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

Edición y supervisión

William Jensen Díaz
william.jensen@giz.de

Lorena Espinosa Flores
lorena.espinosa@giz.de

Javier Arturo Salas Gordillo
javier.salasgordillo@giz.de

Natalia Escobosa Pineda

Autores

HINICIO

Fecha

Octubre 2021

Versión digital

Diseñado por

Sk3 Estudio Creativo, CDMX
www.sk3.mx

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

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	3
Lista de tablas	4
Lista de figuras	5
Resumen ejecutivo	6
1. Introducción	10
México: un país con alto potencial para producir hidrógeno verde	
2. Impacto potencial del hidrógeno verde en México	12
Impacto Ambiental: 300 MtCO ₂ e de reducciones de GEI acumuladas para 2050	
Uso del agua y desalinización: bajo impacto en la disponibilidad y el costo	
Impacto Social: 90,000 empleos creados en 2050	
Impacto económico: mercado anual de 5.7 mil millones de dólares en 2050	
Manufactura de tecnologías de hidrógeno: alto potencial para la industria automotriz	
3. Sector transporte: mayor potencial de demanda de hidrógeno verde	18
Transporte terrestre pesado: medio millón de FCEV circulando para 2050	
Los combustibles sintéticos podrían suministrar a la industria de la aviación desde 2035	
4. Hidrógeno verde en la industria: 80% de la demanda en el sector minero	15
Sector minero: los camiones mineros y la reducción de minerales impulsarán la demanda de H ₂ verde	
Aplicaciones térmicas en la industria química y la fabricación de cemento: demanda moderada de H ₂ verde	
5. Hidrógeno verde para PEMEX y CFE: 11 GW de electrólisis en 2050	21
PEMEX: Oportunidades considerables en refinerías, amoníaco y combustibles sintéticos	
CFE: Mayor potencial en turbinas de hidrógeno	
PEMEX y CFE podrían sentar las bases para el desarrollo de una economía de hidrógeno verde a gran escala en México	
6. Integración de energías renovables en la red: bajo impacto	25
El almacenamiento de energía con hidrógeno verde podría aumentar un 2% de la generación renovable en 2050	
Mulegé: el H ₂ verde favorece el despliegue de la generación fotovoltaica de bajo costo	
Oportunidades para el sector privado	
Diagnóstico para el hidrógeno verde como vector energético en México	
7. Exportaciones de hidrógeno	26
México: un exportador competitivo de hidrógeno a Europa y Asia	
California: hidrógeno verde entregado por ductos a bajo costo	
8. Barreras y recomendaciones	28
Políticas y Regulación: Se necesitan Estrategias de Hidrógeno Verde y certidumbre regulatoria	
Contexto económico y político: La promoción de las energías renovables impulsará la adopción del H ₂ verde	
Tecnología y capital humano: Se requiere financiamiento, talento y divulgación del H ₂	
Desarrollo de capacidades: México debe desarrollar competencias y aprovechar las existentes	
Bibliografía	30

Abreviaturas

BaU	Business-as-Usual
BEV	Vehículo eléctrico de batería
CAEX	Camiones de extracción mineros
CAPEX	Gastos de capital
CCGT	Turbina de gas de ciclo combinado
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CO ₂ E	CO ₂ equivalente (emisiones de GEI)
Ez	Electrolizador
FC	Celda de combustible
FCEV	Vehículo eléctrico de celda de combustible
GEI	Gases de efecto invernadero
H ₂	Hidrógeno
H ₂ B	Escenario Hydrogen Breakthrough
H35	Hidrógeno gaseoso comprimido a 350 bar, suministrado en HRS
HRS	Estación de recarga de hidrógeno
ICEV	Vehículo con motor de combustión interna
IEA	Agencia Internacional de la Energía
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables
LCOE	Costo nivelado de la energía
LCOH	Costo nivelado del hidrógeno
MW	Megawatt
MTCO ₂ E	Millones de toneladas de CO ₂ e
NDC	Escenario de NDC Compliance
NDCs	Contribuciones determinadas a nivel nacional
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PV	Solar fotovoltaica
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SENER	Secretaría de Energía
SMR	Reformado de metano con vapor (producción de H ₂)

Lista de tablas

Tabla 2-1.	Empleos proyectados en infraestructura verde de hidrógeno en México.	14
Tabla 3-1.	Tamaño proyectado de la flota de FCEV para autobuses de transporte público y camiones pesados.	20
Tabla 7-1.	LCOH proyectado en el puerto de destino para cada ruta de comercio de hidrógeno, con la clasificación de México con los exportadores estudiados para cada destino.	26

Lista de figuras

Figura 1-1.	LCOH de la producción híbrida eólica-solar fotovoltaica en México en 2050.	11
Figura 2-1.	Reducción de emisiones de GEI por la introducción de hidrógeno verde en México, por tipo de aplicación.	12
Figura 2-2.	Emisiones de GEI evitadas por la sustitución de H ₂ gris por H ₂ verde.	13
Figura 2-3.	Las emisiones proyectadas de GEI evitaron la sustitución de los combustibles fósiles por hidrógeno verde en la generación de energía y la industria.	13
Figura 2-4.	Emisiones de GEI evitadas por la sustitución de combustibles fósiles por H ₂ verde y combustible sintético en el transporte.	14
Figura 2-5.	Empleos creados por el hidrógeno verde en México en 2050.	15
Figura 2-6.	Valor de mercado de H ₂ verde en 2050 para segmentos principalmente pertinentes a PEMEX y CFE (izquierda) y la industria privada (derecha).	15
Figura 2-7.	Hidrógeno tamaño del mercado de las asignaturas para usos energéticos e industriales.	16
Figura 2-8.	Hidrógeno tamaño del mercado de las asignaturas para el transporte pesado por carretera.	16
Figura 2-9.	Aumento del potencial de fabricación de las tecnologías del hidrógeno en México.	17
Figura 3-1.	LCOH proyectado para hidrógeno verde en la salida del electrolizador y H35 (izquierda), y costo de comparación de energía de diésel, electricidad y H35 (derecha).	18
Figura 3-2.	Curvas de TCO para autobuses de transporte público diésel, eléctricos de batería y FCEV (izquierda) y camiones de carga pesados (derecha).	19
Figura 3-3.	Número proyectado de estaciones de reabastecimiento de hidrógeno H35 para transporte público y FCEV de transporte de carga pesada en México en 2030-2050.	20
Figura 4-1.	Demanda proyectada de hidrógeno para todos los usos finales para el sector privado en México.	22
Figura 5-1.	Demanda proyectada de hidrógeno para todos los usos finales de las empresas estatales.	24
Figura 6-1.	Capacidad instalada para el sistema eléctrico mexicano para 2050 para los dos escenarios evaluados.	25
Figura 7-1.	Desglose de las exportaciones de hidrógeno por componentes de costos de México a la UE en 2030.	27
Figura 7-3.	Desglose de las exportaciones de hidrógeno en 2030 por componentes de costos de México a California.	27

Resumen ejecutivo

El H₂ verde se produce dividiendo el agua en oxígeno e hidrógeno a través de la electrólisis. Cuando se suministra con energía renovable, puede proporcionar una alternativa de cero emisiones de carbono que es independiente de los recursos fósiles, evitando volatilidad en precio y suministro.

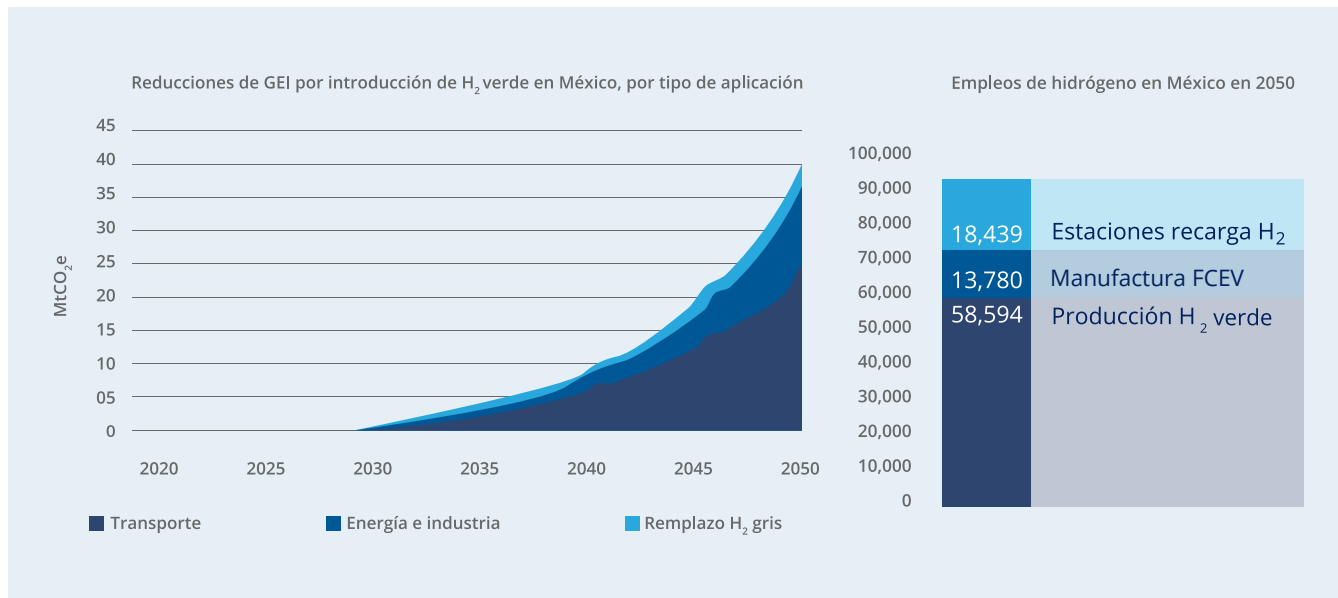
El despliegue del hidrógeno verde podría sentar las bases para nuevas oportunidades para las empresas públicas y privadas como un elemento clave para la descarbonización con importantes aplicaciones en energía, movilidad e industria para ayudar a México a cumplir con sus objetivos climáticos, y a la vez crear nuevos empleos y oportunidades de negocio.

