada una actividad manufacturera, la fabricación de tanques tiene un crecimiento “Business as Usual” en México.
Experiencia nacional en el desarrollo de nuevas cadenas de valor	4	La fabricación de recipientes a presión pertenece actualmente al sector de la fabricación de metalmecánica. Tanto las técnicas de fabricación como el cumplimiento de las normas cambian constantemente.
Contexto comercial con los países consumidores potenciales	4	México mantiene buenas relaciones comerciales con potenciales consumidores de tanques de hidrógeno como Alemania, Japón y Corea, sin embargo, ellos también tienen capacidades de producción y potencial de autonomía en este sector.
<b>Puntaje ponderado</b>	<b>4.05</b>	

### 2.4.1. Potencial de fabricación de equipos de almacenamiento de hidrógeno

Los resultados del análisis de cada criterio para la fabricación de equipos de acondicionamiento y transporte se presentan en la siguiente tabla, describiendo brevemente el argumento detrás de la puntuación para cada criterio.

México está bien posicionado para la producción de equipos de almacenamiento de hidrógeno, debido a que ya produce tanques de almacenamiento de alta presión para otros gases industriales y cuenta con las materias primas para producir tanques de almacenamiento de H<sub>2</sub>. Esto le da al país puntuaciones sólidas entre la mayoría de los criterios y una capacidad de producción instalada excepcional, lo que resulta en una **calificación ponderada de 4.05/ 5 para sistemas de almacenamiento de hidrógeno**.

Figura 2-4. Gráfica de radar de puntajes para el potencial de manufactura de equipo de almacenamiento de H<sub>2</sub> en México.



### 2.5. Turbinas de generación eléctrica

Las turbinas de generación eléctrica que actualmente operan con gas natural podrían introducir hidrógeno en mezcla para generar energía, reduciendo las emisiones en comparación con la quema de gas natural puro y permitiendo utilizar la infraestructura existente.

El hidrógeno se ha utilizado en turbinas de gas durante décadas en refinerías, plantas petroquímicas que producen hidrógeno como subproducto. Los principales fabricantes de turbinas de gas están trabajando en la tecnología de combustión de hidrógeno en mezcla con gas natural o en su forma pura, para lo cual planean tener los equipos comercialmente disponibles para 2030.

Hay que tener en cuenta algunas preocupaciones técnicas. La densidad de energía volumétrica del hidrógeno es menor que la del gas natural (alrededor de 1/3), por lo que el sistema de combustión debe ajustarse para hacer espacio para el mayor flujo de gases que se necesita para compensar la diferencia de densidades y

entregar la misma tasa de potencia. Además, el hidrógeno se quema a temperaturas más altas y es más reactivo que el gas natural, lo que plantea desafíos adicionales en el control de la combustión.

Se espera que la demanda de turbinas eléctricas de hidrógeno crezca a nivel mundial para descarbonizar la matriz energética, especialmente en países donde la estrategia de adopción de hidrógeno las considera prioritarias, como Japón y los EE.UU., país que ha planeado que cerca de 7 GW de turbinas de gas impulsadas por hidrógeno entren en operación para 2030.<sup>1</sup>

#### 2.5.1. Potencial de fabricación de turbinas de generación eléctrica de H<sub>2</sub> en México

Los resultados del análisis de cada criterio para la fabricación de equipos de acondicionamiento y transporte se presentan en la siguiente tabla, describiendo brevemente el argumento detrás de la puntuación para cada criterio.

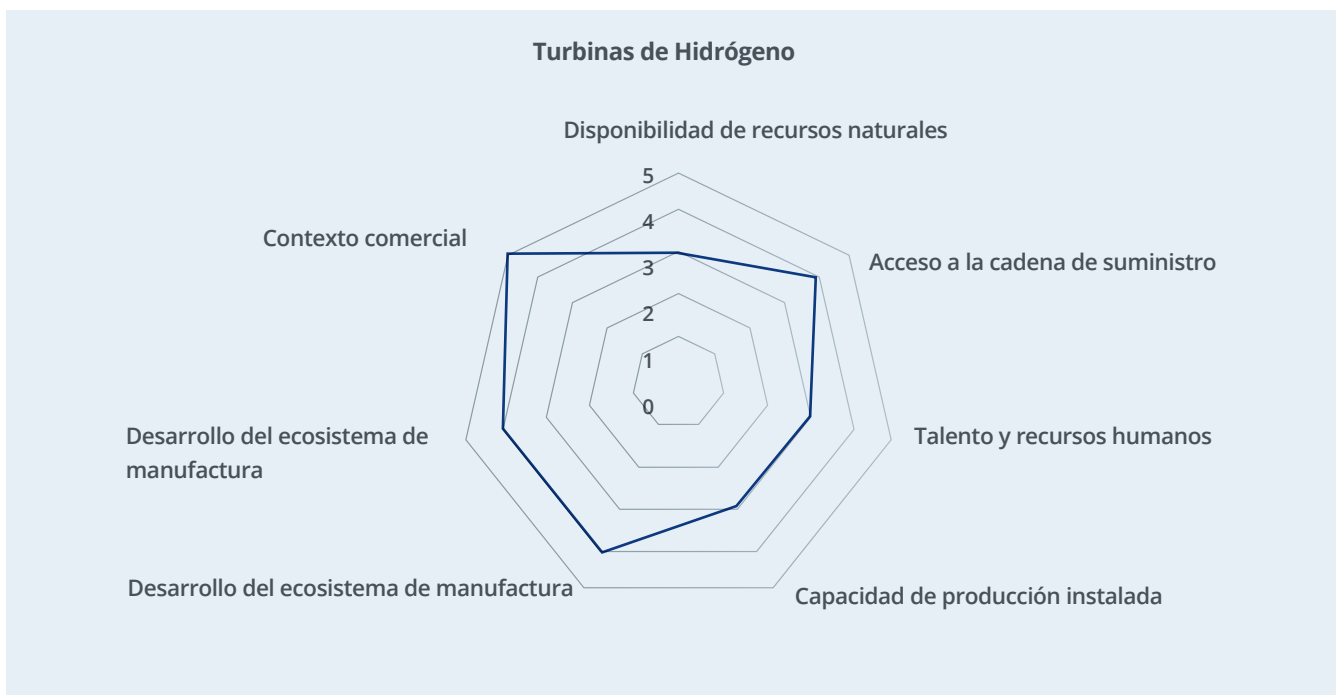
<sup>1</sup> BNEF, Hidrógeno: La economía de la generación de energía, 2020.

Tabla 2-5. Evaluación del potencial de manufactura de turbinas de generación eléctrica de hidrógeno.

Criterio	Puntaje	Argumento
Disponibilidad de recursos naturales	3	México cuenta con recursos naturales como cobre y acero para la fabricación de ciertos componentes, sin embargo, puede requerir la importación de otros recursos.
Acceso a la cadena de suministro	4	Dada su creciente participación en el sector aeroespacial, México tiene acceso a cadenas de suministro para la fabricación de turbinas de generación de energía eléctrica.
Talento y recursos humanos	3	México tiene experiencia en la operación y mantenimiento de turbinas de ciclo combinado (personal de CFE, Siemens, GE, etc.) y algunas capacidades de fabricación de turbinas (principalmente del sector aeroespacial). No obstante, sería necesario desarrollar nuevos talentos para la producción de estos equipos.
Capacidad de producción instalada	3	Debido a la participación del país en el sector aeronáutico, tiene experiencia en la fabricación de algunos componentes relacionados con turbinas.
Desarrollo del ecosistema de manufactura	4	No hay planes explícitos para la fabricación de turbinas de generación eléctrica, sin embargo, se prevé que la industria aeroespacial crezca significativamente. La producción de turbinas podría ser una industria paralela en crecimiento.
Experiencia nacional en el desarrollo de nuevas cadenas de valor	4	Además de la experiencia con el sector aeroespacial, en México existen capacidades ampliamente desarrolladas en la fabricación de equipos eléctricos como transformadores y equipos de regulación de energía.
Contexto comercial con los países consumidores potenciales	5	México tiene buenas relaciones comerciales con países que podrían demandar turbinas de energía de hidrógeno, como estados unidos. También tiene buenas relaciones con importantes empresas como General Electric y Siemens que podrían ver a México con interés en producir estos equipos.
<b>Puntaje ponderado</b>	<b>3.75</b>	

La experiencia, el personal y la infraestructura de México en la industria aeroespacial proporcionan una base para desarrollar capacidades productivas de turbinas de generación eléctrica que podrían ser alimentados por hidrógeno. Sin embargo, hay brechas de talento e infraestructura que deben cerrarse para hacer que México sea más competitivo, lo que resulta en una **calificación ponderada de 3.75/5 para la fabricación de turbinas eléctricas de hidrógeno.**

Figura 2-5. Gráfica de radar de puntajes para el potencial de manufactura de turbinas eléctricas de hidrógeno en México.



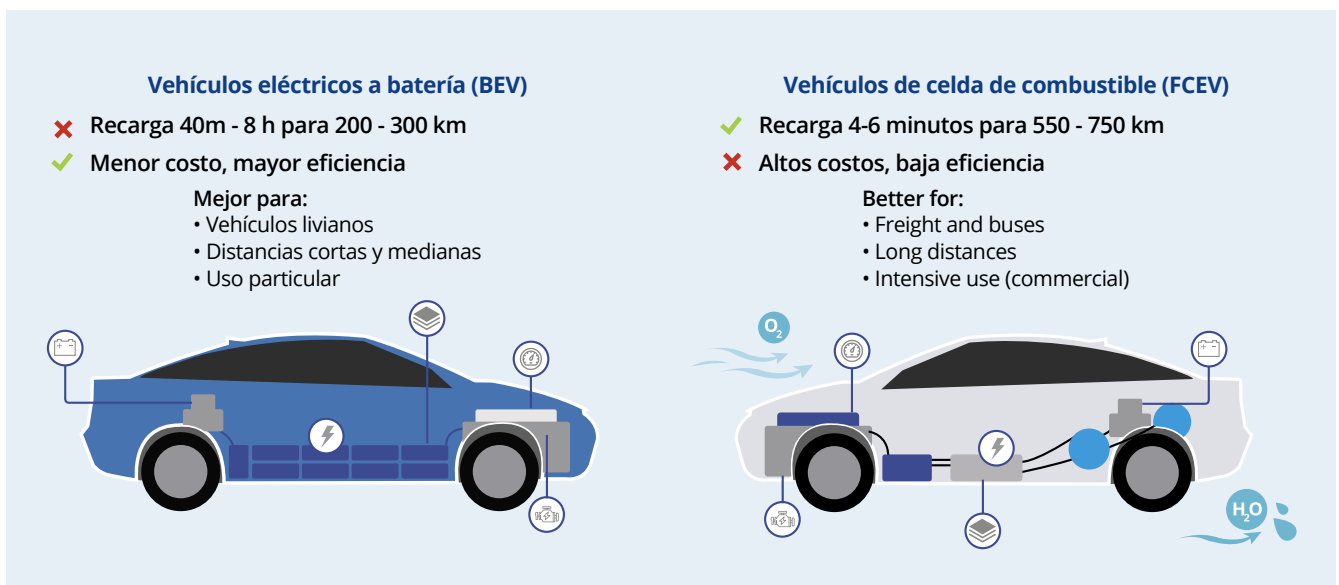
### 2.6. Vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV)

Los vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV) almacenan su energía en forma de hidrógeno, mismo que usan para generar electricidad en una celda de combustible, que a su vez impulsa un tren motriz eléctrico para propulsar el vehículo. Si se alimentan con hidrógeno verde, producido con la electrólisis del agua utilizando electricidad renovable, proporcionan una alternativa de transporte de cero emisiones, teniendo

agua como único gas de escape. Esto se traduce en una tendencia a comparar FCEV con vehículos eléctricos de batería (BEV) como alternativas para la electrificación y descarbonización del transporte terrestre.

Esto hace que los FCEVs sean especialmente competitivos para el transporte de pasajeros de larga distancia, transporte de carga regional y nacional y en general, para vehículos cuyas operaciones tienen requisitos intensivos de energía o de disponibilidad.

Figura 2-6. Comparación de vehículos eléctricos a batería y de celda de combustible.



#### 2.6.1. Potencial de fabricación de FCEV en México

Los resultados del análisis de cada criterio para la fabricación de equipos de acondicionamiento y transporte se presentan en la siguiente tabla, describiendo brevemente el argumento detrás de la puntuación para cada criterio. La fabricación de FCEVs en México considera el montaje de los vehículos, no la producción de todos los componentes, integrando tanto las piezas producidas a nivel nacional como las importadas de acuerdo con su costo y suministro.

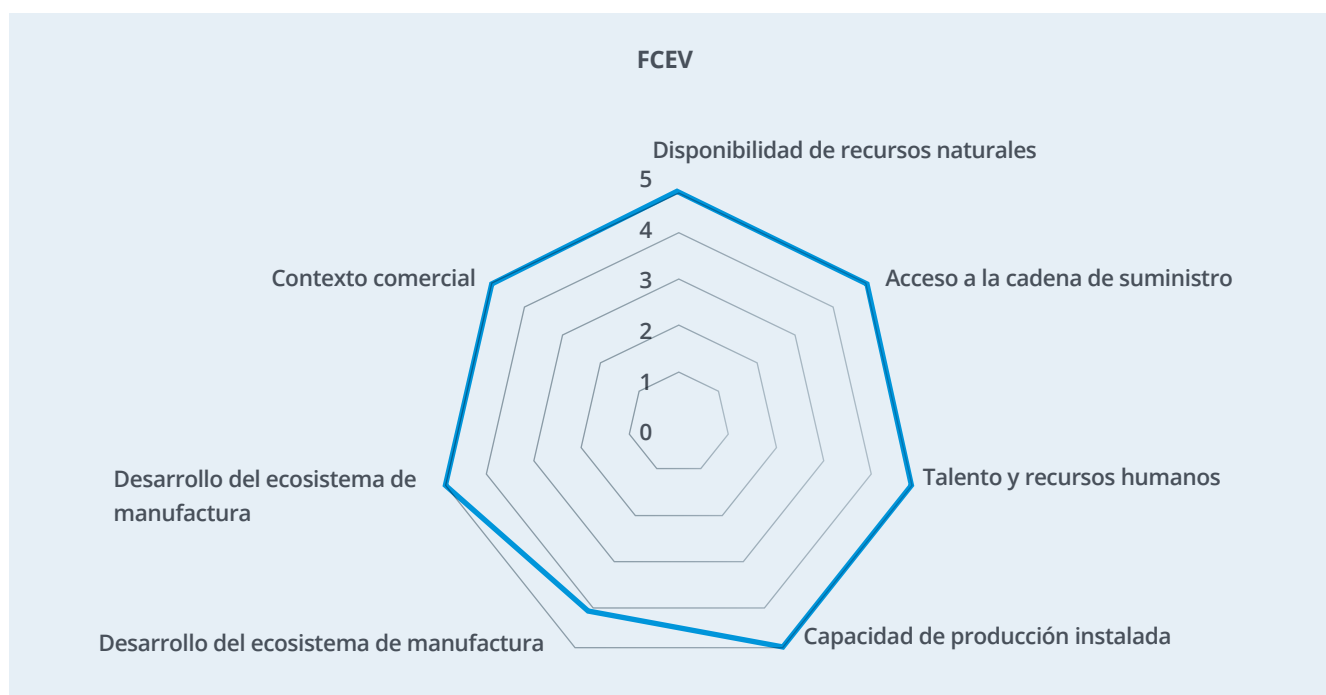


Tabla 2-6. Evaluación del potencial de manufactura de vehículos eléctricos de celda de combustible de hidrógeno.