En México, si se dan los incentivos y políticas públicas adecuadas y las condiciones favorables para la adopción de la industria, se podrían desplegar más de 670 MW de electrólisis para 2030. En 2050 la capacidad nacional de electrólisis podría alcanzar los 38.7 GW, impulsada por 15.5 mil millones de dólares de inversión desde finales de la década de 2020 y la creación de un mercado mexicano de hidrógeno verde valorado en 5.7 mil millones de dólares por año.

Cerca de 300 MtCO₂e podrían evitarse para 2050 mediante la introducción de H₂ verde en México. Dos tercios de la reducción de emisiones corresponden a la sustitución de combustibles fósiles en vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV) para el transporte público y de carga.

Para 2050 la introducción de tecnologías de hidrógeno verde podría reducir más de 40 MtCO₂e de emisiones cada año: hasta en 26.7 MtCO₂e en el sector del transporte, 3.2 MtCO₂e en las operaciones de PEMEX, y hasta 7.6 MtCO₂e en almacenamiento de energía, usos térmicos y otras aplicaciones industriales.

Figura 1. Reducción de emisiones de GEI y empleos creados por el hidrógeno verde en México.

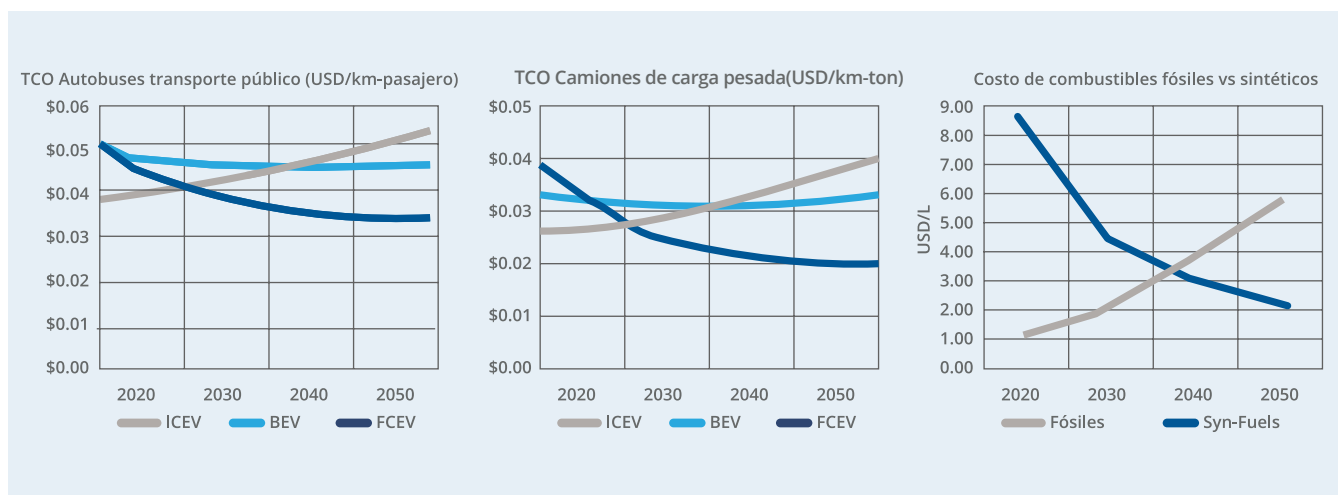


El hidrógeno verde también puede ser un motor de creación de empleo. A mediados de siglo 90,000 personas en México podrían trabajar en infraestructura de H₂ verde y la producción de FCEV. El 67% del empleo creado estará en la producción de hidrógeno, el 20% en estaciones de reabastecimiento de hidrógeno (HRS), y el 13% en la industria automotriz en la manufactura de FCEV de hidrógeno.

México tendrá el potencial de instalar hasta 22 TW de capacidad de electrólisis en todo su territorio para

producir hidrógeno verde a un costo promedio de 1.4 USD/kg en 2050, alimentado principalmente por generación fotovoltaica de bajo costo. El principal motor para la adopción del hidrógeno verde será su competitividad de costos, la cual se proyecta que se logrará en México para la mayoría de las aplicaciones alrededor de 2040 o 2050, dependiendo del nivel de apoyo gubernamental, la adopción de la industria y la reducción de costos globales de las tecnologías de hidrógeno. Los costos nivelados de hidrógeno (LCOH) promedio en México serán de 2.55 USD/kg en 2030 y 1.22 USD/kg en 2050.

Figura 2. Curvas de TCO¹ para ICEV, BEV y FCEV para autobuses de transporte público (izquierda), camiones de carga (centro), y costo de diésel frente a syn-fuels (derecha).



El segmento que presenta las mayores oportunidades de negocio es el transporte terrestre pesado, siendo los primeros en los que el hidrógeno verde alcanzará la competitividad de costos. Los autobuses de transporte público y los camiones de carga serán más baratos que los vehículos con motor de combustión interna (ICEV) convencionales y los vehículos eléctricos de batería (BEV) antes de 2030 sobre una base de costo total de propiedad (TCO), lo que impulsará la adopción temprana.

Para 2050, hasta medio millón de FCEV de servicio pesado podrían estar circulando en México, con alrededor del 50% en transporte público y el 50% en el transporte de carga de larga distancia. En 2050, el suministro de hidrógeno verde en HRS para estos FCEV en lugar de combustibles fósiles representaría una oportunidad con valor de 3.6 mil millones de dólares por año, reduciría 22 MtCO₂e/año de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y permitiría el despliegue de 19.4 GW de capacidad de electrólisis. Para llegar allí, para 2030 más de 3 mil FCEV estarían en las carreteras abastecidas por 150 MW de electrólisis y en 2040 la demanda de H₂ verde tan solo para autobuses públicos sería la misma que la demanda total de hidrógeno de PEMEX en 2020.

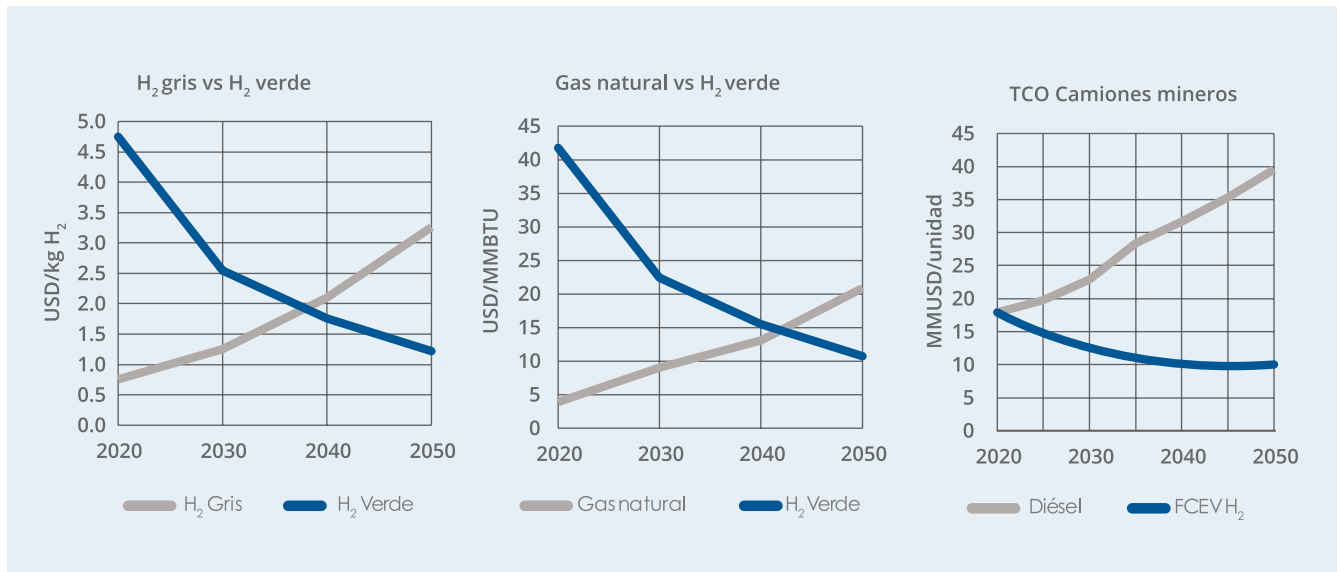
Los combustibles sintéticos serán los siguientes en alcanzar la paridad de costos en 2035 para alimentar la industria de la aviación con un combustible neutro en carbono. Estos hidrocarburos sintéticos producidos mediante la combinación de H₂ verde con CO₂ capturado podrían sustituir aproximadamente 9,200 barriles de petróleo equivalente (BOE) por año para 2050, suministrando el 12% de la demanda de combustible de la aviación y contribuyendo a un tercio de los objetivos de reducción de emisiones del sector del transporte establecidos en el NDC de México. Sólo para esta aplicación, se necesitarían 3,500 MW de capacidad de electrólisis para 2050.