Criterio	Puntaje	Argumento
Disponibilidad de recursos naturales	5	México es el cuarto mayor exportador de autopartes, de los cuales más del 20% son completamente metálicas.
Acceso a la cadena de suministro	5	México tiene pleno acceso a las cadenas de suministro de la industria automotriz con Estados Unidos, Europa y Asia.
Talento y recursos humanos	5	El 1,8% de la población económicamente activa trabaja en el sector automotriz en México.
Capacidad de producción instalada	5	México cuenta con 26 plantas en el sector automotriz de 12 grandes fabricantes de automóviles, distribuidas en 15 estados del país.
Desarrollo del ecosistema de manufactura	4	El sector automotriz cuenta con un ecosistema de desarrollo óptimo en México. Durante los últimos 5 años tres nuevas grandes plantas han iniciado operaciones en el país (BMW, Audi y Toyota).
Experiencia nacional en el desarrollo de nuevas cadenas de valor	5	México tiene experiencia reciente en la instalación/adaptación de líneas de montaje de vehículos eléctricos, con la planta de Nissan Leaf en Aguascalientes y el reciente anuncio de que la planta de Ford producirá el nuevo Mustang Match-E en el Estado de México.
Contexto comercial con los países consumidores potenciales	5	México se encuentra en el top 10 mundial de la mayoría de las actividades dentro del sector automotriz (exportador de vehículos, autopartes, productor de motores, etc. ), todas inscritas en el marco del comercio internacional de vehículos y de acuerdos comerciales específicos.
<b>Puntaje ponderado</b>	<b>4.80</b>	

La vasta experiencia, capacidad instalada, mano de obra calificada y renombre de México como fabricante de automóviles y componentes de vehículos lo posicionen para establecer la capacidad de fabricación de FCEV, lo que se refleja en una calificación ponderada de 4.80/5.

Figura 2-7. Gráfica de radar de puntajes para el potencial de manufactura de vehículos de hidrógeno en México.

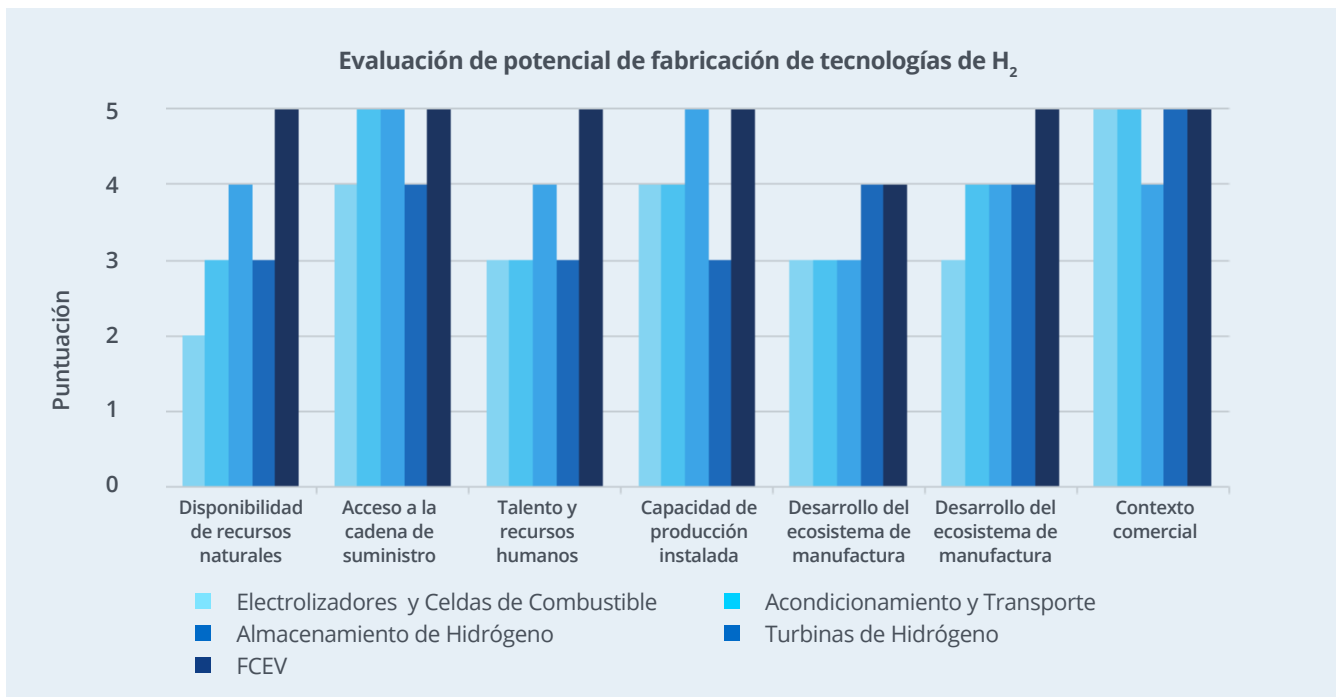


### 2.7. Evaluación del potencial de fabricación de tecnologías de hidrógeno

Las industrias metal mecánica, de fabricación de componentes para el manejo de gases, aeroespacial y automotriz proporcionan la base para la competitividad potencial para fabricar tecnologías de hidrógeno en México.

Estas industrias asentadas proporcionan al país cadenas de valor altamente establecidas, infraestructura y experiencia de fabricación, recursos humanos y un alto grado general de adaptabilidad para producir nuevos equipos y desarrollar cadenas de valor y ecosistemas de fabricación, como se refleja en la comparación de calificaciones de las tecnologías estudiadas que se muestra en la Figura 2-8.

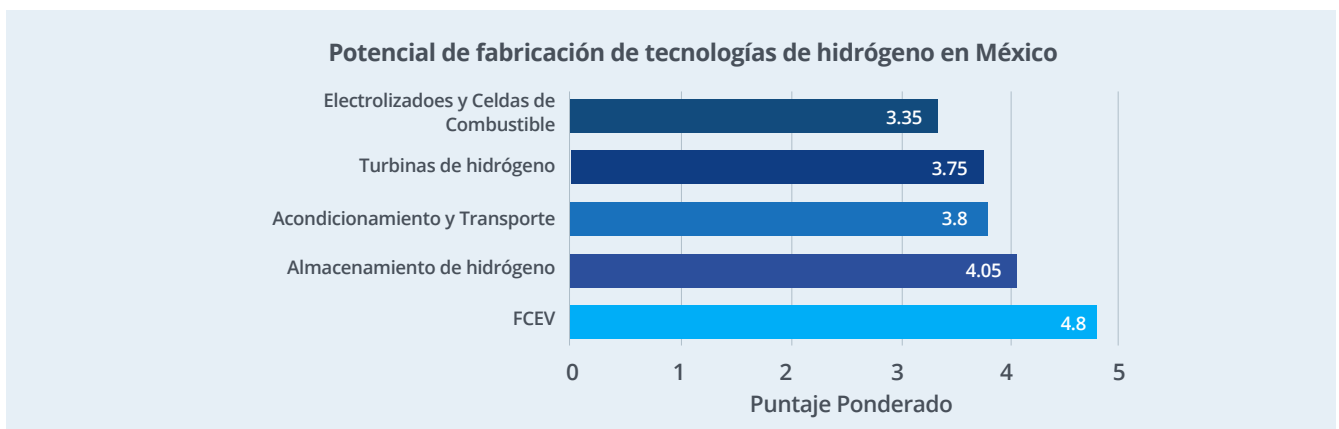
Figura 2-8. Comparativo del potencial de fabricación de tecnologías del hidrógeno en Mexico por criterios de evaluación.



El análisis muestra a México como un país con potencial para ser competitivo en la fabricación de turbinas eléctricas de hidrógeno, así como equipos de acondicionamiento, transporte y almacenamiento, lo que requerirá el desarrollo de talento dedicado y el fortalecimiento de los ecosistemas de fabricación de tecnologías relacionadas en un mercado de producción de componentes y equipos de hidrógeno.

La industria automotriz podría continuar prosperando en el país, aprovechando un ecosistema de fabricación robusto para producir FCEV. Al poseer una ubicación estratégica en América del Norte y el acceso a los océanos Atlántico y Pacífico, México muestra el potencial de posicionarse como un fabricante líder de FCEVs en todo el mundo.

Figura 2-9. Evaluación de la competitividad del potencial de fabricación de tecnologías de hidrógeno en México por calificación ponderada.



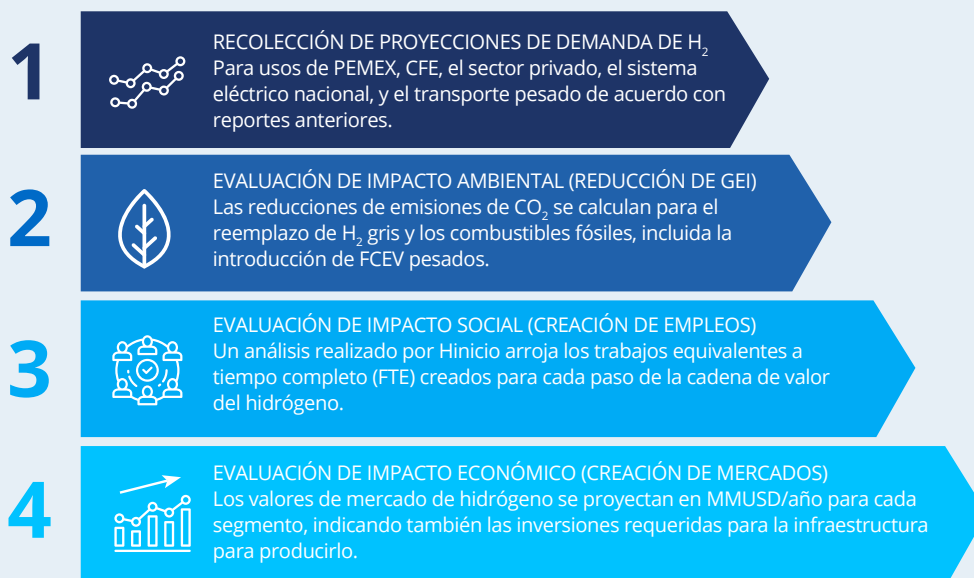
### 3. Beneficios sociales, ambientales y económicos de la creación de una cadena de valor de hidrógeno verde en México

Esta sección tiene como objetivo cuantificar el impacto social, ambiental, y de desarrollo económico que México podría tener mediante el desarrollo de una cadena de valor de hidrógeno verde siguiendo los hallazgos en los informes anteriores de esta serie.

#### 3.1. Metodología

Se siguieron una serie de acciones para evaluar el impacto en cada dimensión. La base para los análisis son las proyecciones de demanda de hidrógeno verde realizadas en las actividades 2,3,4 y 5 de esta serie, que proyectan la demanda de hidrógeno verde en México hacia 2050 para un amplio espectro de aplicaciones que incluyen generación de energía eléctrica, transporte público de pasajeros, transporte de carga, inyección en la red de gasoductos, producción de combustibles sintéticos, minería, energía térmica en diferentes industrias y uso como materia prima química para refinación, producción de amoníaco y resinas sintéticas, entre otras.

Figura 3-1. Proceso metodológico para cuantificar los impactos ambientales, sociales y económicos de la demanda de hidrógeno verde en México.



#### • Impacto ambiental:

El potencial de emisiones de GEI que podría evitarse por el reemplazo de tecnologías convencionales como los combustibles fósiles o el hidrógeno proveniente del reformado de metano por hidrógeno verde. El impacto se mide en toneladas de dióxido de carbono equivalente evitadas.

#### • Impacto económico:

A través de los cálculos de LCOH que se realizaron para cada aplicación de H<sub>2</sub> en los informes anteriores, se estimará un tamaño potencial del mercado de hidrógeno verde para México en 2030 y 2050 en millones de dólares por año.



### • Impacto social:

Con la información obtenida del análisis de impacto ambiental y de impacto económico, se describirán algunos beneficios sociales que el hidrógeno verde podría traer a México, principalmente enfocados en la generación de empleo.

Las metodologías y supuestos específicos para cuantificar los impactos en cada ámbito se describen a continuación.

### 3.2. Impacto ambiental

El impacto ambiental más notable asociado con el hidrógeno verde es la reducción de emisiones de carbono y de otros gases de efecto invernadero cuando se produce y cuando se consume, ya que sus principales insumos son las energías renovables (principalmente eólica y solar fotovoltaica) y agua. El impacto considera la reducción o eliminación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que incluyen no sólo al CO<sub>2</sub> y al metano, sino también los óxidos nitrosos, el ozono y otros, y que se cuantifican en términos de CO<sub>2</sub> equivalente. EL CO<sub>2</sub> equivalente correspondiente a la cantidad de gas emitido multiplicado por un factor de emisión en relación con el CO<sub>2</sub>. Este impacto no se centra en la contribución individual de cada componente gaseoso, sino más bien en la huella de carbono general, como se hace referencia en varias fuentes mencionadas a continuación.

Para realizar esta evaluación, los usos finales se dividen en dos categorías en función del uso de hidrógeno verde: (1) sustitución de hidrógeno gris y (2) sustitución de combustibles fósiles. La segunda categoría puede dividirse aún más para crear una tercera: (3) el transporte terrestre.

#### 3.2.1.Reducción de GEI por sustitución del hidrógeno gris

Los usos finales analizados donde el hidrógeno verde reemplaza directamente al hidrógeno producido a partir del gas natural son: como materia prima para refinerías y producción de amoníaco (principalmente para fertilizantes), vidrio flotado, resinas sintéticas, grasas alimentarias y otros usos dentro de la industria química. Más del 98% de la demanda proyectada de hidrógeno verde y la reducción de emisiones asociada mediante la sustitución del hidrógeno gris se encuentran en la refinación y producción de amoníaco, actividades realizadas por PEMEX en México, que serán el foco de este análisis.

La producción de hidrógeno por reformado de metano de vapor (SMR) tiene una intensidad de GEI equivalente en carbono de 9,26 kgCO<sub>2</sub>e/kgH<sub>2</sub>, según la investigación del Laboratorio Nacional Argonne<sup>2</sup> en los EE.UU., que considera las emisiones tanto de la combustión como de la conversión química dentro del proceso de producción de hidrógeno.

El hidrógeno verde puede tener niveles de neutralidad de carbono variable dependiendo de las emisiones reducidas en su producción en relación con el método convencional, que puede variar desde el 60%, el mínimo requerido por CertifHy<sup>3</sup> para ser considerado hidrógeno verde, hasta el 100% cuando se produce con electrólisis suministrada en su totalidad por fuentes de energía renovables de cero carbono.

Para explorar el potencial máximo de emisiones se considerará hidrógeno 100% verde o cero emisiones. Las reducciones de GEI con diferentes niveles de neutralidad de carbono serían proporcionales al nivel de neutralidad considerado.

El CO<sub>2</sub> evitado por la introducción de hidrógeno verde en refinerías y la producción de amoníaco en México superaría los 180 mil tonCO<sub>2</sub>e/año para 2030 y alcanzaría más de 3.2 millones de tonCO<sub>2</sub>e/año para 2050, como se muestra en la Figura 3-2 y Figura 3-3.



<sup>2</sup> Argonne National Laboratory, Updates of Hydrogen Production from SMR Process in GREET 2019.

<sup>3</sup> CertifHy es el primer esquema de certificación de Garantías de Origen desarrollado por un consorcio liderado por Hincio para la Unión Europea a través del FCH-JU

Figura 3-2. Proyección de emisiones de GEI evitadas por la sustitución del hidrógeno gris por hidrógeno verde.

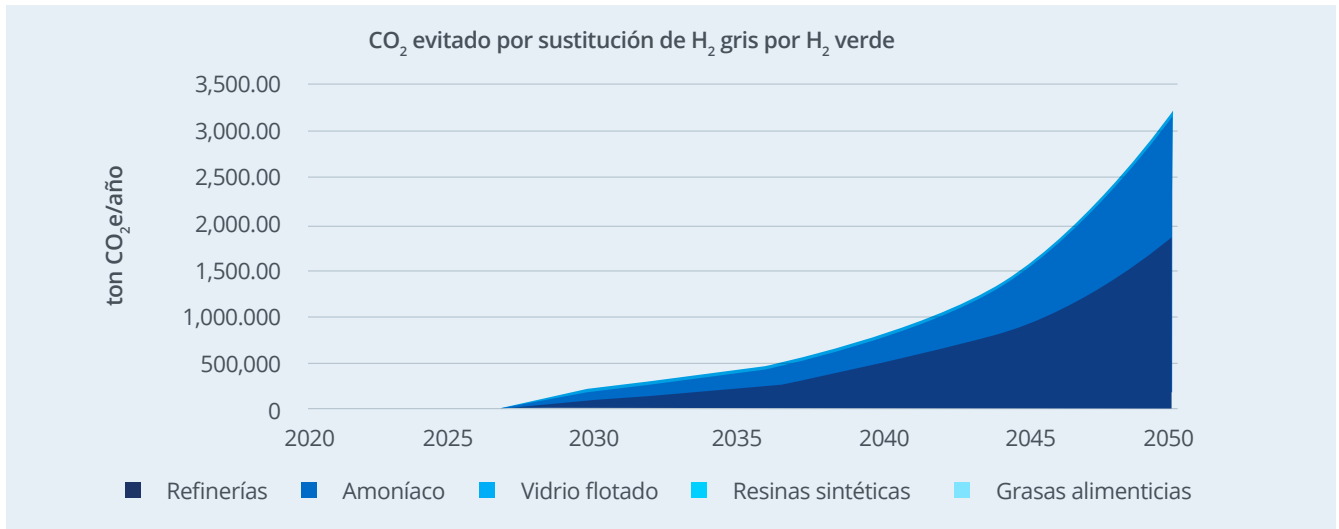
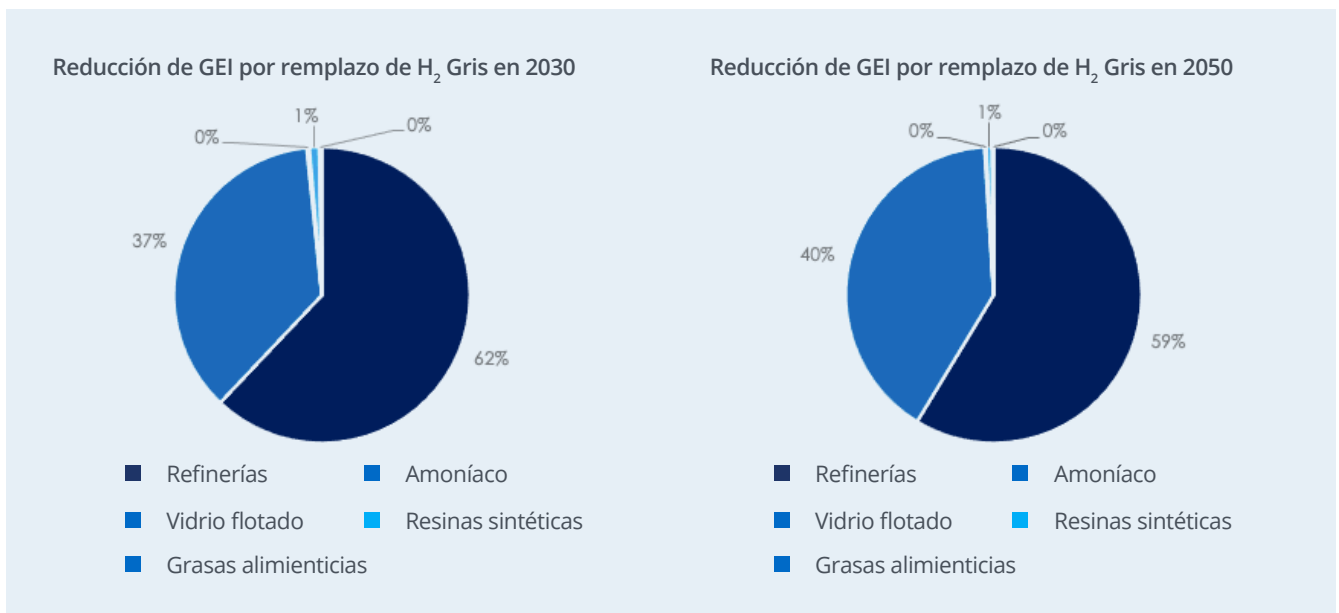


Figura 3-3. Contribución porcentual a la reducción de emisiones de GEI del reemplazo de H<sub>2</sub> gris por H<sub>2</sub> verde en 2030 y 2050.



### 3.2.2. Reducción de GEI por reemplazo de los combustibles fósiles

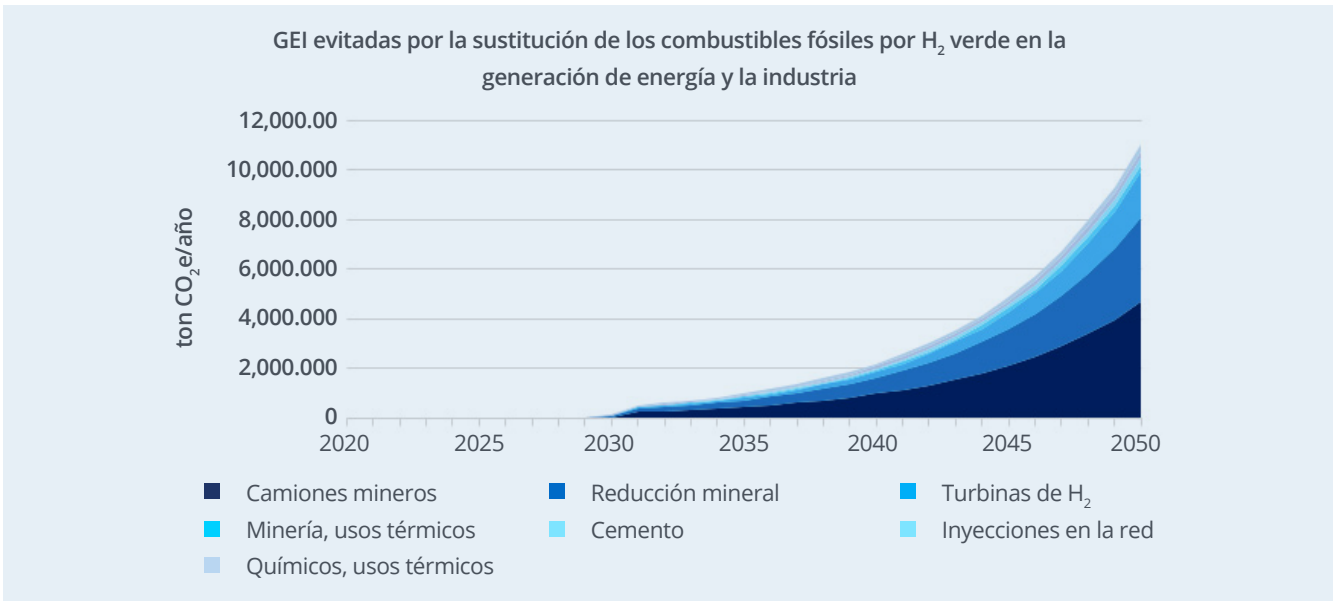
El hidrógeno verde puede reemplazar a los combustibles fósiles en aplicaciones como la generación de energía eléctrica, el calor en la industria y la movilidad. La movilidad se evaluará de forma independiente en la siguiente sección, mientras que ahora el enfoque será en las aplicaciones de energía e industria.

El hidrógeno verde puede reemplazar al gas natural en turbinas de generación eléctrica, cuando se inyecta en gasoductos y en aplicaciones térmicas en industrias como el cemento y la minería. En todos estos usos finales, el hidrógeno reemplaza al contenido energético del gas natural o combustible fósil que sustituye, y la reducción

de las emisiones de GEI puede explicarse por el cambio en la intensidad de carbono de la energía provista a los procesos, expresada en MMBTU (principalmente en el mercado del gas natural), o por la cantidad de hidrógeno alimentado en kg. El gas natural tiene una intensidad de GEI de 61,6 kg de CO<sub>2</sub>e/MMBTU, como se encuentra en los datos de Veolia para la ciudad de Winnipeg, mismos que podrían reemplazando en un 100% al gas por hidrógeno verde.

El gas natural también se utiliza como reactivo químico en la reducción de minerales metálicos, como el hierro. La introducción de hidrógeno verde podría reducir el impacto de 2,86 kgCO<sub>2</sub>e/kgGN del gas natural empleado en este proceso.

Figura 3-4. Proyección de emisiones de GEI evitadas por la sustitución de los combustibles fósiles por hidrógeno verde en la generación de energía y la industria.



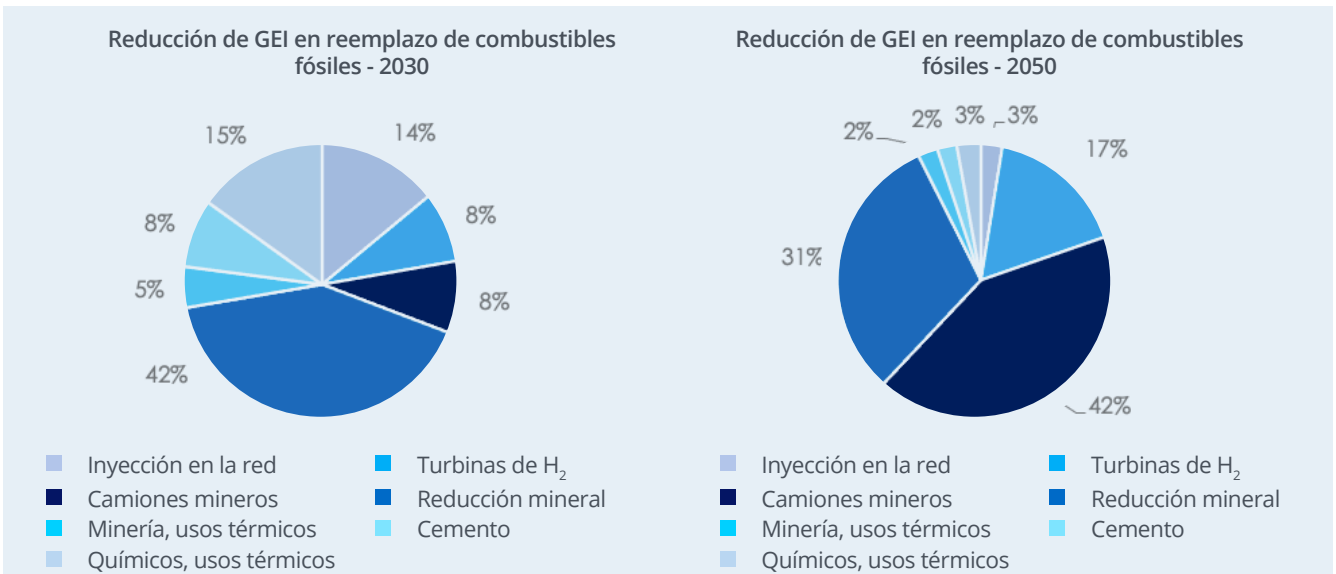
Para los camiones mineros, un informe de la Corporación Chilena de Fomento de la Producción (CORFO) estimó que las emisiones de cada camión de extracción minera o CAEX<sup>4</sup> son de 3.100 tonCO<sub>2</sub>/CAEX·año. El informe sobre oportunidades de hidrógeno para el sector privado estimó que el tamaño de la flota de CAEX FC en México podría alcanzar las 1.500 unidades para 2050.

El mayor potencial de reducción de GEI hacia mediados de siglo se puede observar en la industria minera y metalúrgica, que representa las tres cuartas partes del potencial de reducción de CO<sub>2</sub>. La introducción de

camiones mineros de celda de combustible podría reducir 4,6 millones de tonCO<sub>2</sub>e/año para 2050 y la introducción de hidrógeno verde en la reducción de minerales podría contribuir con 3,3 tonCO<sub>2</sub>e/año en el mismo año.

La quema de hidrógeno en centrales térmicas podría ser la segunda actividad de mayor reducción de emisiones de GEI con hasta 1,9 millones de tonCO<sub>2</sub>e/año para 2050. Inyectar hidrógeno en la red de gas y utilizarlo en la producción de cemento y aplicaciones térmicas en la industria química reduciría conjuntamente 0,84 millones de tonCO<sub>2</sub>e/año para 2050.

Figura 3-5. Contribución porcentual a la reducción de emisiones por el reemplazo de combustibles por H<sub>2</sub> verde en aplicaciones térmicas e industriales en 2030 y 2050.



<sup>4</sup> CAEX: minería arrastrar camión, del español Camiones de Extracción

La sustitución de los combustibles fósiles por hidrógeno verde para aplicaciones en la generación de energía eléctrica y en la industria tiene el potencial de reducir hasta 7,6 millones de ton CO<sub>2</sub>e/año en 2050, con alrededor de tres cuartas partes de la reducción provenientes de la industria minera y metalúrgica, en su mayoría camiones mineros, y menos de una quinta parte a la generación de energía en turbinas de hidrógeno.

### 3.2.3. Reducción de GEI en el transporte terrestre

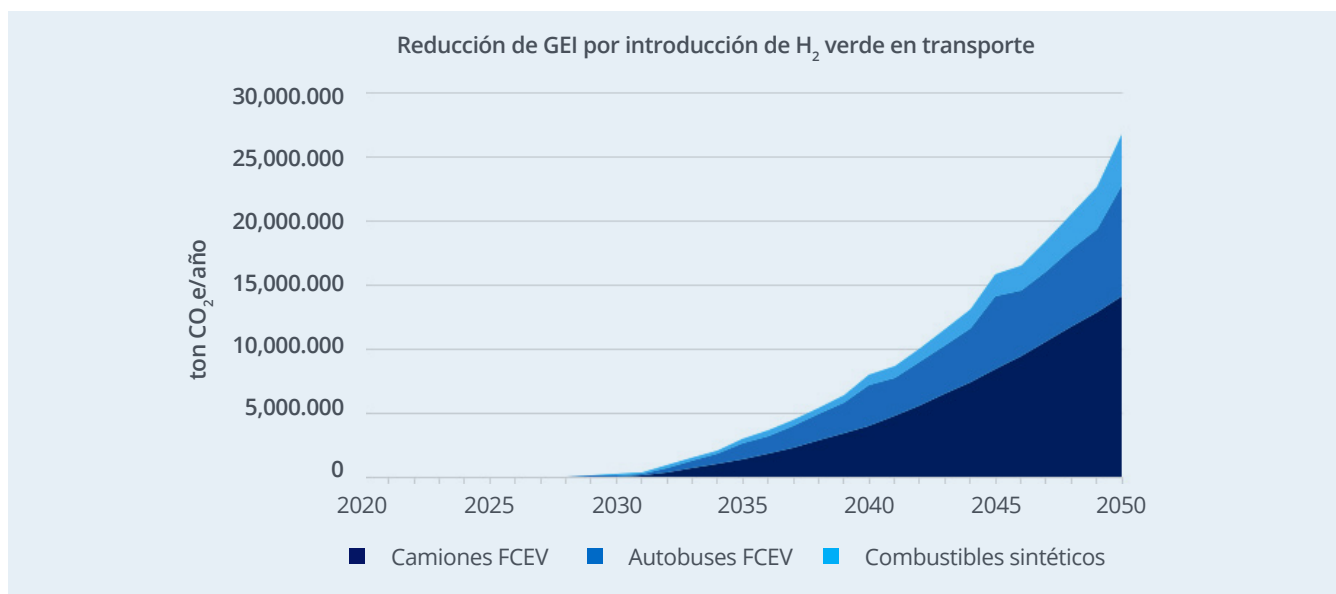
El hidrógeno podría reemplazar a los combustibles fósiles en el transporte terrestre principalmente a través de dos vías: la adopción de **FCEV de hidrógeno** y **los combustibles sintéticos**. Los vehículos de carga pesada estudiados en este informe son dos: autobuses de transporte público y camiones de carga pesada de larga distancia.

Los FCEV son vehículos eléctricos que almacenan hidrógeno como portador de energía y lo utilizan para generar electricidad en una celda de combustible, que a su vez impulsa un tren motriz eléctrico. Dada su alta autonomía, cortos tiempos de reabastecimiento de combustible y su baja pérdida de capacidad por peso y volumen en relación con los vehículos convencionales con motor de combustión interna (ICEVs), se proyecta que sean altamente competitivos en aplicaciones de movilidad pesada, superando a los vehículos eléctricos de batería (BEV) en rendimiento técnico y tanto a ICEV como a BEV en su costo total de posesión alrededor de 2030.

Para calcular la reducción de emisiones de GEI de los FCEV en México, se consideran las proyecciones de demanda de hidrógeno del informe anterior sobre las oportunidades de hidrógeno en el sector del transporte tanto para los autobuses de transporte público como para los camiones de carga pesados hacia 2050, así como la flota de FCEV proyectada para estos segmentos.