¹ Los cálculos de TCO consideran viajes de 65.000 km/año para autobuses de transporte público y 160.000 km/año para camiones de carga pesados para todas las tecnologías.

La mayor área de oportunidad para el hidrógeno verde en la industria se encuentra en el sector minero, con una demanda que podría alcanzar el medio millón de toneladas por año para 2050. De esta demanda de H₂ verde, el 50% alimentaría 1,500 camiones mineros de celda de combustible, el 42% se utilizaría para reducir una cuarta

parte del mineral de hierro del país para la fabricación de acero, y el 8% para suministrar 4.3 PJ de energía para las aplicaciones térmicas de la industria minera. En conjunto, representarían más del 80% de la demanda del sector privado no destinada al transporte para 2050.

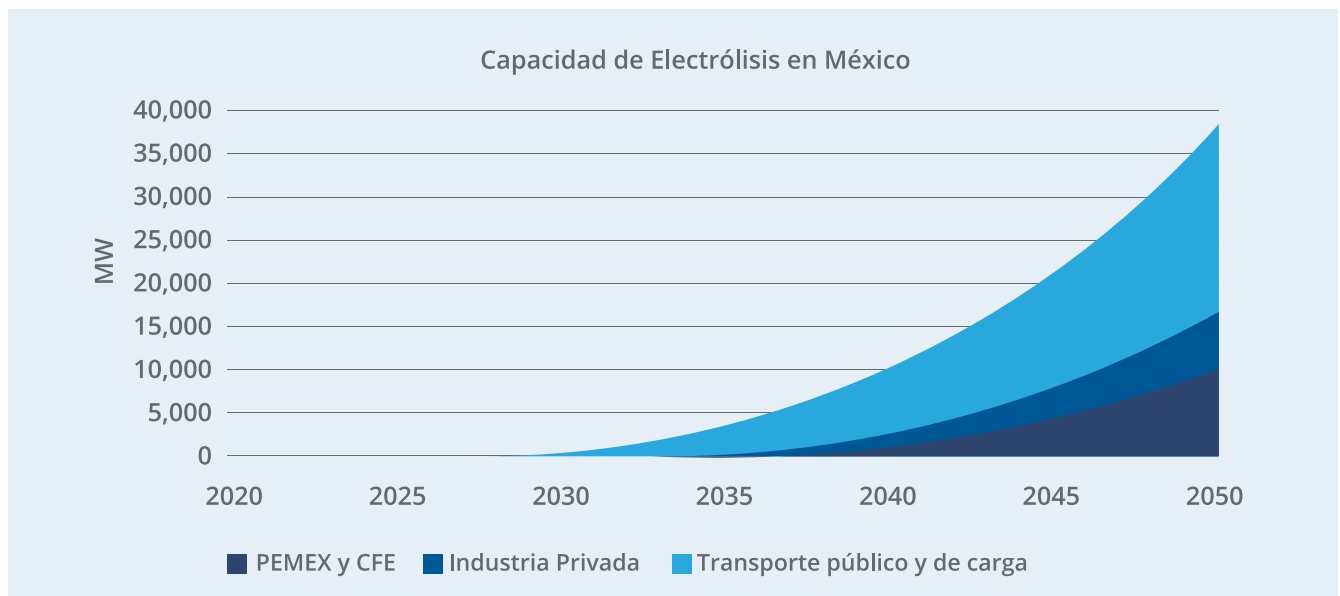
Figura 3. Curvas de costo de hidrógeno vs hidrógeno verde (izquierda), gas natural vs hidrógeno verde (centro) y TCO de camiones mineros FCEV y diésel (derecha).



Incluso antes de 2030, PEMEX y CFE podrían sentar las bases para el desarrollo a gran escala de un sector del hidrógeno verde en México con más de 11GW de electrólisis instalada para 2050 y un mercado de H₂ verde de 1,200 millones de dólares por año, contribuyendo a su soberanía energética con un suministro producido totalmente a nivel local y libre de carbono.

Para 2050, PEMEX podría producir cada año cerca de 1.4 millones de toneladas de amoniaco verde para hacer fertilizantes cada año y refinar más de 750 mil barriles de petróleo por día utilizando hidrógeno verde.

Figura 4. Despliegue proyectado de la capacidad de electrólisis en México.



En el sistema eléctrico nacional, el almacenamiento de energía con hidrógeno verde podría permitir un aumento en la generación de energía renovable del 2% para 2050, y CFE podría alimentar 670 MW de plantas de energía térmica utilizando hidrógeno verde en una cantidad comparable con la demanda total de hidrógeno de PEMEX en 2018. Una mezcla de gas natural con hidrógeno podría inyectarse en la red de gas natural pero limitada a pequeñas cantidades en regiones específicas del país con buenos recursos renovables y un fuerte incentivo de descarbonización dada su baja competitividad económica, representando menos de 460 MW de electrólisis en 2050.

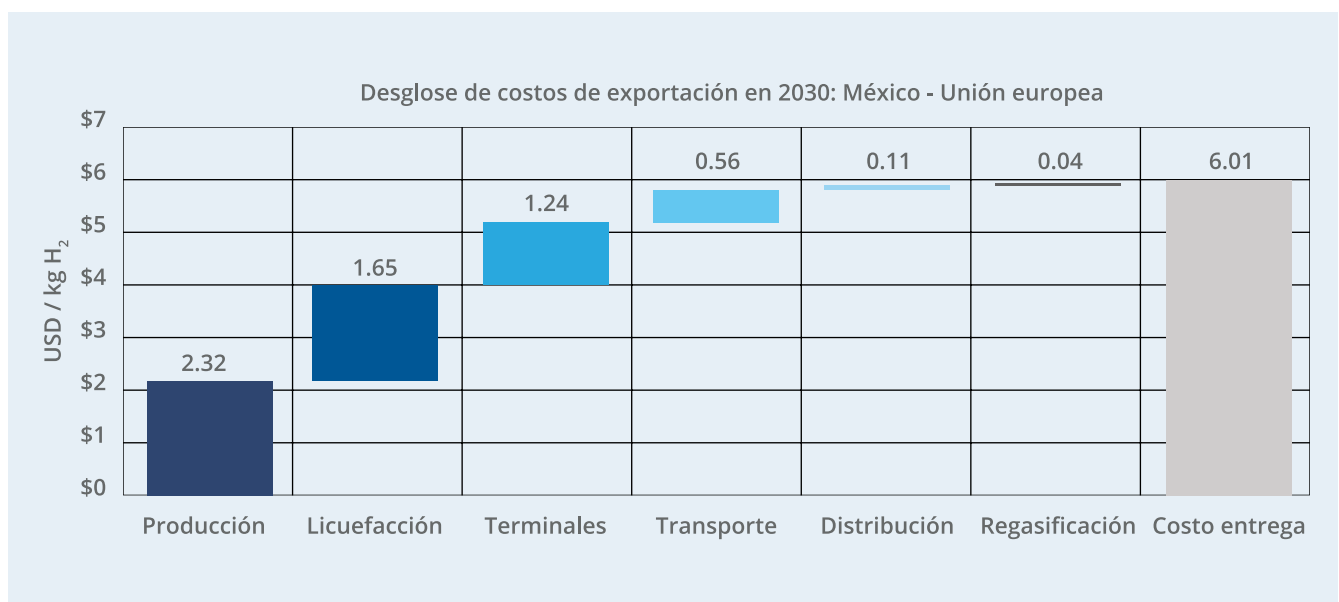
Las aplicaciones térmicas en la industria química y la fabricación de cemento presentarán una demanda moderada de H₂ verde que requerirá 520 MW y 400 MW de electrólisis, respectivamente, y reemplazarán conjuntamente hasta 350 mil millones de pies cúbicos de gas natural por año para 2050. Las oportunidades como materia prima para la fabricación de vidrio plano, resinas sintéticas y margarinas serán menores en relación con el

mercado nacional de H₂ verde, donde incluso un reemplazo completo del suministro por hidrógeno verde sólo demandaría 3,500 ton/año para 2050.

México también tiene el potencial de convertirse en un fuerte exportador de hidrógeno verde. Para 2030 México podría exportar más de 300 millones de dólares de H₂ verde. En comparación con los grandes exportadores potenciales de hidrógeno verde, México se coloca como un exportador competitivo de larga distancia a los mercados de Europa y Asia, dado un bajo costo proyectado de producción del hidrógeno habilitado por el buen potencial renovable y su posición geográfica privilegiada junto a los EE.UU. y con acceso a los océanos Atlántico y Pacífico en una latitud norte, lo que le permite competir estrechamente con Chile y Australia.

En 2030, el H₂ verde mexicano podría entregarse en Europa con un costo de 6 USD/kg y por ducto a los estados fronterizos de EE.UU. a 2.5 USD/kg.

Figura 5. Desglose de costos de exportación de hidrógeno verde desde México hacia la Unión Europea en 2030, con transporte marítimo de H₂ líquido.



Además, el hidrógeno podría impulsar el desarrollo de nuevas industrias manufactureras en el país. México tiene el potencial de posicionarse como un fabricante líder de FCEV y ser competitivo en la fabricación de turbinas de potencia, transporte y equipos de almacenamiento de hidrógeno.

Para alcanzar este potencial, el país ya cuenta con capacidades intelectuales, financieras y legales desarrolladas. Sin embargo, México debería replantear su política climática, promover las energías renovables desde la perspectiva política y regulatoria, garantizar la protección de las inversiones, desarrollar una Estrategia Nacional del Hidrógeno con objetivos y acciones definidas, y asignar financiamiento e incentivos para el desarrollo y adopción de infraestructura y tecnologías de hidrógeno verde.

Estas medidas podrían permitir que el hidrógeno verde se vuelva competitivo en costos hasta una década antes en México y permita un despliegue acelerado desde la década de 2030, lo que permitiría a México unirse a la carrera mundial del hidrógeno verde como un jugador fuerte en la región.

1. Introducción

El hidrógeno verde puede proporcionar oportunidades para su adopción por empresas de los sectores público y privado con aplicaciones en el transporte, la generación de energía y como materia prima para la industria. Gobiernos y las empresas de todo el mundo ven al hidrógeno verde como un vector clave para la descarbonización de una amplia gama de procesos para cumplir con los objetivos climáticos y se espera que el despliegue del sector del hidrógeno verde sienta las bases para nuevas oportunidades de negocio y de creación de valor a escala global y en México.

En México, con una geografía afortunada, un ecosistema industrial dinámico y un panorama energético en evolución, la infraestructura de hidrógeno verde podría crecer de manera realista para emplear a 90 mil trabajadores a mediados de siglo, reducir alrededor de 27 MtCO₂e de emisiones de GEI por año, y representar un mercado de demanda anual de 5.7 mil millones de dólares, alcanzando cerca de 39 GW de capacidad instalada de electrólisis dentro de un entorno favorable para su desarrollo.

Este informe resume los hallazgos de una serie de estudios que constituyen el estudio “Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación”, analizando las oportunidades de hidrógeno verde en diferentes aplicaciones en el país como la integración de la energía renovable en la red, oportunidades para PEMEX (en refinación, producción de amoníaco y combustibles sintéticos) y CFE (en H₂ turbinas de gas y H₂ verde e inyección en la red de gas), oportunidades para el sector privado (minería, cemento e industria química), en el transporte terrestre pesado (autobuses públicos y camiones de carga), el potencial para exportar hidrógeno verde y los impactos en el país del desarrollo de su cadena de valor en la creación de empleo, el potencial de mercado, la reducción de emisiones de GEI y la fabricación de tecnologías de hidrógeno.

Para la mayoría de los usos finales se han desarrollado dos escenarios realistas. ‘NDC Compliance’ (NDC) asume que México cumplirá con sus compromisos climáticos para cumplir con el Acuerdo de París de acuerdo con sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs), pero sin ir más allá en cuanto a acción climática o ambiental. ‘Hydrogen Breakthrough’ (H₂B) hace suposiciones más optimistas con una alta adopción de la industria, una disminución más pronunciada de los costos y un apoyo intensivo a las políticas en todo el mundo y en México, siguiendo las proyecciones del Hydrogen Council. A menos que se indique lo contrario, los resultados mostrados en este estudio corresponden al escenario Hydrogen Breakthrough para resaltar el potencial de hidrógeno verde del país y sus impactos.

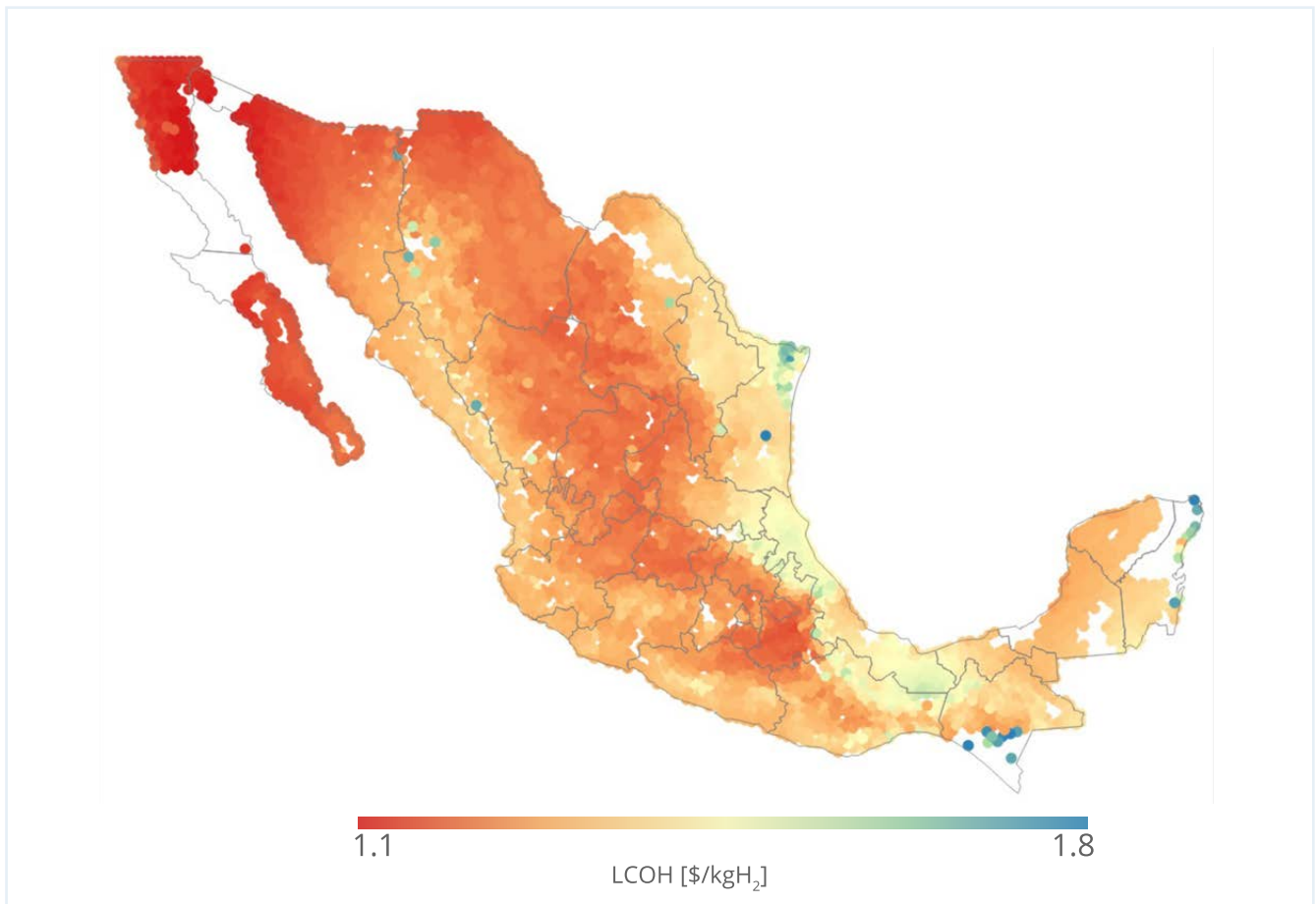
México: un país con alto potencial para producir hidrógeno verde

El hidrógeno verde se produce mediante la electrólisis del agua, un proceso que divide la molécula H₂O con electricidad para separar el hidrógeno y el oxígeno. A diferencia del hidrógeno gris convencional basado en combustibles fósiles, producido principalmente a partir de procesos de reformado en vapor de gas natural (SMR) o de gasificación de carbón, el hidrógeno verde proporciona un combustible bajo en carbono, un vector energético o una materia prima química que se puede producir localmente y es independiente de los hidrocarburos, evitando restricciones en suministro y la volatilidad de los precios. Esto permite nuevos usos trascendentales del hidrógeno en almacenamiento de energía renovable, movilidad eléctrica, productos químicos verdes, descarbonización del gas natural, combustibles sintéticos líquidos, gases renovables, y calor y energía para industria y edificaciones.

En México, el mercado de hidrógeno existente consumió más de 220,000 toneladas/año en 2020, de las cuales el 98.6% son cautivas (producción en sitio) y en manos de PEMEX. La producción de hidrógeno mercante (para venta a terceros) en México es de aproximadamente 2,650 toneladas por año, del cual la mayoría es proporcionada por las empresas Air Liquide, Linde y Cryoinfra. Hay una pequeña balanza comercial internacional de hidrógeno en México de menos de 750 toneladas/año liderada por transacciones privadas.

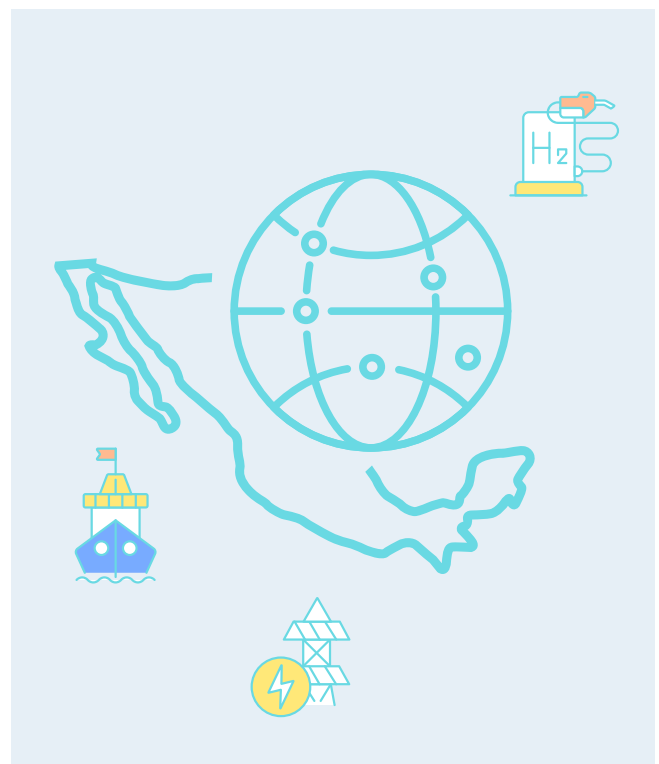
México se encuentra en una posición privilegiada para convertirse en un líder en el desarrollo del hidrógeno verde. El país tiene un potencial de energía renovable fuerte y distribuido, además de una infraestructura energética bien desarrollada que podría permitir eficazmente el desarrollo del hidrógeno verde. Adicionalmente, hay universidades y centros de investigación mexicanos que han estado trabajando en tecnologías de hidrógeno desde la década de 1990.