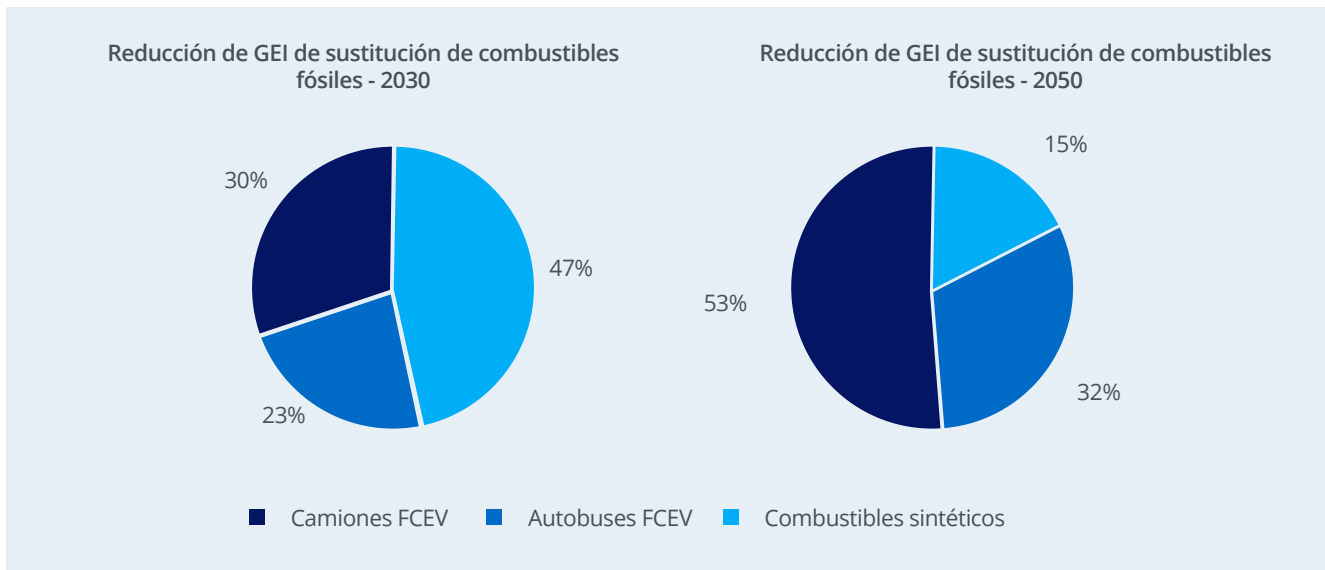
La reducción proyectada de CO<sub>2</sub> puede obtenerse en función de la evolución de la eficiencia de los FCEV y la proyección en la evolución de los estándares de emisiones para el transporte en México. Para ello se consideran las Normas Europeas de Emisiones para autobuses<sup>5</sup> y camiones de la siguiente manera: Euro IV (la norma vigente en México, publicada en 2005) para la década de 2020 y Euro V (publicada en 2008) y Euro VI (con fecha de 2012) para las décadas de 2030 y 2040, respectivamente. Siguiendo estas consideraciones se obtiene una intensidad media de carbono de **967 gCO<sub>2</sub>e/km-vehículo para autobuses** y **679 gCO<sub>2</sub>e/km-vehículo para camiones en 2021-2050**.

Figura 3-6. Proyección de la reducción de emisiones de GEI por la adopción de la movilidad de hidrógeno en el transporte terrestre.



Los combustibles sintéticos (syn-fuels) son la segunda vía para el uso de hidrógeno como sustituto de los combustibles fósiles en la movilidad. Los combustibles sintéticos se producen combinando hidrógeno verde con CO<sub>2</sub> proveniente de sistemas de captura a través de un proceso químico llamado Fischer-Tropsch. Los combustibles sintéticos son idénticos en composición a sus homólogos fósiles, pero sin emisiones netas de carbono. Una vez desplegados, podrían usarse fácilmente en vehículos que funcionen con gasolina, diésel u otros hidrocarburos, principalmente en sectores como la aviación, donde la electrificación y el uso directo del hidrógeno aún no son técnicamente posibles. **Cada litro de queroseno sustituido por combustibles sintéticos evita la emisión de 2,79 kgCO<sub>2</sub>e/L.**

<sup>5</sup> Comisión Europea, Reglamento (UE) n° 582/2011 de la Comisión.

Figura 3-7. Contribución porcentual a la reducción de emisiones por la adopción del H<sub>2</sub> verde en el sector transporte en 2030 y 2050

Reemplazar los ICEV por FCEV y los combustibles fósiles en la aviación por combustibles sintéticos podría evitar la emisión de 280 mil tonCO<sub>2</sub>e/año en 2030, de los cuales casi la mitad correspondería al uso de combustibles sintéticos. Sin embargo, se espera que la adopción de FCEV se acelere después de 2030 a medida que alcancen la paridad de costos con ICEV y BEV, aumentando aún más su demanda y su contribución a la descarbonización.

Para 2050, la sustitución de los ICEV por FCEV y el uso de combustibles sintéticos en la aviación podría reducir las emisiones de GEI en hasta 26,7 tonCO<sub>2</sub>e/año, de los cuales alrededor de la mitad provendrían de camiones de carga FCEV, un tercio de autobuses FCEV y un 15% del uso de combustibles sintéticos.

### 3.3. Impacto Social

Los impactos sociales de la adopción del hidrógeno verde en México podrían tener una variedad de ángulos desde los cuales ser estudiados. Este informe se centra en la creación de puestos de trabajo asociados a la creación de la economía del hidrógeno en México.

El análisis explora la investigación existente que estima la creación de empleo con el desarrollo de proyectos de hidrógeno a partir de fuentes como Navigant Consulting, Element Energy y CE Delft.

Este análisis arroja los puestos de trabajo equivalentes a tiempo completo (FTE) creados para cada paso de la cadena de valor del hidrógeno, incluida la construcción e instalación de infraestructura, la operación y el mantenimiento (O&M) de equipos, la fabricación de electrolizadoras, y el despliegue y mantenimiento de la flota de hidrógeno FCEV, así como la infraestructura de reabastecimiento de H<sub>2</sub> requerida.

Se asigna un número determinado de puestos de trabajo equivalentes a tiempo completo (FTE) a cada paso de la cadena de valor del hidrógeno, divididos en puestos de trabajo directos e indirectos creados por la capacidad instalada de electrolisis, el despliegue y mantenimiento de la infraestructura de producción de hidrógeno verde y de puestos de trabajo por millón de dólares invertidos en infraestructura de repostaje de hidrógeno para vehículos de celda de combustible. Los resultados de este análisis se muestran en las siguientes tablas.



Tabla 3-1. Empleos creados por el despliegue de infraestructura de producción de hidrógeno verde en México.

Producción de hidrógeno	Empleos 2030	Empleos 2050
<b>Construcción e Instalación</b>	<b>765</b>	<b>34,701</b>
Trabajos asociados a la maquinaria y al equipo	438	19,849
Trabajos asociados a los materiales eléctricos	67	3,054
Trabajos asociados a la construcción y obras civiles	67	3,054
Trabajos asociados a otros servicios técnicos	34	1,527
Puestos de trabajo asociados a los servicios de I+D	34	1,527
Trabajos asociados a servicios no técnicos	34	1,527
Trabajos asociados a la maquinaria y al equipo	18	833
Trabajos asociados al transporte por ductos	50	2,290
Trabajos asociados a la construcción y obras civiles	9	416
Trabajos asociados a otros servicios técnicos	9	416
Trabajos asociados a servicios no técnicos	5	208
<b>O&amp;M</b>	<b>356</b>	<b>16,154</b>
Trabajos asociados a los servicios energéticos	177	8,012
Trabajos asociados con el reemplazo de equipos	44	2,003
Trabajos asociados a otros servicios energéticos	27	1,228
Trabajos asociados al transporte por tuberías	7	307
Trabajos asociados a los costos energéticos	88	3,990
Trabajos asociados con el reemplazo de equipos	14	614
<b>Fabricación Nacional de Electrolizadores</b>	<b>475</b>	<b>7,739</b>
Trabajos en la fabricación de equipos para uso nacional	475	7,739
Trabajo en la fabricación de equipos para la exportación	0	0
<b>Total</b>	<b>1,596</b>	<b>58,594</b>

Tabla 3-2. Empleos creados en la fabricación de FCEVs en México.

FCEVs – Industria automotriz	Empleos 2030	Empleos 2050
Empleos directos creados por la industria automotriz	125	9,268
Empleos indirectos creados por la industria automotriz	60	4,512
<b>Total</b>	<b>186</b>	<b>13,780</b>

Tabla 3-3. Empleos creados por la construcción y mantenimiento de HRS en México.

Estaciones de recarga de hidrógeno (HRS)	Empleos 2030	Empleos 2050
<b>Empleos directos</b>	<b>90</b>	<b>4,580</b>
Trabajos asociados con la construcción e instalación de HRS	5	253
Operación y mantenimiento de HRS	85	4,327
<b>Empleos indirectos</b>	<b>273</b>	<b>13,859</b>
Trabajos asociados con la construcción e instalación de HRS	82	4,185
Operación y mantenimiento de HRS	191	9,674
<b>Total</b>	<b>363</b>	<b>18,439</b>

Más de 90,000 personas podrían ser empleadas por la economía del hidrógeno en México en 2050. La mayor área de creación de empleo en México está en la producción de hidrógeno verde. La infraestructura proyectada como necesaria empleará a casi 1,600 personas para 2030 y cerca de 58,600 trabajadores para 2050.

Los trabajos se dividen en la etapa de construcción e instalación, operación y mantenimiento (O&M), y la fabricación de electrolizadores. La construcción y la

instalación consideran el empleo en la fabricación y suministro de maquinaria y equipo, materiales eléctricos, construcción y obras civiles, servicios de I + D y otros servicios técnicos y no técnicos asociados. Los trabajos en O&M para la infraestructura de producción de hidrógeno incluyen servicios de energía, reemplazo de equipos, transporte de hidrógeno y trabajos asociados con el reemplazo de equipos, como tubos, válvulas y tanques de almacenamiento.

Se proyecta que la segunda actividad de mayor generación de empleo sea la de infraestructura de reabastecimiento de hidrógeno, contratando a más de 360 personas en 2030 y creciendo a 18,400 para 2050, de las cuales alrededor de tres cuartas partes son empleos indirectos. Por último, la industria automotriz habría contratado a menos de 200 trabajadores en 2030, pero crecería hasta emplear a casi 13.800 trabajadores a mediados de siglo, de los cuales alrededor de dos tercios estarían empleados directamente en la fabricación de FCEV.

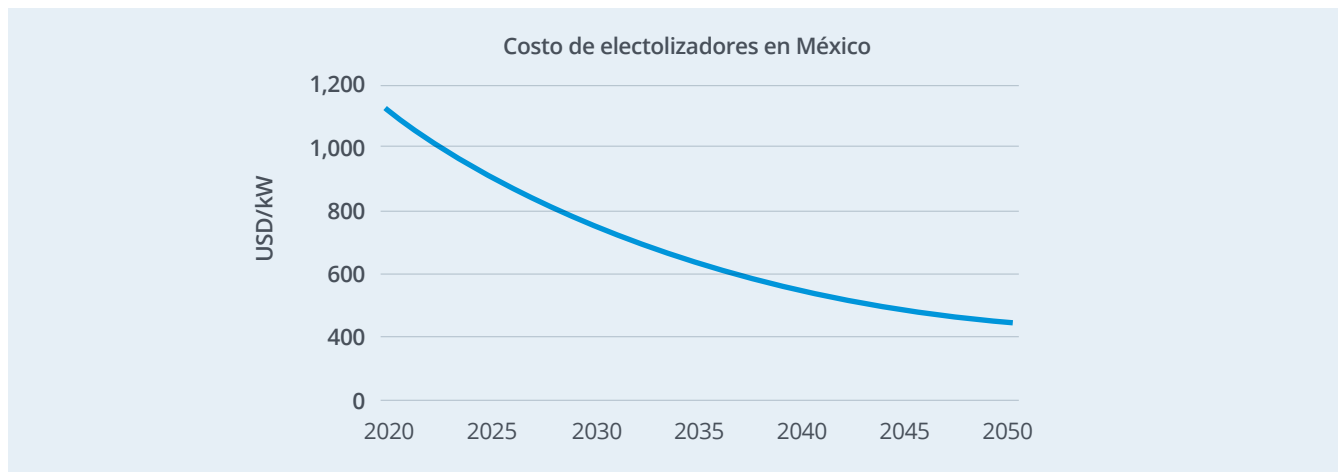
### 3.4. Impactos económicos

El impacto económico del desarrollo de una economía del hidrógeno en México se puede cuantificar por el tamaño de los mercados que se podrían crear a través de los diferentes segmentos y aplicaciones, así como a través de las inversiones requeridas en infraestructura de hidrógeno para satisfacer la demanda. En los informes anteriores se realizaron proyecciones de demanda de hidrógeno para diferentes usos finales en México hasta 2050, que pueden estar relacionadas con el tamaño del mercado H<sub>2</sub> y que proporcionan una medida cuantificada

utilizando el Costo Nivelado de Hidrógeno (LCOH) proyectado. Debe tenerse en cuenta que se deben considerar componentes de precios adicionales, como los costos de transporte, almacenamiento y suministro de hidrógeno en las estaciones de reabastecimiento de combustible, cuando corresponda, costos que varían dependiendo de la ubicación, impuestos y tarifas, y márgenes de servicios públicos para los diversos pasos dentro de la cadena de producción y suministro de hidrógeno.

La segunda medida de impacto económico considerada son las inversiones que la infraestructura de hidrógeno traerá al país, en particular los gastos de capital en las plantas de producción de hidrógeno. Incluye todas las inversiones necesarias para la puesta en marcha de las instalaciones de electrólisis, como las atribuidas los electrolizadores, procura y construcción, balance de planta, entre otras. Se utilizó un modelo propietario de Inicio que proyecta el costo total instalado por MW de capacidad de electrólisis, para estimar la reducción de costos de los electrolizadores los cuales comienzan en más de 1,000 USD / kW en 2021 y caen a casi un tercio de ese valor para 2050, como se muestra en la Figura 3-8.

Figura 3-8. Proyecciones de costos de electrólisis por capacidad instalada en México.



El impacto económico se divide en tres segmentos siguiendo la estructura de los informes anteriores: las actividades relacionadas con las empresas estatales, las actividades del sector privado.

La primera se centra en actividades relacionadas con las empresas estatales PEMEX y CFE. Se considera el uso de hidrógeno en refinerías, la producción de amoníaco y combustibles sintéticos<sup>6</sup> para PEMEX, y la inyección de hidrógeno en gasoductos y generación de energía en turbinas alimentadas con una mezcla de hidrógeno y gas natural para CFE. Estos segmentos representan los mayores tamaños de mercado concentrados entre los usos de hidrógeno en términos de tamaño de mercado por jugador dado el tamaño de las operaciones de ambas compañías, con un impacto conjunto esperado de aproximadamente 100 millones de dólares por año para 2030 y creciendo a más de 1.3 mil millones de dólares anuales en 2050 para suministrar hidrógeno a PEMEX y CFE.

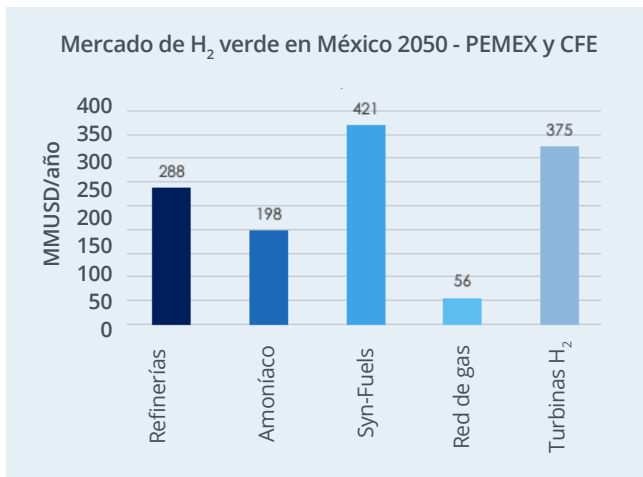
<sup>6</sup> Combustibles sintéticos son hidrocarburos artificialmente producido por reacción química entre H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> capturado. Tienen la misma composición química que sus contrapartes fósiles y son carbono neutrales.