Figura 1-1. LCOH de la producción híbrida eólica-solar fotovoltaica en México en 2050.



México tiene el potencial geográfico de instalar hasta 22 TW de capacidad de electrólisis en todo el país para producir H_2 verde a un costo nivelado del hidrógeno (LCOH) promedio de 1.4 USD/kg con la evolución tecnológica esperada para 2050, impulsado principalmente por generación fotovoltaica de bajo costo.

El principal motor para la adopción del hidrógeno verde será su competitividad de costos, que se proyecta que se logrará para la mayoría de las aplicaciones alrededor de 2040 o 2050, dependiendo del nivel de apoyo gubernamental, la adopción de la industria y la reducción de costos globales de las tecnologías de hidrógeno con proyecciones de LCOH promedio en México de 2.55 USD/kg en 2030 y 1.22 USD/kg en 2050.

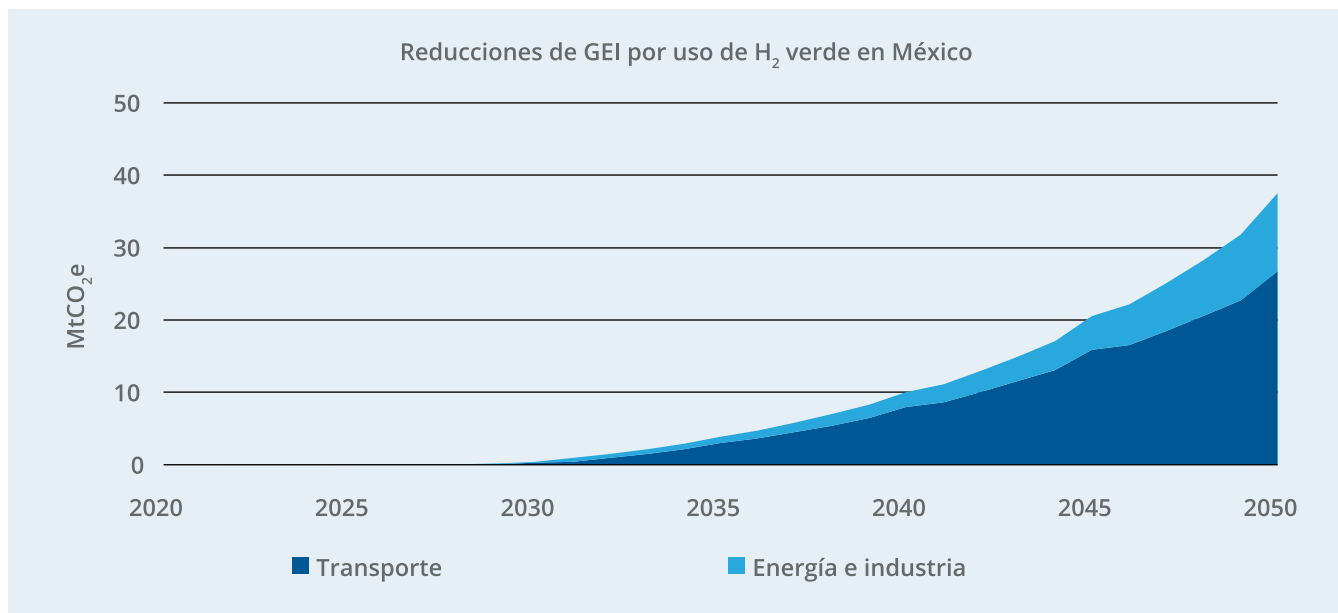


2. Impacto potencial del hidrógeno verde en México

Impacto Ambiental: 300 MtCO₂e de reducciones de Gases de Efecto Invernadero GEI acumuladas para 2050

En 2050, la introducción de las tecnologías de hidrógeno verde en México podría reducir emisiones por hasta 26.7 MtCO₂e/año en FCEV de transporte público y de carga, 3.2 MtCO₂e/año en las operaciones de PEMEX, y hasta 7.6 MtCO₂e/año en almacenamiento de energía, usos térmicos y otras aplicaciones industriales. En total, para 2050 podrían evitarse 40 MtCO₂e/año equivalentes al 8.4% de las emisiones del país en 2018. Para mediados de siglo, 300 MtCO₂e de emisiones acumuladas pueden ser reducidas por el uso de H₂ verde en México, de los cuales dos tercios corresponden a la sustitución de combustibles fósiles por hidrógeno en vehículos eléctricos de celda de combustible para el transporte público y de carga.

Figura 2-1. Reducción de emisiones de GEI por la introducción de hidrógeno verde en México, por tipo de aplicación.

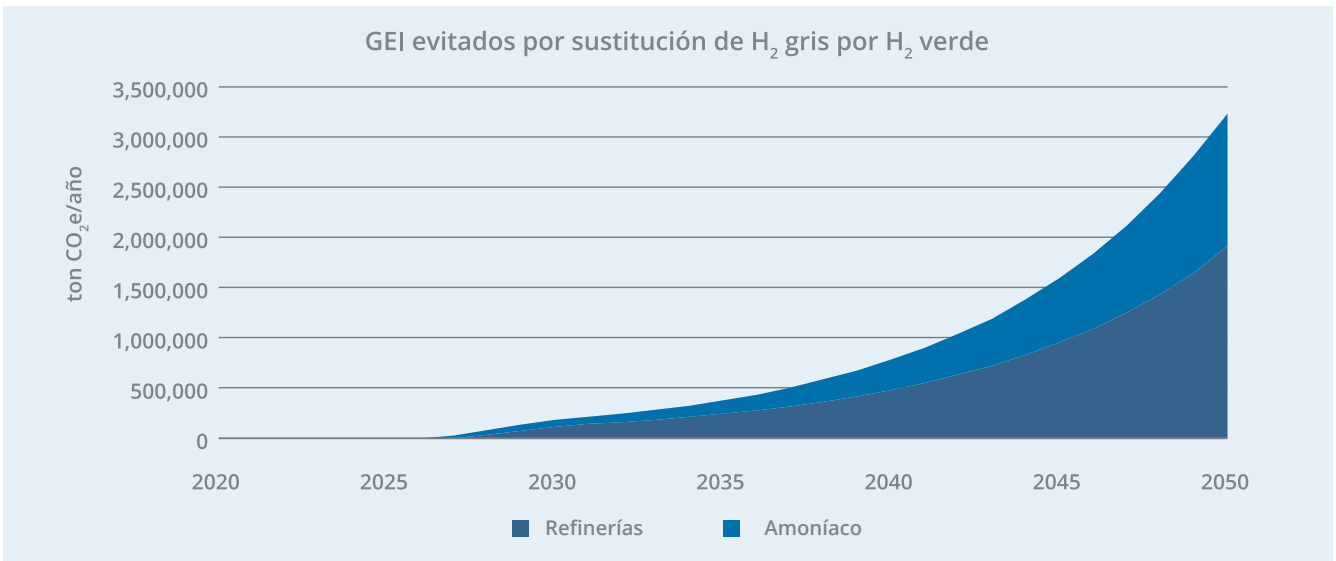


Los usos finales del hidrógeno verde pueden ser divididos en la sustitución hidrógeno gris, sustitución de combustibles fósiles en energía e industria, y en combustibles líquidos para el transporte. El impacto ambiental se calcula con las emisiones de **GEI que podría evitarse** sustituyendo a las tecnologías convencionales como los combustibles fósiles o el hidrógeno producido a partir del reformado de metano con vapor, en millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (MtCO₂e).

El CO₂ que se evita a través de la introducción de hidrógeno verde por parte de PEMEX en refinerías y la producción de amoníaco en México superaría los 180 ktCO₂e/año para 2030 y alcanzaría más de 3.2 MtonCO₂e/año para 2050.