Para PEMEX el impacto más notable para mediados de siglo se proyecta en la producción de combustibles sintéticos, con un tamaño de mercado de hidrógeno de 420 MMUSD/año, seguido por el uso de hidrógeno en refinerías con cerca de 290 MMUSD/año, y finalmente la producción de amoníaco con 200 MMUSD/año.

Considerando que la producción de combustibles sintéticos también podría ser realizada por actores privados, el impacto económico que actualmente solo persigue PEMEX tendría un impacto económico cercano a los quinientos millones de dólares anuales para el año 2050.

Para CFE se proyecta que el mayor impacto económico sea en la producción de electricidad en turbinas propulsadas por hidrógeno y gas natural. La producción de hidrógeno solo para este fin tendría un valor de 375 MMUSD/año para 2050, mientras que la inyección en la red de gas representa una oportunidad menor (debido a la menor competitividad económica), valorada en 56 MMUSD/año y similar al impacto esperado en otros segmentos como las industrias del cemento y la química. A través de estos usos del hidrógeno, las empresas estatales crearían nuevos mercados, empleos y oportunidades para el desarrollo económico.

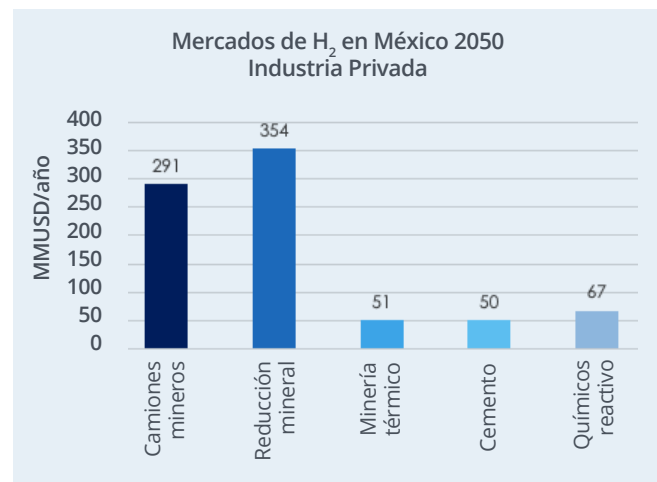
Figura 3-9. Tamaño del mercado de hidrógeno para 2050 en los segmentos de consumo de PEMEX y CFE.



El segundo segmento se centra en las oportunidades de hidrógeno para la industria privada e incluye la minería, el cemento y las industrias químicas. Para la minería, el impacto se divide en camiones de extracción minera (CAEX), reducción química de los minerales metálicos, y aplicaciones térmicas. Para la industrias cementera y química, tanto el tamaño del mercado como las inversiones se determinan abarcando todas las aplicaciones proyectadas del hidrógeno.

Las mayores oportunidades proyectadas del hidrógeno para las industrias privadas están en camiones mineros CAEX y en la reducción de minerales, que en conjunto representan casi el 80% del impacto económico. Las proyecciones muestran un tamaño del mercado de hidrógeno para 2050 de alrededor de 300 MMUSD / año para el abastecimiento de CAEX mineros, 350 MMUSD / año para la reducción de minerales, principalmente mineral de hierro para la producción de acero, 50 MMUSD / año para aplicaciones térmicas en el sector minero, y cerca de 120 MMUSD / año para las industrias de cemento y química combinadas, sumando 800 MMUSD / año en 2050 para usos de la industria privada.

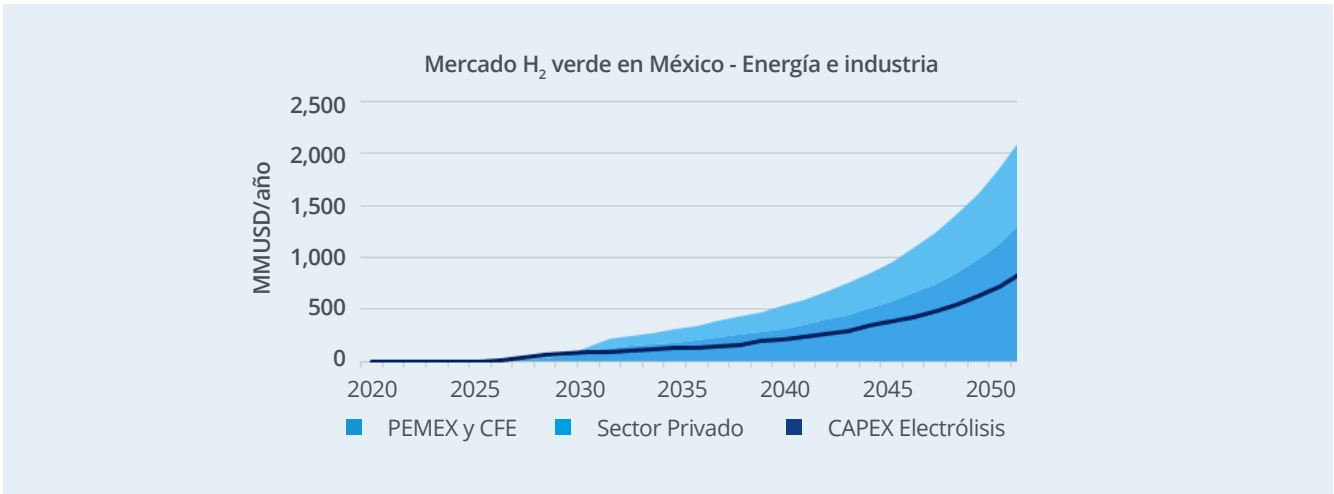
Figura 3-10. Tamaño de mercado del hidrógeno verde en el sector privado en 2050.



Todos los segmentos industriales y energéticos en México tendrán un impacto económico creciente que alcanzará un tamaño de mercado de hidrógeno de 200 MMUSD/año para 2030, el cual crecerá más de diez veces y superará los 2 mil millones de USD/año para 2050. Las inversiones en infraestructuras para la producción de hidrógeno crecen junto con la demanda de hidrógeno. Las inversiones acumuladas para el suministro de hidrógeno a PEMEX y CFE se proyectan en cerca de 4,300 millones de USD para mediados de siglo, y en casi 2,600 millones de USD para el sector privado.



Figura 3-11. Proyecciones del tamaño de mercado del hidrógeno verde para sus usos como energético en PEMEX, CFE y el sector privado.



En el tercer segmento, el transporte terrestre presenta las mayores oportunidades económicas para el hidrógeno en México. Compuesto por los segmentos estudiados: autobuses de transporte público y camiones de carga de larga distancia, el transporte de carga representa un mercado de hidrógeno que tendrá un amplio despliegue después de 2030, el cual será de 2,600 millones de dólares / año para 2040 y alcanzar los 6,000 millones de dólares / año para 2050, distribuido en 2 mil millones para los autobuses de transporte público y 4 mil millones para los camiones de carga por año. Estos valores consideran un precio promedio al que el hidrógeno podría venderse en las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno (HRS) en todo el país. Se considera que el costo promedio de mercado del hidrógeno vehicular es 2.5 veces en el costo de producción del gas. El aumento se atribuye al acondicionamiento, transporte, almacenamiento y suministro en la estación de recarga. Estos valores representan solo el mercado del hidrógeno suministrado y se pueden esperar grandes impactos económicos del despliegue y la operación de la infraestructura de reabastecimiento del H<sub>2</sub>.

Se proyecta que las inversiones acumuladas necesarias en este sector sean de casi 8,500 millones de dólares para 2050 para abastecer la demanda de hidrógeno para los FCEV en los segmentos analizados en México.

Figura 3-12. Tamaño del mercado de hidrógeno para el transporte terrestre pesado de pasajeros y de carga en 2050.

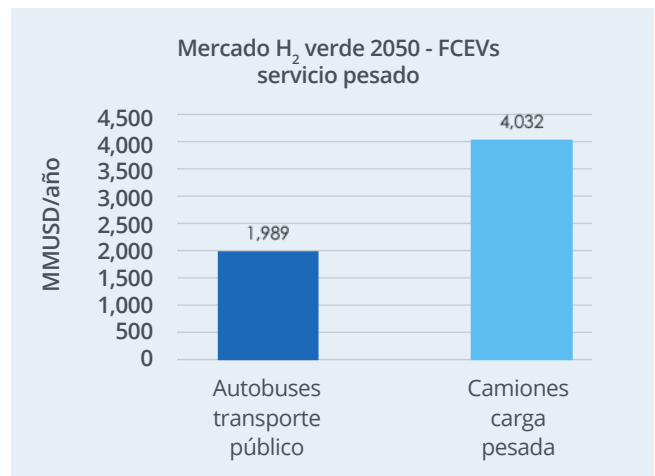
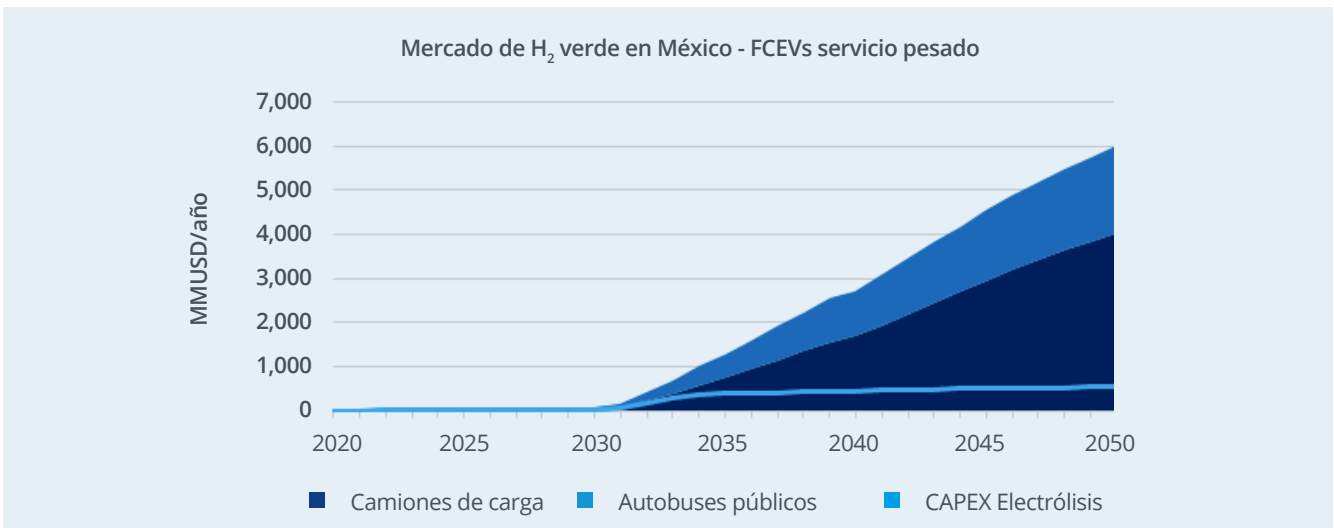


Figura 3-13. Proyecciones del tamaño del mercado de hidrógeno en México por segmento automotriz 2020-2050 .



## 4. Recomendaciones regulatorias y financieras para impulsar la producción de hidrógeno en México

El desarrollo de la economía del hidrógeno verde se enfrenta a desafíos desde el punto de vista técnico, económico, regulatorio y financiero. Dado el costo del H<sub>2</sub> verde en relación con el hidrógeno gris y las alternativas convencionales basadas en combustibles fósiles que se desean reemplazar, resulta necesario implementar incentivos financieros y regulatorios y medidas de habilitación para ayudar a lograr la competitividad de costos y volver al hidrógeno en un energético más atractivo de producir y de adoptar por parte de los usuarios finales. Sin incentivos, se extendería el consumo de combustibles fósiles a un menor costo económico, pero con importantes repercusiones ambientales.

De igual forma, el hidrógeno verde enfrenta retos regulatorios que pueden superarse para un despliegue oportuno y amplio en México. Este informe tiene la intención de identificar las barreras y emitir recomendaciones sobre cómo vencerlas. Este capítulo presentará un compendio de barreras para el hidrógeno verde en México identificadas a lo largo del desarrollo de los informes anteriores, las cuales se centran en las oportunidades para las empresas estatales y privadas en los sectores de energía, industria y movilidad.

Las barreras se recopilan de entrevistas con actores relevantes en México a finales de 2020 e inicios de 2021. Las recomendaciones emitidas para cada barrera se basan en el despliegue de otras tecnologías energéticas en el pasado en México, la adopción actual del hidrógeno en otras regiones y referencias internacionales.

Las barreras y recomendaciones para el despliegue del hidrógeno verde en México se agrupan en **Políticas y Regulación**, **Contexto Económico y Político** y **Tecnología y Capital Humano**, y se describen junto con su impacto, recomendaciones para abordarlas y beneficios esperados de la implementación de las recomendaciones. Finalmente, también se presenta un conjunto de recomendaciones basadas en experiencias internacionales durante etapas tempranas de la adopción del H<sub>2</sub> verde.

Las nueve principales barreras identificadas son las siguientes:

### Políticas y regulación

1. El marco regulatorio y de políticas públicas actual de México puede fortalecerse para cumplir con sus compromisos climáticos internacionales.
2. En México como en la mayor parte del mundo, no existen políticas o hojas de ruta nacionales o estatales para el desarrollo del hidrógeno verde.
3. La regulación para el uso del hidrógeno en México no es específica para la mayoría de sus posibles aplicaciones.

### Contexto económico y político

4. El acceso de México al gas natural de bajo costo desde los EE. UU. plantea desafíos en la competitividad del hidrógeno verde.
5. En México el acceso a la infraestructura energética presenta importantes barreras de entrada para proyectos derivados de energía renovable.
6. La disponibilidad geográfica de plantas de generación de energía renovable en México no necesariamente coincide con los sitios de demanda de hidrógeno más adecuados para el despliegue de proyectos de hidrógeno verde a gran escala.
7. Existe una amplia brecha de costo-competitividad de las tecnologías de producción y consumo de hidrógeno verde respecto a las alternativas convencionales.

### Tecnología y capital humano

8. Barreras de conocimiento sobre los usos del hidrógeno y sus potenciales impactos.
9. Recursos humanos limitados o desvinculados del sector energético alrededor del hidrógeno.

#### 4.1. Políticas y regulación

##### 1. El marco regulatorio y de políticas públicas actual de México puede fortalecerse para cumplir con sus compromisos climáticos internacionales.

###### • Recomendaciones:

a) Incluyendo al hidrógeno verde en la política nacional respecto al cambio climático, México tendría un vehículo adicional para lograr sus metas climáticas y aumentar la ambición de sus acciones de mitigación.

**Beneficios:** Fortalecer el cumplimiento de las metas de cambio climático del Acuerdo de París tendría como beneficio mejoras significativas en la salud de la población. De la misma manera, la economía del hidrógeno podría representar una oportunidad de fortalecer la política industrial, al desarrollar localmente las tecnologías.

##### 2. Como en la mayor parte del mundo, no existen políticas o hojas de ruta nacionales o estatales para el desarrollo del hidrógeno verde en México.

• **Impacto:** En México, las tecnologías de hidrógeno han comenzado a ser vistas como una opción para la matriz energética del país desde hace poco tiempo. Se han iniciado discusiones y se ha formado una Asociación Mexicana del Hidrógeno que agrupa a empresas privadas y Agencias Energéticas, como la del Estado de Puebla, que promueve activamente la adopción del hidrógeno verde, sin embargo, no existen aún lineamientos nacionales o estatales que permitan encausar en una misma dirección los esfuerzos de los actores interesados en el tema.