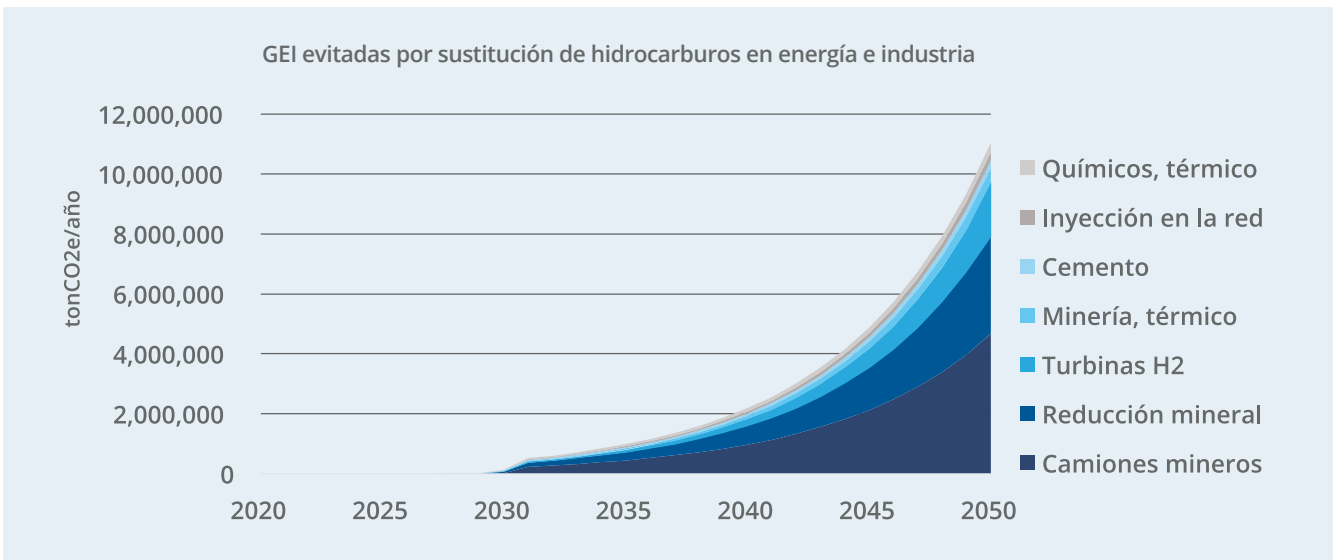


Figura 2-2. Emisiones de GEI evitadas por la sustitución de H₂ gris por H₂ verde.

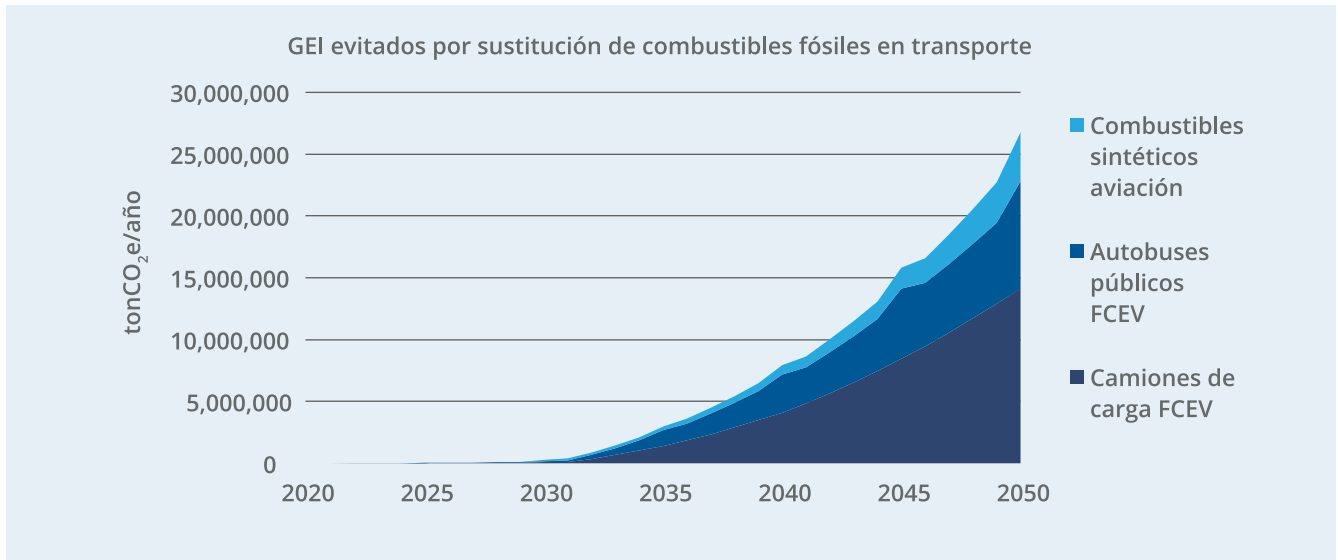


La sustitución de los combustibles fósiles por hidrógeno verde para aplicaciones en la generación de energía y la industria tiene el potencial de reducir hasta 7.6 MtCO₂e/año para 2050, con alrededor de tres cuartas partes de la reducción proveniente de la industria minera y metalúrgica, principalmente de camiones mineros y reducción de minerales, y una fracción menor a una quinta parte de la generación de energía en turbinas de hidrógeno.

Figura 2-3. Emisiones de GEI evitadas por la sustitución de combustibles fósiles por hidrógeno verde en la generación de energía y la industria.



Para 2050, la sustitución de los ICEV por FCEV y el diésel por combustibles sintéticos podría reducir las emisiones de GEI en hasta 26,7 tonCO₂e/año, de los cuales alrededor de la mitad provendrían de camiones FCEV, un tercio de los autobuses FCEV y el 15% del uso de combustible sintético.

Figura 2-4. Emisiones de GEI evitadas por la sustitución de combustibles fósiles por H₂ verde y combustible sintético en el transporte.

Uso del agua y desalinización: bajo impacto en la disponibilidad y el costo

El proceso de dividir la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno en un electrolizador hoy en día requiere aproximadamente 16 litros de agua por kilogramo de hidrógeno verde y puede alcanzar los 11 litros/kgH₂ a medida que mejoran las eficiencias. En regiones donde el recurso hídrico es escaso y el agua de mar está disponible, como la península de Baja California, se requerirá la desalinización de agua para la producción de hidrógeno.

A partir de un estudio de caso del reporte de esta serie sobre “Integración de energía renovable variable en la red” ubicado en Baja California, se obtuvo un valor paramétrico de inversión en plantas desalinizadoras de agua de mar de 10,600 USD por MW de electrólisis. Esto implicaría un aumento de menos del 1% del CAPEX por MW requerido tan solo para el sistema de electrólisis, disminuyendo aún más en proporción si se incluyen las

inversiones adicionales en energía renovable y activos de transporte y almacenamiento de hidrógeno.

Impacto Social: 90,000 empleos creados en 2050

Más de 90,000 personas podrían ser empleadas en el sector del hidrógeno verde en México en 2050. Esto es comparable a los 98,000 empleos en el sector de energías renovables en México en 2019 según la base de datos de empleos de IRENA, y más de una quinta parte de las personas empleadas en las industrias extractivas en 2020 según informó el Servicio Nacional de Empleo.²³ El área más grande de creación de empleo está en la producción de hidrógeno y la infraestructura requerida, que se proyecta que empleará a casi 1,600 personas en 2030 y cerca de 58,600 trabajadores en 2050. La segunda mayor área de empleo será en la infraestructura de recarga de hidrógeno para vehículos, que contratará a más de 360 personas en 2030 y crecerá a 18,400 en 2050, de las cuales alrededor de tres cuartas partes de ellos se son empleos indirectos.

Tabla 2-1. Empleos proyectados en infraestructura verde de hidrógeno en México.

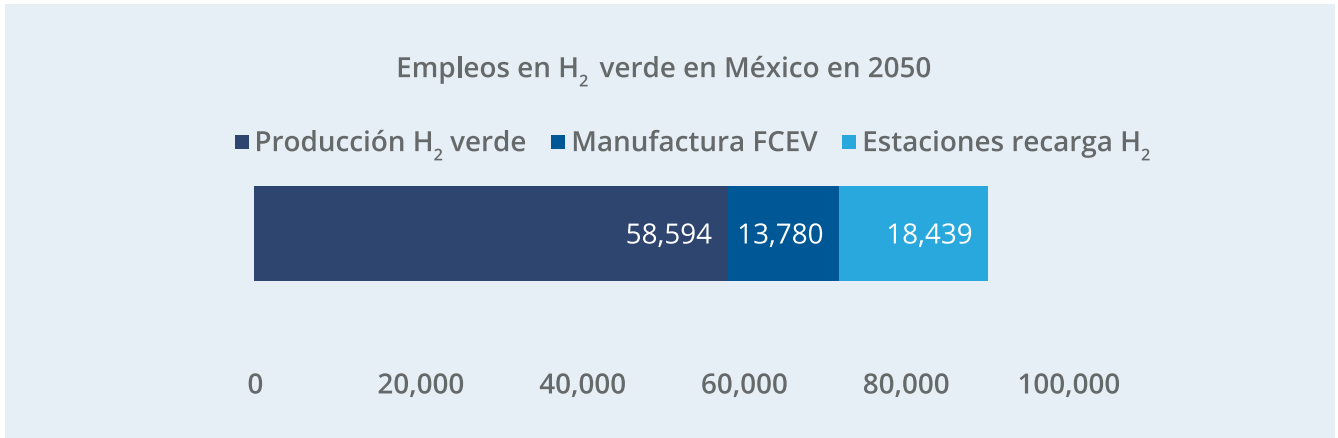
Empleos proyectados por el hidrógeno verde en México	Empleos en 2030	Empleos en 2050
Producción de hidrógeno	1,596	58,594
Construcción e instalación	765	34,701
Operación y mantenimiento	356	16,154
Fabricación nacional de electrolizadores	475	7,739
Industria automotriz – manufactura FCEV	186	13,780
Estaciones de recarga de hidrógeno (HRS)	363	18,439
Empleos directos	90	4,580
Empleos indirectos	273	13,859
Total de empleos proyectados	2,145	90,813

² IRENA, Energía renovable y empleos, 2020.

³ Servicio Nacional de Empleo (SNE), Empleo por sectores económicos - Cuarto trimestre de 2020.

En tercer lugar, la industria automotriz contrataría a menos de 200 trabajadores en 2030, y crecería hasta emplear a cerca de 13,800 trabajadores a mediados de siglo, de los cuales alrededor de dos tercios estarían empleados directamente en la fabricación de FCEV.

Figura 2-5. Empleos creados por el hidrógeno verde en México en 2050.

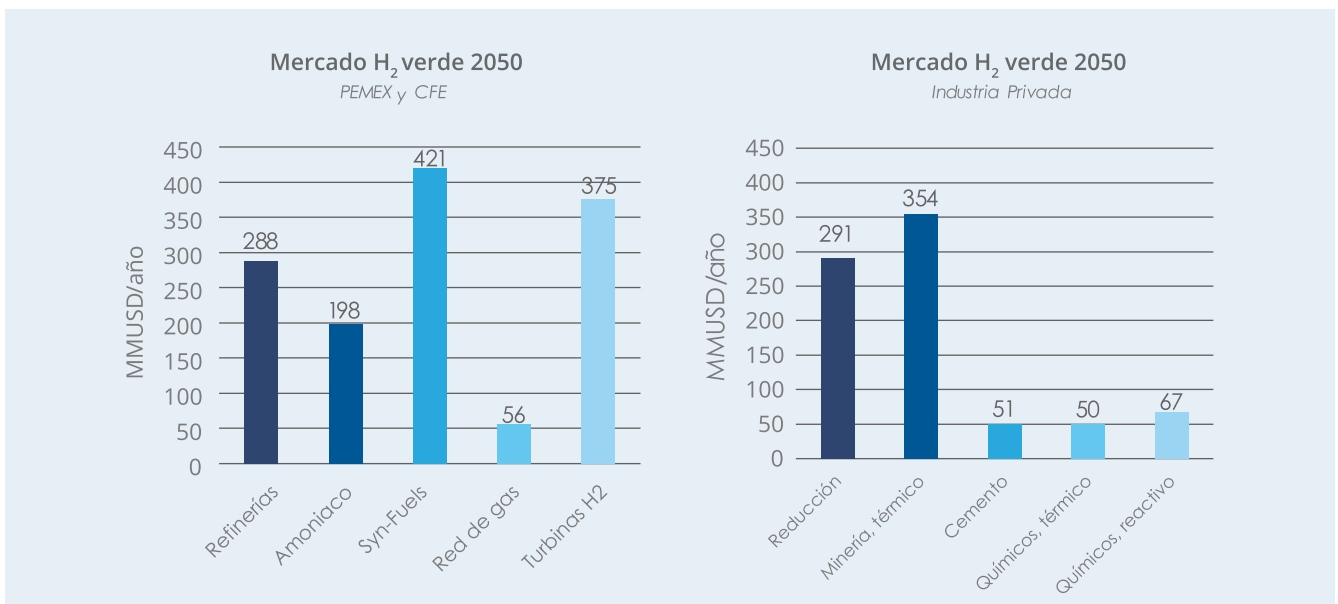


El cálculo de la creación de empleos asociados al desarrollo del sector del hidrógeno en México proviene de un análisis realizado por Hincio que reúne investigación existente de fuentes como Navigant Consulting⁴, Element Energy⁵, y CE Delft⁶ que estiman la creación de empleos por el despliegue de proyectos e infraestructura de hidrógeno, a partir de indicadores de empleos equivalentes a tiempo completo creados para cada paso de la cadena de valor del hidrógeno por capacidad instalada de electrólisis o monto de inversión en CAPEX.

Impacto económico: mercado anual de 5.7 mil millones de dólares en 2050

Se proyecta que el desarrollo de un sector de hidrógeno verde en México creará nuevos mercados para diferentes segmentos y aplicaciones. Así mismo se requerirán inversiones considerables, inicialmente para la infraestructura de producción de hidrógeno y posteriormente para el desarrollo de infraestructura y servicios asociados. El valor de mercado anual del hidrógeno y las inversiones de CAPEX necesarias para satisfacer la demanda de hidrógeno son calculados mediante modelos propietarios de Hincio.

Figura 2-6. Valor de mercado de H₂ verde en 2050 para segmentos principalmente pertinentes a PEMEX y CFE (izquierda) y la industria privada (derecha).

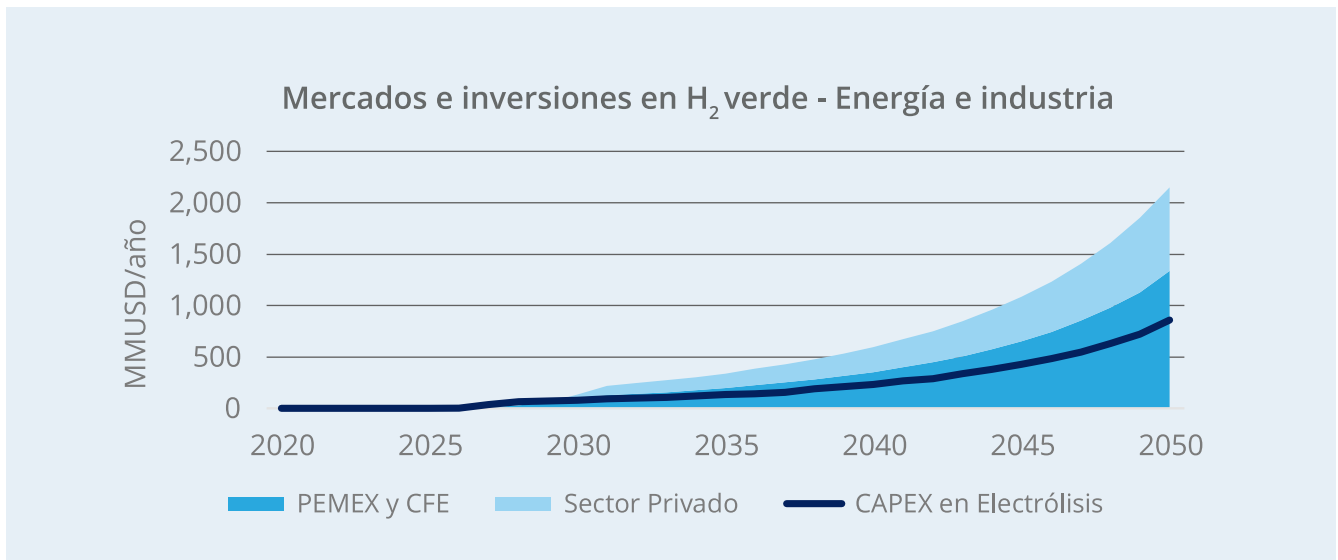


4 Navigant, Gas para el clima – Creación de empleo mediante la ampliación del gas renovable en Europa. 2019.
 5 Element Energy. Hy-Impact Series: Hidrógeno para el crecimiento económico, 2019.
 6 CE Delft, Hidrógeno verde y empleo, 2019.

El impacto conjunto esperado para PEMEX y CFE es de aproximadamente 100 millones de dólares por año para 2030 y más de 1.3 mil millones de dólares anuales en 2050 para abastecer su demanda de hidrógeno. Para PEMEX, el impacto más notable se proyecta en la producción de combustibles sintéticos, con un valor de mercado de H₂ verde de 420 MMUSD/año para 2050, seguido de

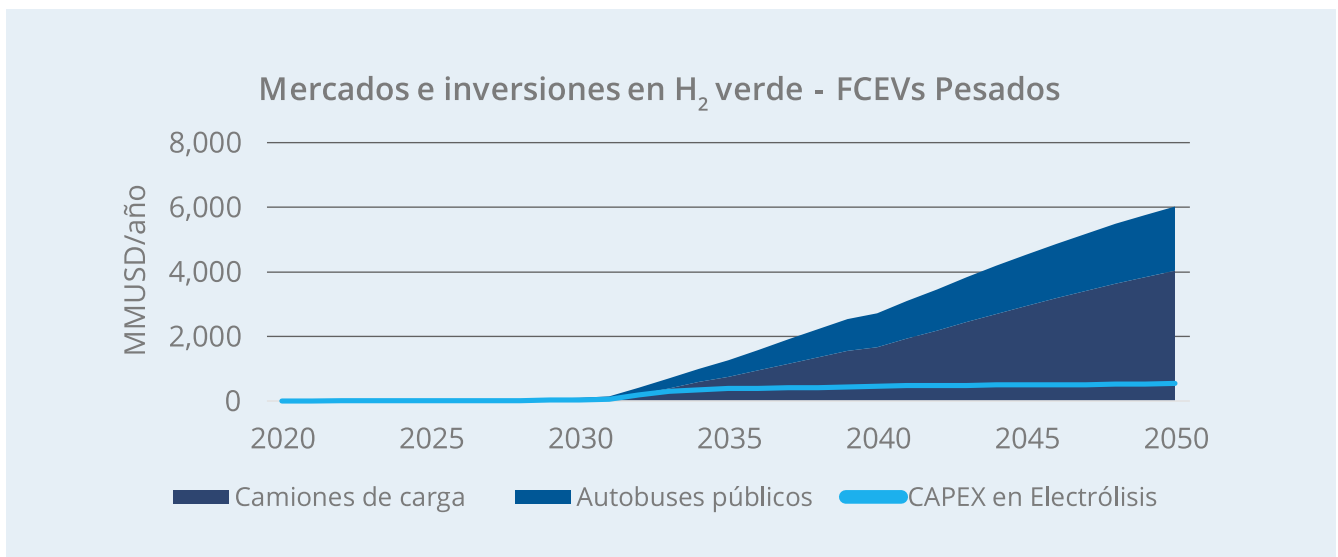
refinerías con cerca de 290 MMUSD/año, y finalmente producción de amoníaco con 200 MUSD/año. Para CFE, se proyecta que el mayor impacto económico será en la generación de electricidad en turbinas impulsadas por hidrógeno y gas natural, con un mercado de H₂ de 375 MMUSD/año para 2050.