###### • Recomendaciones:

- a) Identificar las ventajas del hidrógeno que son compatibles con la política nacional de desarrollo plasmada en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024.
- b) Establecer prioridades país y prioridades región en el desarrollo del hidrógeno en México (sectores de adopción, tecnologías de producción, modelos de negocio, etc).
- c) Establecer metas para cada actividad prioritaria identificada. Se recomienda que las metas sean cuantitativas, tanto como sea posible, ya que esto permite hacer mediciones constantes del cumplimiento de ellas y promueven una demanda específica de hidrógeno, lo que se puede traducir a evolución tecnológica y reducción de costos.

d) Crear una Hoja de Ruta o Estrategia Nacional que establezca una visión nacional sobre cómo México participará de la cadena de valor de hidrógeno verde, cuáles son las prioridades estratégicas y qué acciones deberán seguirse en el corto, mediano y largo plazo para llegar a las metas.

• **Beneficios:** El mayor beneficio de una Hoja de Ruta es contar con una directriz nacional para dirigir los esfuerzos hacia metas comunes. Por ejemplo, en Japón, los esfuerzos están enfocados en producir tecnologías de consumo de hidrógeno, mientras que en Chile, un gran número de actores ahora analizan proyectos para la exportación de hidrógeno y en otros países como en Estados Unidos, se ve un balance entre el desarrollo de capacidades productivas y de consumo de H<sub>2</sub>.

##### 3. La regulación para el uso del hidrógeno en México no es específica para la mayoría de sus posibles aplicaciones.

• **Impacto:** En México 98% del hidrógeno es propiedad de PEMEX y el otro 2% se utiliza principalmente, como materia prima. El no contar con regulaciones detalladas para el mercado de hidrógeno verde en aplicaciones energéticas y nuevas aplicaciones químicas será una barrera de acceso para nuevos actores, no propiciará la adopción de esta sustancia en más sectores de la economía y podría generar controversia legal cuando las tecnologías de hidrógeno compitan con tecnologías convencionales. Las ambigüedades que podrían surgir son, por ejemplo, la identificación de los FCEV como vehículos eléctricos, las reglas para conectar una celda de combustible a la red eléctrica, si considerar el hidrógeno como portador de energía en vez de una materia prima química, etc.

###### • Recomendaciones:

- a) Establecer reglas de mercado para el uso de hidrógeno verde como energético, como materia prima renovable y para su uso mixto por un mismo actor.
- b) Incluir las definiciones de las aplicaciones de consumo de hidrógeno en la legislación sectorial pertinente: Ley de la Industria Eléctrica (almacenamiento de energía, servicios de red), Ley de Caminos, Puentes y autotransporte Federal (transporte de hidrógeno y movilidad

eléctrica de hidrógeno), Ley de Hidrocarburos (sistemas power to gas, inyección a gasoductos).

- c) Modificar los Reglamentos de las Leyes en los sectores económicos en los que participe el hidrógeno, o incluso proponer la creación de un Reglamento para la Producción, Manejo y Uso del Hidrógeno verde en México.
- d) Crear regulación técnica que especifique las características necesarias de los sistemas y equipos involucrados en la producción, manejo y consumo de hidrógeno verde.

• **Beneficios:** La regulación de mercado permitirá establecer lineamientos a los que los actores interesados puedan apegarse para participar de actividades comerciales relacionadas con el hidrógeno verde, promoviendo así el desarrollo de este nuevo mercado.

#### 4.2 Contexto económico y político

#### 4. El acceso de México al gas natural de bajo costo desde los EE. UU. plantea desafíos en la competitividad del hidrógeno verde.

• **Impacto:** Al existir un combustible fósil de bajo costo, el hidrógeno verde podría tardar más tiempo en alcanzar paridad en costos con él, retardando así su penetración al mercado mexicano.

• **Recomendaciones:**

- a) Caracterizar el rol del hidrógeno verde en el cumplimiento de la Meta del Plan Sectorial de Energía 2020-2024: Alcanzar y mantener la autosuficiencia energética sostenible para satisfacer la demanda energética de la nación.
- b) Revisar los mecanismos fiscales para desincentivar el uso de combustibles fósiles e incentivar tecnologías de sustitución del gas natural como el hidrógeno verde.

• **Beneficios:** Con estas medidas se podría acelerar la competitividad económica del hidrógeno verde frente al gas natural y crear un mecanismo de financiamiento para el desarrollo nacional de tecnologías e integración de proyectos de generación de este gas renovable.

#### 5. En México el acceso a la infraestructura energética presenta importantes barreras de entrada para proyectos derivados de energía renovable.

• **Impacto:** Los grandes proyectos de generación de hidrógeno verde requerirán de acceso a infraestructura como las redes de transmisión y distribución de energía eléctrica (almacenamiento y re-electrificación de H<sub>2</sub>) o los gasoductos (power to gas y metanación de hidrógeno verde).

• **Recomendaciones:**

- a) Creación de reglamentos específicos para el acceso a la infraestructura energética con fines de integración de proyectos de hidrógeno verde.
- b) Establecer programas de colaboración entre las empresas estatales y pequeñas y medianas empresas para la integración de proyectos de adopción de hidrógeno verde.

• **Beneficios:** El permitir el acceso de más actores a la infraestructura energética del país permitiría que aumente la demanda nacional de hidrógeno ante el mayor número de posibles proyectos realizables, al tiempo que esta penetración reduce las emisiones de sectores como el de petróleo y gas y el de generación eléctrica.

#### 6. La disponibilidad geográfica de plantas de generación de energía renovable en México no necesariamente coincide con los sitios de demanda de hidrógeno más adecuados para el despliegue de proyectos de hidrógeno verde a gran escala.

• **Impacto:** La producción de hidrógeno necesitará de una suficiente capacidad de producción eléctrica renovable para asegurar que la molécula tenga características “verdes”. Si la energía renovable no está presente, el desarrollo del hidrógeno verde estaría limitado y México podría desaprovechar la oportunidad que su alto potencial solar y eólico le brindan.

• **Recomendaciones:**

- a) Continuar con una fuerte política de promoción a las energías renovables, paralela a la política nacional de adopción del hidrógeno verde. Una estrategia de hidrógeno verde es, en una visión más general, una estrategia de aprovechamiento de la energía renovable a través de una molécula química que permite la integración de sectores (energético renovable con el sector eléctrico, de petróleo y gas, químico, minero, acerero, etc).

b) Establecer sistemas de Garantías de Origen para el hidrógeno verde que permitan:

- I. Establecer los criterios para considerar verde al hidrógeno, con base en las metas de descarbonización por sector y en el potencial del hidrógeno para ser adoptado en él.
- II. Generar un mercado diferenciado para el hidrógeno verde respecto al hidrógeno con alta huella de carbono. Esto permitirá a los productores competir entre pares y vender el hidrógeno verde a precios que permitan la recuperación de la inversión en infraestructura.
- III. La participación de México en mercados internacionales de hidrógeno verde, donde un certificado de garantías de origen será necesario para garantizar a los países de destino del gas que al adquirir esa molécula, estaría contribuyendo a la descarbonización global.
- IV. Estimular a los productores de hidrógeno a preferir el hidrógeno verde sobre otras alternativas, dadas las ventajas competitivas que este tipo de H<sub>2</sub> les dá.

• **Beneficios:** el estimular el despliegue de la energía renovable de la mano de la producción de hidrógeno potenciaría el desarrollo económico y de generación de empleos en el sector energético, acelerará el cumplimiento de las metas de descarbonización del país y permitiría a México participar de los futuros mercados internacionales de hidrógeno verde.

Adicionalmente, las mismas tecnologías de hidrógeno podrían ser capaces de mitigar la intermitencia natural de fuentes renovables como la solar fotovoltaica y la eólica, permitiendo una mayor participación de ellas en la matriz eléctrica mexicana sin comprometer la confiabilidad del Sistema Eléctrico Nacional.

### 7. Alta brecha de costo-competitividad de las tecnologías de producción y consumo de hidrógeno verde respecto a las alternativas convencionales.

• **Impacto:** Los altos costos de la tecnología impiden que los tomadores de decisiones se inclinen por reemplazar tecnologías convencionales por tecnologías de hidrógeno verde. Como consecuencia, la demanda de equipamiento de producción y manejo de hidrógeno no aumenta y sus costos tardan más tiempo en decrecer.

#### • Recomendaciones:

a) Proveer a las tecnologías de hidrógeno de asistencia financiera, la cual puede provenir de:

- I. Agencias gubernamentales mediante préstamos, subvenciones, mecanismos de depreciación acelerada u otro tipo de estímulos fiscales que favorezcan a los proyectos de hidrógeno verde.
- II. Fondos públicos – privados que financien proyectos en etapas tempranas del desarrollo del hidrógeno, como es el caso del Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking, en la Unión Europea.
- III. Promover esquemas de financiamiento a tasas preferenciales cuando se trate del desarrollo de proyectos de hidrógeno verde a través de la Banca pública o privada. b) Impulsar la producción local de tecnologías: desarrollar capacidades de producción locales puede reducir el precio de los bienes al reducir costos de transporte y eliminar diferencias en costo por tipo cambiario entre monedas. Esta medida puede demorar la adopción de las tecnologías de hidrógeno en países como México, que actualmente tiene bajas capacidades productivas de tecnologías de hidrógeno, por lo que es aconsejable planear las actividades productivas locales para el mediano plazo.

b) Apoyar a proyectos de investigación y desarrollo: considerando que los costos de las tecnologías reducirán cuando mejore el desempeño de ellas. Se hace necesario invertir en proyectos de investigación y desarrollo estratégicos que busquen mejorar indicadores clave de las tecnologías del hidrógeno, como el tiempo de vida útil, eficiencia energética, cantidad de metales preciosos, etc.

• **Beneficios:** La reducción de costos aceleraría la adopción de las tecnologías de hidrógeno y resultará en un círculo virtuoso para la descarbonización, en el que el hidrógeno verde gana participación de mercado al ser competitivo económicamente y eso reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en el inventario nacional.

### 4.3. Tecnología y capital humano

#### 8. Barreras de conocimiento sobre los usos del hidrógeno y sus potenciales impactos.

• **Impacto:** La falta de conocimiento sobre las posibilidades y potencial de adopción del hidrógeno verde en los distintos sectores económicos limita la participación de más actores en la economía del hidrógeno y retrasa que la demanda de hidrógeno verde aumente en el corto a mediano plazo.

• **Recomendaciones:**

- a) Generar campañas de difusión y comunicación: que permitan a los posibles actores interesados descubrir qué aplicaciones puede tener el hidrógeno verde en su industria, qué elementos son necesarios para desarrollar proyectos y cuáles serían los beneficios para su negocio de participar de la economía del hidrógeno.
- b) Formar mesas de discusión entre actores interesados de distintos ramos del sector energético, donde manifiesten sus ideas, descubran posibilidad de colaboración en proyectos conjuntos y expongan sus experiencias con la adopción de otras tecnologías en el pasado.
- c) Promover misiones de aprendizaje: organizar misiones de aprendizaje donde delegaciones mexicanas de sectores específicos (por ejemplo: producción de acero, refinación o movilidad) puedan visitar otros países y se les muestre en campo el desarrollo de las tecnologías y se les platique problemas específicos que se tuvieron en el lugar visitado cuando se implementó cierta aplicación del hidrógeno verde.
- d) Crear alianzas internacionales que incluyan programas de transferencia de conocimiento y lecciones aprendidas a México en la adopción del hidrógeno verde. Se sugiere que estos programas incluyan la mayor cantidad posible de miembros en la cadena de valor del hidrógeno, incluida la regulación, normativa técnica y política pública.

• **Beneficios:** La reducción de la curva de aprendizaje de México tendría como consecuencia una adopción acelerada del hidrógeno verde, con proyectos más ágiles y con menos tropiezos, al aprovechar la experiencia de terceros.

#### 9. Recursos humanos limitados o desvinculados del sector energético alrededor del hidrógeno.

• **Impacto:** El no contar con recursos humanos con experiencia en tecnologías de hidrógeno o que estos no sean parte del sector energético activamente podría alargar los tiempos de ejecución de proyectos, resultando esto en una adopción lenta del hidrógeno verde.

• **Recomendaciones:**

- a) Identificación del estatus de los recursos humanos en hidrógeno en México: para entender de dónde se parte.
- b) Análisis de capacidades necesarias para desarrollar la economía del hidrógeno en México de acuerdo con la visión del país al respecto.
- c) Creación de programas de formación dirigidos a apuntalar las capacidades faltantes en el sector.
- d) Creación de programas de innovación y desarrollo con objetivos específicos planteados desde los organismos directivos de la adopción del hidrógeno. Esto promoverá la acción científica y la transferencia de tecnologías de manera alineada al plan que México establezca frente al hidrógeno y con objetivos comunes.

• **Beneficios:** Desarrollar las capacidades humanas necesarias para el hidrógeno verde tiene un beneficio directo al desarrollo de proyectos y creación del mercado, sin embargo, también promueve la creación de empleos mejor remunerados y reduce la dependencia intelectual y tecnológica de México.

### 4.4 Experiencias internacionales

A continuación, se describen acciones basadas en experiencias de otros países y regiones del mundo que, dependiendo la política nacional sobre el hidrógeno, podrían potenciar su desarrollo en México. Muchas de estas recomendaciones se superponen con las descritas anteriormente, lo que refleja su alineación con la experiencia internacional y las mejores prácticas.

#### Gobernanza y creación de políticas

- Buscar consejo de los actores de la sociedad civil y la industria.
- Introducir al hidrógeno como una medida para asegurar la seguridad energética.
- Crear políticas de aprovechamiento y re-ingeniería de la infraestructura energética existente para hacerla aprovechable por el hidrógeno verde.
- Establecer precios al carbono y políticas que promuevan el remplazo de combustibles fósiles por combustibles alternos.

### Promoción a sistemas de electrólisis

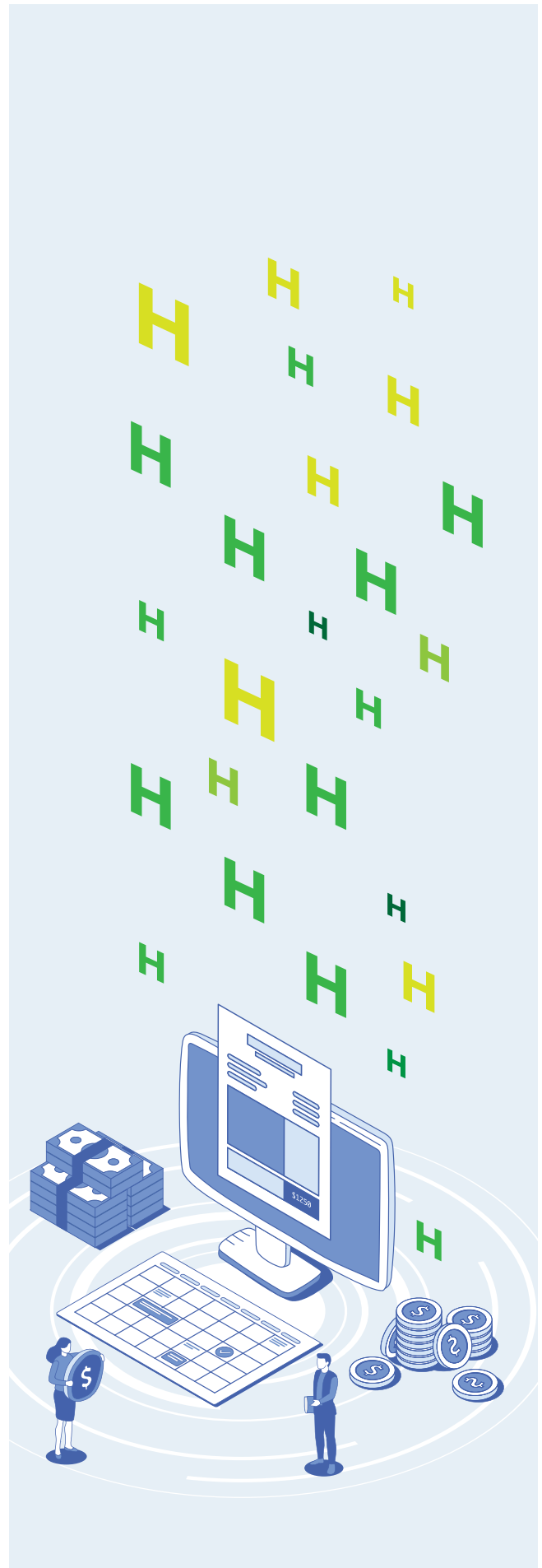
- Establecer metas de capacidad instalada en el tiempo (2025, 2030 o 2050).
- Desarrollar esquemas de impuestos que favorezcan el desarrollo de proyectos de electrólisis.
- Aumentar el apoyo a los programas de investigación y desarrollo que busquen mejorar la eficiencia de estos equipos, proponer mejores métodos de producción y optimicen sus diseños.

### Promoción de las aplicaciones industriales del hidrógeno

- Complementar las extendidas políticas de eficiencia energética con políticas de reemplazo de combustibles que habiliten espacio en el mercado para el hidrógeno verde.
- Establecer metas de descarbonización ambiciosas.
- Crear mecanismos de financiamiento específicos para este tipo de proyectos.
- Creando un mercado justo y diferenciado entre los productos “regulares” y aquellos con una huella de carbono baja.
- Extender el mercado diferenciado entre productos con alta y con baja huella de carbono a aquellos bienes importados, a través de impuestos al carbono de productos que ingresen al país.

### Promoción del hidrógeno en aplicaciones de movilidad aérea y marítima

- Establecer metas explícitas para la reducción de emisiones de la aviación o la navegación marítima
- Proveer incentivos financieros que reduzcan la diferencia en costo entre los combustibles sintéticos y los combustibles convencionales.
- Establecer una política nacional de apoyo a las políticas y regulaciones internacionales de reducción de emisiones en estos sectores.



## 5. Identificación de capacidades necesarias

México es un país con una actividad económica que lo posiciona en el sitio número 15, es parte del grupo de países del G20 y cuenta con muchas capacidades intelectuales, financieras y legales desarrolladas, sin embargo, la adopción de la economía del hidrógeno verde podría demandarle al país desarrollar nuevas capacidades.

A continuación, se presentan algunas de las capacidades necesarias que se han identificado a lo largo del desarrollo de este estudio.

### 5.1 Capacidades y recursos humanos

Para la adopción del hidrógeno verde, México podría partir de a) su extendida base de recursos humanos especialistas en energía eléctrica, en petróleo y gas, en renovables y tecnologías energéticas convencionales y de b) algunos recursos humanos que ya conocer al hidrógeno por su participación en plantas de producción de hidrógeno de PEMEX o de empresas gasistas, por su formación académica o por su participación en proyectos de hidrógeno verde fuera de México.

Las capacidades que se ha identificado que México deberá desarrollar son:

#### a) Especialistas en políticas públicas para el hidrógeno verde:

Se necesitará personas que entiendan la dinámica de una molécula dentro del sector energético, pero también dentro del sector industrial y que pueda proponer políticas y principios de regulación para una sustancia con las características del hidrógeno.

#### b) Tecnólogos en los distintos puntos de la cadena de valor del hidrógeno:

Para esto, México parte de una base instalada de científicos y profesionales que durante sus estudios de postgrado tuvieron interacción con las tecnologías del hidrógeno (de acuerdo con información de la SMH). Sin embargo, muchos de ellos jamás han participado del desarrollo de un proyecto de escala industrial del tema, por lo que deberán ampliar sus conocimientos al respecto, al tiempo que en México se crean planes de formación de recursos humanos más extendidos.

#### c) Especialistas en seguridad:

México maneja anualmente volúmenes de entre 250 y 300 mil toneladas y nunca se ha registrado un

accidente por ello. Sin embargo, este hidrógeno se produce en apenas unas pocas plantas. Será necesario que México establezca regulación técnica en cuanto a seguridad y que más personas se capaciten en el tema. Los especialistas en seguridad del hidrógeno con experiencia en las actuales plantas mexicanas podrán servir como instructores y supervisores en las primeras etapas del despliegue tecnológico.

#### d) Analistas de datos e información específica del mercado del hidrógeno:

Especialistas en mercados energéticos podrán ampliar sus conocimientos e integrar al hidrógeno verde a sus análisis, sin embargo, será necesario que desarrollen nuevos conocimientos, ya que el hidrógeno se comportará en los mercados internacionales de forma distinta a los combustibles fósiles, y en los mercados nacionales, sus rutas de origen y destino serán más diversas debido a su dualidad energía / materia prima.

#### e) Comunicación:

México necesitará fortalecer sus capacidades de comunicación social para transmitir de forma clara cuales son los usos del hidrógeno, sus riesgos, limitantes y beneficios; en primera instancia a los actores involucrados y posteriormente a toda la sociedad.

### 5.2. Capacidades financieras

#### a) Especialistas en políticas públicas para el hidrógeno verde:

Se necesitará personas que entiendan la dinámica de una molécula dentro del sector energético, pero también dentro del sector industrial y que pueda proponer políticas y principios de regulación para una sustancia con las características del hidrógeno.



**b) Crear mecanismos de financiamiento “amigables”**

Con los proyectos de hidrógeno verde que permitan desarrollar proyectos y reducir costos del hidrógeno que proporciona certidumbre, promueve la competitividad y garantiza un terreno de juego justo para todos los actores involucrados para permitir la asignación de capital en proyectos de infraestructura de hidrógeno y una alineación con los mercados internacionales y las mejores prácticas.

**c) Cuantificación de externalidades y/o co-beneficios:**

Se puede dar rentabilidad a los proyectos de hidrógeno al cuantificar el impacto negativo del uso de combustibles tradicionales o medir el beneficio de transicional a combustibles más limpios. Esto es: asignar un costo a los daños al medio ambiente o a la salud que el uso de combustibles fósiles supone, o cuantificando la generación de empleos, la creación de mercados, el valor del aprendizaje, la reducción de emisiones.

México debería generar capacidades para la generación de nuevos modelos de costo y rentabilización de proyectos.

**d) Acceso a fondos internacionales para el desarrollo del hidrógeno en México:**

En el mundo existen distintos fondos para la cooperación internacional en el desarrollo de la economía de hidrógeno. México necesitará aprender en el corto plazo cuales son estos fondos, como funcionan, que tipo de proyectos y con que características pueden acceder a ellos y cuáles son los pasos para solicitarlos.

**5.3. Capacidades legales**

Se identifica que en México existe un sólido marco legal y de aplicación de la ley, que puede atender las controversias de manera objetiva y en tiempos razonables para el sector energético. Algunas de las capacidades a desarrollar en las áreas legal y regulatoria son:

**a) Los expertos en energía, medio ambiente y derecho de la industria:**

Que deberán participar en la formulación del nuevo marco regulatorio para el hidrógeno verde. Las personas expertas deberán aprender las mejores prácticas internacionales para definir y ejecutar las futuras directrices del mercado en México.

**b) El fortalecimiento de la capacidad regulatoria del Estado:**

Que proporciona certidumbre, promueve la competitividad y garantiza un terreno de juego justo para todos los actores involucrados para permitir la asignación de capital en proyectos de infraestructura de hidrógeno y una alineación con los mercados internacionales y las mejores prácticas.

**c) Mecanismos para promover las mejores prácticas legales y la inclusión de las aportaciones de las partes interesadas:**

Que participan en la cadena de valor del hidrógeno, incluida la industria, la academia, las ONG y la sociedad civil en los procesos de elaboración de leyes para asuntos relacionados con los mercados e infraestructura del hidrógeno verde.

**5.4. Capacidades comerciales**

Algunas capacidades que México deberá desarrollar en el ámbito comercial son:

**a) Internamente:**

Capacidad para crear mercados diferenciados entre los productos con una huella de carbono regular y una con una baja huella, en el que existan suficientes ventajas para los productos bajos en carbono.

**b) Externamente:**

México cuenta con un alto potencial de producción de hidrógeno y experiencia con el mercadeo internacional de moléculas energéticas.

Será necesario que México extrapole esa experiencia al hidrógeno y desarrolle capacidades de exportación de hidrógeno verde. Para ello, será necesario un profundo entendimiento de cuales son esos posibles mercados, quienes son los competidores y que ventajas podría tener México frente a ellos en cada destino.

## 6. Potencial de contribución mexicana a las necesidades internacionales de hidrógeno verde y transición energética

Algunos de los países que han establecido una adopción ambiciosa del hidrógeno verde reconocen su falta de capacidad productiva de este gas para ser autosuficientes y alcanzar sus objetivos. Estos países generalmente son naciones con limitaciones de tierra como Corea y Japón, Alemania y otras naciones europeas, que ya han establecido mecanismos para promover el desarrollo y el despliegue de tecnologías de hidrógeno verde a gran escala.

Por su parte, los países con abundantes recursos renovables podrían producir hidrógeno verde a precios suficientemente bajos como para competir en mercados de exportación, que se espera puedan desarrollarse hacia finales esta década. La privilegiada posición geográfica de México y sus abundantes recursos energéticos renovables podrían colocarlo como exportador de hidrógeno verde, lo cual es el tema a tratar en este capítulo.

### 6.1. El mercado de exportación de hidrógeno

En todo el mundo se han establecido estrategias para la adopción del hidrógeno que impulsarán la demanda anual para 2030 a casi 16 millones de ton por año de hidrógeno verde en Europa, 21 millones de ton de hidrógeno bajo en emisiones<sup>7</sup> en Estados Unidos y Canadá, 300 mil ton en Japón, 35 millones de ton en China, y para 2040, 5 millones de ton en Corea del Sur.<sup>8</sup> En Europa, las mayores demandas de hidrógeno provienen de Italia y Francia, con 2,2 y 2,1 millones de toneladas cada uno, seguidos por el Reino Unido y Alemania, ambos con metas de 1,6 millones de toneladas, luego España y los Países Bajos con 1,3 millones de toneladas cada uno, y finalmente Portugal y Finlandia con 0,8 y 0,3 millones de toneladas, respectivamente.

Se espera que la demanda de hidrógeno a nivel mundial experimente un crecimiento acelerado debido a la adopción de todas las tecnologías de consumo, pasando de 75 millones de ton en 2020 según la Agencia Internacional de la Energía (IEA), a un rango entre 90 y 100 millones de ton en 2030 y entre 280 a casi 700 millones de ton para 2050, según proyecciones de IEA, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), el Hydrogen Council, y Bloomberg New Energy Finance.

Como referencia, la demanda actual de hidrógeno de México está por debajo de 230 mil toneladas por año, y las demandas proyectadas son indicativas de un creciente

mercado mundial de hidrógeno que se desarrollará con mayores oportunidades para los países productores de hidrógeno verde de bajo costo. Los países ricos en energías renovables como Australia, Chile, Marruecos y Arabia Saudita, entre otros, han establecido estrategias o anunciado proyectos de producción de hidrógeno a gran escala para exportación, que se establecen en los miles de millones de dólares de inversión esperada en infraestructura dedicada a la producción de hidrógeno.

### 6.2. Análisis de exportación marítima de hidrógeno

Se realizó un análisis comparativo para evaluar la competitividad de costos de varias rutas de exportación, es decir, desde un conjunto de países productores (exportadores) hacia múltiples países consumidores de hidrógeno (importadores).

Los potenciales importadores de hidrógeno considerados son Japón, Corea del Sur, el Reino Unido y la Unión Europea en su conjunto. Para elegirlos se consideró su demanda de hidrógeno proyectada y el costo promedio nivelado de hidrógeno (LCOH) local. Los potenciales exportadores de hidrógeno estudiados son Australia, Chile, México y Marruecos y fueron elegidos por su LCOH promedio, así como por su capacidad de producción (millones de ton anuales).

Las proyecciones de demanda y capacidad de producción provienen de la estrategia o hoja de ruta del hidrógeno de cada país y de los informes institucionales o industriales de organismos nacionales e internacionales como la IEA, mientras que el LCOH local para cada país se obtuvo utilizando insumos de este estudio. Se designó un puerto de exportación o importación de hidrógeno para cada país para calcular la distancia y los costos de la ruta de envío.

<sup>7</sup> Hidrógeno bajo en emisiones consiste principalmente en hidrógeno verde, producido a partir de electrólisis con energía renovable e hidrógeno azul, producido convencionalmente a partir de gas natural o carbón con captura de carbono. Algunas estrategias nacionales de hidrógeno no han establecido metas para cada una de las tecnologías, mientras que la estrategia de la UE tiene como objetivo solo el H<sub>2</sub> verde.

<sup>8</sup> Los objetivos de demanda de hidrógeno se toman de la hoja de ruta o estrategia de H<sub>2</sub> de cada país. Para China, las referencias son de la Alianza Nacional China de Hidrógeno y Celdas de Combustible, y la Hoja de Ruta de Ahorro de Energía y Tecnología de Vehículos de Nueva Energía. La hoja de ruta de Corea del Sur establece objetivos para 2040.

La caracterización de los posibles países importadores y exportadores de hidrógeno verde se muestran a continuación.

Tabla 6-1. Caracterización de los potenciales países importadores de hidrógeno.

Países importadores		Potencial		
#	Países	LCOH 2030 (USD/kgH <sub>2</sub> )	Demanda H <sub>2</sub> 2030 (kton/año)	Puerto de destino
1	Unión Europea	> 4	20,000	Rotterdam
2	Japón	6.5	>300	Osaka
3	Corea del Sur	> 4	1,940	Busan
4	Reino Unido	> 4	~700	Felixstowe

Todos los países importadores muestran costos nivelados de hidrógeno considerablemente más altos que el LCOH de hidrógeno producido por los exportadores en 2030. La mayor demanda prevista de hidrógeno se encuentra en la Unión Europea, seguida de Corea del Sur. Se prevé que la demanda del Japón sea menor, pero con un alto potencial para recibir importaciones, dado el elevado costo de producirlo localmente (6.5 USD/kgH<sub>2</sub>) como se muestra en la Tabla 6-1.

Tabla 6-2. Caracterización de los potenciales países exportadores de hidrógeno.

Países exportadores		Potencial		
#	Países	LCOH 2030 (USD/kgH <sub>2</sub> )	Oferta H <sub>2</sub> 2030 (kton/año)	Puerto de destino
1	Australia	2.41	500	Darwin Port
2	Chile	2.14	< 1,000	Antofagasta
3	México	2.32	Desconocido	Ensenada / Altamira
4	Marruecos	2.22	Desconocido	Casablanca

En la Tabla 6-2 puede observarse que todos los países exportadores tienen LCOH mucho más bajo que los países importadores con valores competitivos que rondan 2.2 – 2.4 USD/kgH<sub>2</sub> y con variaciones de no más del 13% entre los LCOH altos y más bajos. Las capacidades de producción son desconocidas o superan la cantidad esperada de hidrógeno que los países de

destino podrían recibir en forma de importaciones, por lo que los principales factores para determinar el costo en el puerto de entrega son el LCOH de producción y la distancia de transporte. Para calcular las distancias de envío, se construyó una matriz con las distancias en millas náuticas entre todas las combinaciones de puertos posibles, mismas que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6-3. Distancia entre puertos de origen y destino en millas náuticas (NM).

Distancia (NM)	Origen			
	Australia	Chile	México	Marruecos
Destino				
U. Europea	10,078	7,456	5,104	1,413
Reino Unido	10,071	7,449	5,035	1,407
Japón	2,942	9,534	5,249	9,819
Corea del Sur	2,929	9,824	5,369	9,613

Finalmente, para cada combinación de países exportador-importador se calculó un LCOH en el puerto de entrega, cuyos resultados se muestran en la Tabla 6-4, utilizando una escala de colores para resaltar la competitividad de los distintos exportadores en cada destino, siendo el verde el LCOH más bajo en el puerto de destino, y el rojo el LCOH más alto.

Tabla 6-4. LCOH 2030 en el puerto de destino y ranking de México frente a los competidores.

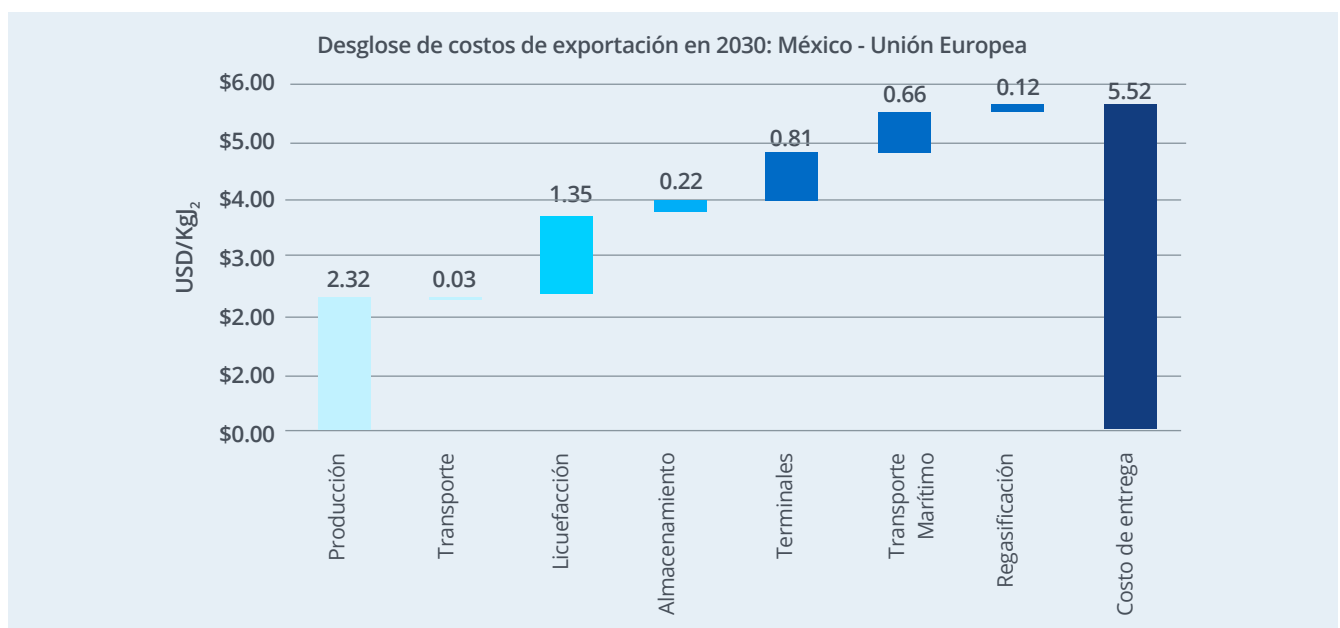
LCOH (USD/kgH <sub>2</sub> )	Origen				Ranking de México
	Australia	Chile	México	Marruecos	
Destino					
Unión Europea	6.15	5.32	5.52	4.78	3
Japón	5.38	5.65	5.60	5.78	2
Corea del Sur	5.29	5.65	5.53	5.67	2
Reino Unido	6.25	5.41	5.60	4.87	3

El desglose de costos del hidrógeno entregado en el puerto de destino incluye la producción, conversión en hidrógeno líquido para el transporte marítimo, los costes terminales de exportación e importación, el transporte marítimo, y la reconversión a hidrógeno gaseoso. Muchos de los costos son los mismos independientemente de los puertos y la ruta involucrados, por ejemplo, la conversión y reconversión, las tarifas de terminales y los costos de distribución, que representan aproximadamente la mitad del costo en destino. Es decir, **alrededor de la mitad de los costos son fijos y la otra mitad varían con** la producción local de hidrógeno y la distancia de envío, lo que explica

las diferencias en el costo dependiendo del país de origen y destino.

Por ejemplo, cuando se realiza una exportación de México a la Unión Europea, alrededor del 40% del costo es debido a la producción de hidrógeno y el 10% corresponde al transporte marítimo. La conversión y la reconversión representan casi el 30%, las tarifas terminales aproximadamente el 20% y una parte marginal inferior al 2% se destina a la distribución, como se muestra en el gráfico siguiente.

Figura 6-1. Desglose de costos de exportación de hidrógeno verde desde México hacia la Unión Europea en 2030, con transporte marítimo de H<sub>2</sub> líquido<sup>10</sup>.



Los costos de hidrógeno en puerto de destino más competitivos son proporcionados por las rutas marítimas más cortas que son, respectivamente, a Japón y Corea del Sur desde Australia, y a la Unión Europea y al Reino Unido desde Marruecos. Por el contrario, los costos más altos en la entrega corresponden a las rutas más largas. México es el segundo exportador más competitivo a destinos asiáticos y el tercero a los mercados europeos en el estudio, dado su bajo costo de producción de hidrógeno, su posición geográfica privilegiada con acceso tanto al océano Atlántico como al océano Pacífico, todos ellos elementos que acortan la distancia de envío a los principales países importadores.

Se realizó un análisis adicional enfocado en México para estimar la participación del país a satisfacer la demanda de los **mercados extranjeros objetivo** en este estudio. El análisis identificó un potencial de **exportación de hidrógeno para 2030 de 60 mil ton con un valor de mercado anual de 330 millones de dólares y que requiere casi 700 MW de electrólisis para producir el gas.**

Tabla 6-5. Proyección de exportaciones de hidrógeno desde México en 2030.

Mercado	Demanda H <sub>2</sub> 2030 (kton/año)	Importaciones desde MX (kton/año)	Participación de mercado (%)	Electrólisis (MW)	Tamaño del mercado (MMUSD/año)
Unión Europea	20,000	9.94	0.05%	116	58
Japón	300	19.88	6.6%	231	111
Corea del Sur	1,940	19.88	1.0%	231	110
Reino Unido	700	9.94	1.4%	116	56

<sup>10</sup> El costo de entrega es el LCOH en el puerto de destino, e incluye los costos de producción, transporte en ducto, conversión y reconversión de H<sub>2</sub> de gas comprimido a líquido (licuefacción y regasificación), transporte marítimo en buque, y costos de terminales de exportación e importación.

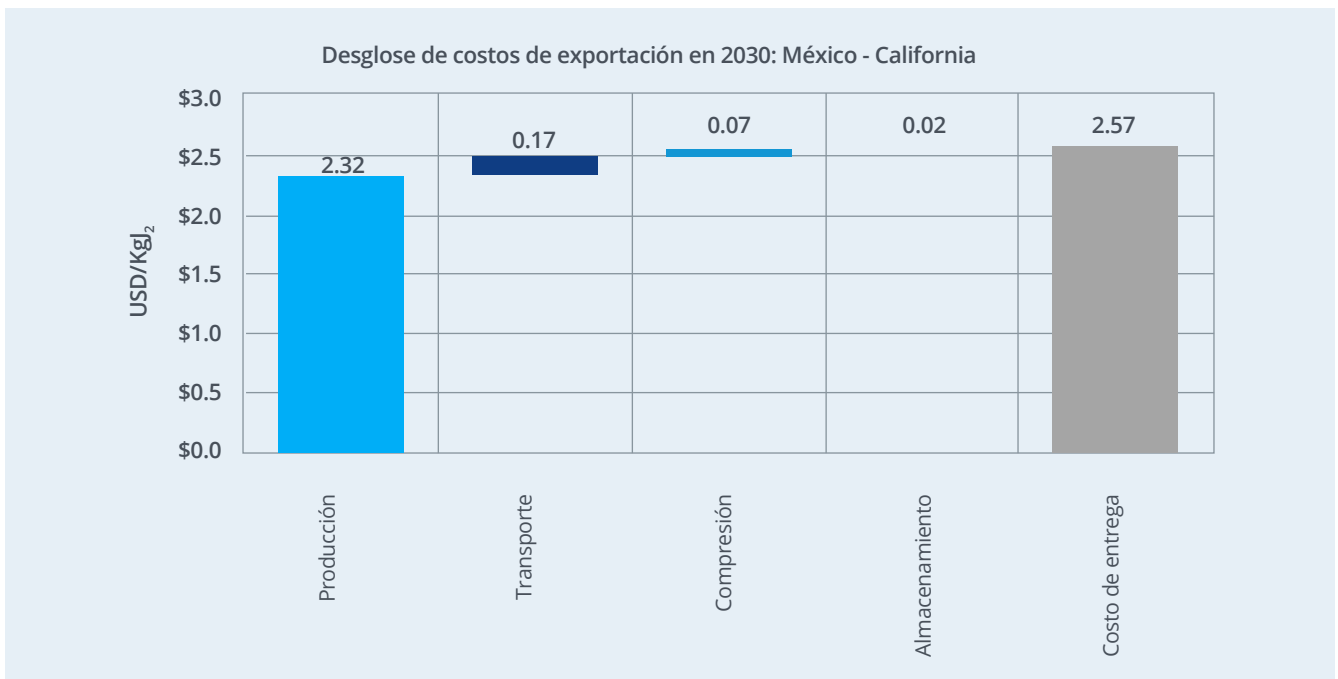
Las exportaciones de hidrógeno de México a Japón y Corea del Sur podrían ser las más competitivas y representan un valor comercial de más de 200 MMUSD por año para 2030.

### 6.3. Exportación terrestre de hidrógeno por ducto

Se realizó un análisis adicional para evaluar la exportación de hidrógeno verde de México a California por vía terrestre a través de ductos de hidrógeno. La evaluación supone una corta distancia recorrida por tubería de menos de 200 km, lo que significa que los sitios tanto de producción como de entrega de hidrógeno deben estar relativamente cerca de la frontera binacional. Esto deja fuera algunos componentes de

costos exportación analizados en el caso marítimo, como la conversión y reconversión a hidrógeno líquido, costo de terminales y de transporte marítimo, lo que produce un costo mucho menor de hidrógeno entregado en el sitio. Los resultados muestran un costo de hidrógeno entregado por tubería donde el transporte solo agrega 10% al costo final. **México podría entregar H<sub>2</sub> verde por tubería a California tan barato como 2.57 USD / kg en 2030.**

Figura 6-2. Desglose de costos de la exportación terrestre por ducto de hidrógeno de México al estado de California, Estados Unidos en 2030.



## 7. Conclusiones

La economía del hidrógeno en México podría tener impactos significativos en múltiples terrenos, incluyendo la manufactura, mitigación del cambio climático, creación de empleos, oportunidades de negocios a nivel local y en el comercio internacional, fortalecimiento regulatorio, financiero y desarrollo de capacidades.

En la [manufactura de tecnologías de hidrógeno](#), el análisis muestra a México como un país con potencial para ser competitivo en la fabricación de turbinas de generación eléctrica de hidrógeno, así como en equipos de acondicionamiento, transporte y almacenamiento. La industria automotriz podría continuar prosperando en el país, aprovechando un ecosistema de fabricación robusto para fabricar las nuevas tecnologías de FCEV de hidrógeno. México muestra un alto potencial para posicionarse como un fabricante líder de FCEV a nivel mundial.

En cuanto a [la reducción de emisiones de GEI](#), el CO<sub>2</sub> evitado por la introducción de hidrógeno verde por parte de PEMEX en refinerías y la producción de amoníaco en México alcanzaría más de 3.2 millones de tonCO<sub>2</sub>e/año para el año 2050. La sustitución de los combustibles fósiles por hidrógeno verde para la generación eléctrica y la industria tiene el potencial de reducir hasta 7,6 millones de tonCO<sub>2</sub>e/año en 2050. Para 2050, la sustitución de los ICEV por FCEV en el transporte público y de carga pesada y la adopción de combustibles sintéticos por el sector de la aviación podría reducir las emisiones de GEI hasta en 26,7 tonCO<sub>2</sub>e/año.

En cuanto a [creación de empleos](#), se podrían crear 90,000 empleos en México para 2050. La actividad de mayor creación de empleo es la producción de hidrógeno y el despliegue de infraestructura necesaria para tal fin. La segunda área más grande de creación de empleo sería en el despliegue de la infraestructura de reabastecimiento de hidrógeno, y en tercer lugar, la industria automotriz para la producción de FCEV en los segmentos de transporte público de pasajeros y de transporte de carga.

En cuanto a [la creación de mercados y la inversión](#), el impacto conjunto esperado en el tamaño del mercado solo PEMEX y CFE es de aproximadamente 100 millones de dólares por año para 2030 y más de 1.3 mil millones de dólares anuales para 2050, solo para satisfacer su demanda de hidrógeno. Las mayores oportunidades proyectadas en hidrógeno para el sector privado están en los CAEX mineros y en la reducción de minerales, que en conjunto representan casi el 80% del impacto económico

del mercado, con un tamaño aproximado de en 800 millones de dólares / año para 2050. Las inversiones acumuladas para el suministro de hidrógeno a PEMEX y CFE se proyectan en cerca de 2,600 millones de dólares para mediados de siglo, y en casi 8,500 millones de dólares para abastecer a la industria privada.

En cuanto a las recomendaciones regulatorias y financieras para fomentar la adopción del hidrógeno en México, el país debe incluir en su política climática los usos del hidrógeno, promover las energías renovables desde el punto de vista político y regulatorio y desarrollar una Hoja de Ruta Nacional o Estrategia del Hidrógeno con objetivos y acciones definidas. Por último, debe asignarse o facilitarse financiamiento para el desarrollo y la adopción de infraestructuras y tecnologías de hidrógeno verde.

México tiene muchas capacidades en los sectores energético e industrial ya bien desarrollados. Sin embargo, la adopción de la economía del hidrógeno verde exigirá que el país desarrolle [capacidades](#) a través de nuevos recursos humanos calificados, así como una expansión de las capacidades financieras, legales y comerciales.

Los abundantes recursos de energía renovable de México y su posición geográfica privilegiada le brindan un gran potencial para exportar [hidrógeno](#) a los mercados internacionales, principalmente en Europa y Asia, creando así nuevas oportunidades de negocio y contribuyendo a las necesidades internacionales de transición energética e hidrógeno con un mercado objetivo de 330 millones de dólares para 2030 y el potencial de exportar por gasoducto a California a un costo muy competitivo.

## Bibliografía

- Argonne National Laboratory, Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications. USA, 2010.
- Argonne National Laboratory, Updates of Hydrogen Production from SMR Process in GREET 2019. USA, 2019.
- Bloomberg New Energy Finance, Hydrogen Economy Outlook 2020. USA, 2020.
- CE Delft, Green hydrogen and employment. The Netherlands, 2019.
- Deloitte, Remaking the global steel industry: Lower-cost natural gas and its impacts. USA, 2013.
- Element Energy. Hy-Impact Series Study 1: Hydrogen for economic growth Unlocking jobs and GVA whilst reducing emissions in the UK. UK, 2019.
- European Commission, Commission Regulation (EU) No 582/2011, Official Journal of the European Union. EU, 2011.
- Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, Hydrogen and Fuel Cell Safety Report, USA, 2021.
- Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Fuel Cells Hydrogen Trucks – Heavy-Duty's High Performance Green Solution. Belgium, 2020.
- GE Power, Power to Gas: Hydrogen for Power Generation, General Electric Company. USA, 2019.
- Hydrogen Council, Hydrogen Scaling Up, 2017.
- IEA, Energy Technology Perspectives 2020. France, 2020
- IEA, The future of hydrogen – seizing today's opportunities. IEA, Japan, 2020
- INECC, Technological Route NDC in the Transportation Sector, Mexico 2015.
- IRENA, Green hydrogen: A guide to policy making. Abu Dhabi, 2020.
- IRENA, Renewable Power-to-Hydrogen: innovation landscape brief. Abu Dhabi, 2019.
- México, Gobierno Federal, Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030, Mexico 2016
- Mitsubishi Power, Hydrogen Power Generation Handbook. Japan, 2020.
- Navigant, Gas for Climate – Job creation by scaling up renewable gas in Europe. EU, 2019.
- Oronoz, Brian. Piquero, Eduardo. Nota técnica – Impuesto al Carbono en México, Mexico, 2020
- SEMARNAT, Mexico: Mitigation and adaptation commitments to climate change for the period 2020-2030, Mexico, 2016.
- SEMARNAT, Mexico: Sixth National Communication and Second Biennial Report of Update before the UNFCCC. Mexico, 2018.
- Servicio Geológico Mexicano, Anuario Estadístico de la Minería Mexicana 2019. Mexico, 2020.
- SENER, Balance Nacional de Energía 2017, Mexico, 2018.
- SENER, Balance Nacional de Energía 2018, Mexico, 2019.
- SENER, Prospectiva del Sector Energético 2018-2032, Mexico, 2018.
- Siemens Energy, Power-to-X: The crucial business on the way to a carbon-free world. Germany, 2021.
- US Department of Energy, Fuel Cells, Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. Online, consulted in March 2021.
- Veolia, Winnipeg Sewage Treatment Program Report, Appendix 7: Emission factors in kg CO<sub>2</sub>-equivalent per unit. Canada, 2012.