Figura 2-7. Tamaño del mercado de H₂ verde e inversiones para usos energéticos e industriales⁷.



Las mayores oportunidades proyectadas en hidrógeno para la industria privada están en camiones mineros FCEV y en la reducción de minerales, que en conjunto representan casi el 80% de su impacto económico, con un valor de 800 MMUSD/año para 2050. Las inversiones acumuladas para el suministro de hidrógeno a PEMEX y CFE se proyectan en cerca de 2.6 mil MMUSD para mediados de siglo, y para abastecer a la industria privada en casi 8.5 mil MMUSD.

Figura 2-8. Tamaño del mercado de H₂ verde para el transporte público y de carga.



⁷ CAPEX: Inversión en plantas de electrólisis.

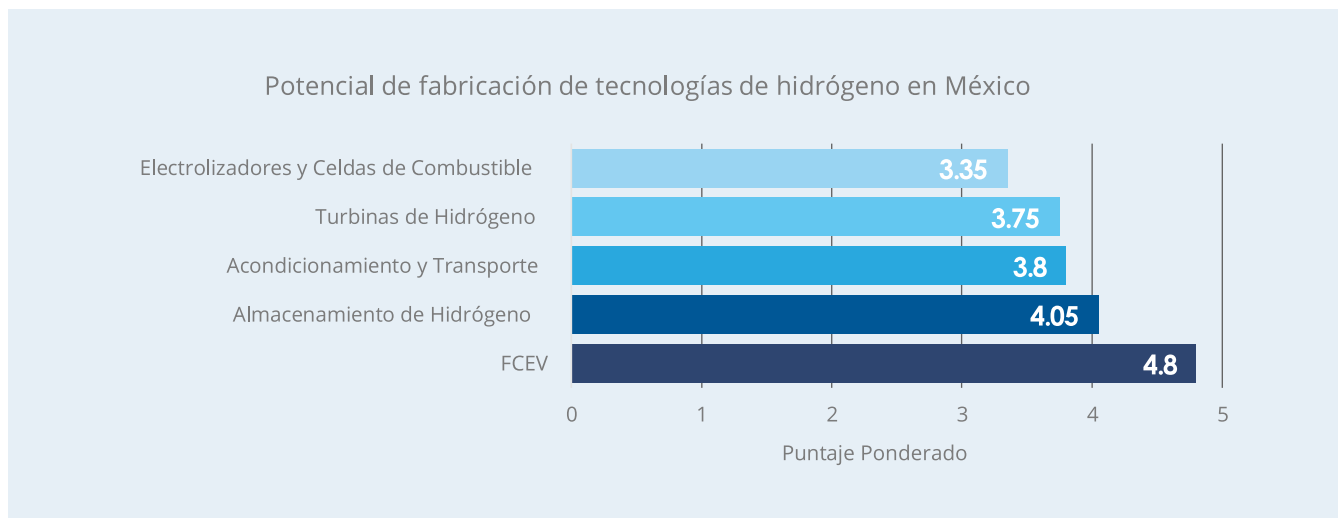
El transporte pesado público y de carga presenta las mayores oportunidades económicas para el hidrógeno en México. Los autobuses de transporte público y los camiones de carga de larga distancia representarán una demanda de hidrógeno que crecerá rápidamente, de modo que se proyecta que el mercado de hidrógeno para el transporte pesado alcance los 6 mil MMUSD/año para 2050, dividido en 2 mil millones de dólares para los autobuses de transporte público y 4 mil millones de dólares para los camiones de carga por año. Cabe mencionar que para estas aplicaciones el mercado de H₂ considerado es el de suministro en estaciones de reabastecimiento HRS, que lleva costos adicionales al de producción como la compresión, transporte, etc., para su despacho hidrógeno comprimido a 350 bar (H35). El valor de producción del hidrógeno verde para este segmento será de 3.6 mil MMUSD/año en 2050.

Se proyecta que la inversión acumulada para la producción del hidrógeno para suministrar la demanda los FCEV de servicio pesado en México alcanzará cerca de 8.5 mil millones de dólares para 2050.

Manufactura de tecnologías de hidrógeno: alto potencial para la industria automotriz

Las industrias ya establecidas en México proporcionan la base para la potencial competitividad del país para la manufactura de tecnologías de hidrógeno, como la fabricación de metales, el manejo de gases industriales, la industria aeroespacial y la automotriz. Estas industrias proporcionan cadenas de valor altamente desarrolladas, infraestructura de fabricación, talento y experiencia calificados, y un alto grado general de adaptabilidad para adoptar nuevas tecnologías y desarrollar cadenas de valor y ecosistemas de fabricación pioneros.

Figura 2-9. Ranking del potencial de México para la manufactura de tecnologías de hidrógeno.



Un análisis muestra el potencial de México para ser competitivo en la fabricación de turbinas 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 para establecer 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 adoptar nuevas tecnologías FCEV. Al considerar también 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 FCEV en todo el mundo.

3. Sector transporte: mayor potencial de demanda de hidrógeno verde

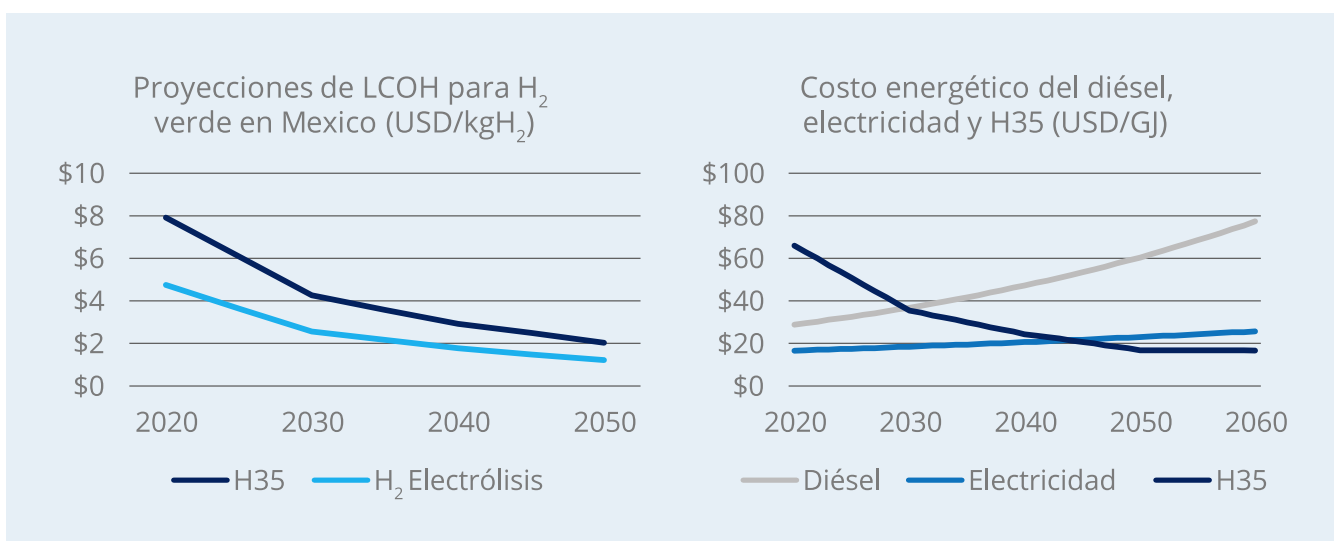
Transporte terrestre pesado: medio millón de FCEV circulando para 2050

El segmento que presenta las mayores oportunidades de negocio es el transporte terrestre pesado, de entre los primeros en los que el hidrógeno verde alcanzará la competitividad de costos. Antes de 2030, los autobuses de transporte público y camiones de carga pesada serán más baratos que los vehículos con motor de combustión interna (ICEV) convencionales y los vehículos eléctricos de batería (BEV), sobre una base de costo total de propiedad (TCO), lo que impulsará la adopción temprana. En 2050, hasta 500,000 FCEV alimentados por hidrógeno verde y sin emisiones de carbono podrían estar circulando en México en el transporte público y de carga.

En México, el sector del transporte es el mayor emisor de GEI, representando alrededor de una cuarta parte de las emisiones nacionales. La electrificación del parque vehicular es una de las medidas a cumplir con la reducción del 19% de las emisiones del segmento para 2030. Los camiones y autobuses pesados de celda de combustible e hidrógeno podrían incorporar una alternativa muy prometedora de cero emisiones de carbono, especialmente para el segmento de carga de larga distancia y en el transporte público.

Los vehículos FCEV almacenan energía en forma de hidrógeno y la utilizan para generar electricidad en una celda de combustible que a su vez impulsa un sistema de propulsión eléctrico para dar propulsión al vehículo. Si se suministran con hidrógeno verde, los FCEV ofrecen una alternativa de transporte con cero emisiones.

Figura 3-1. LCOH proyectado para hidrógeno verde en la salida del electrolizador y H35 (izquierda), y costo de comparación de energía de diésel, electricidad y H35 (derecha).



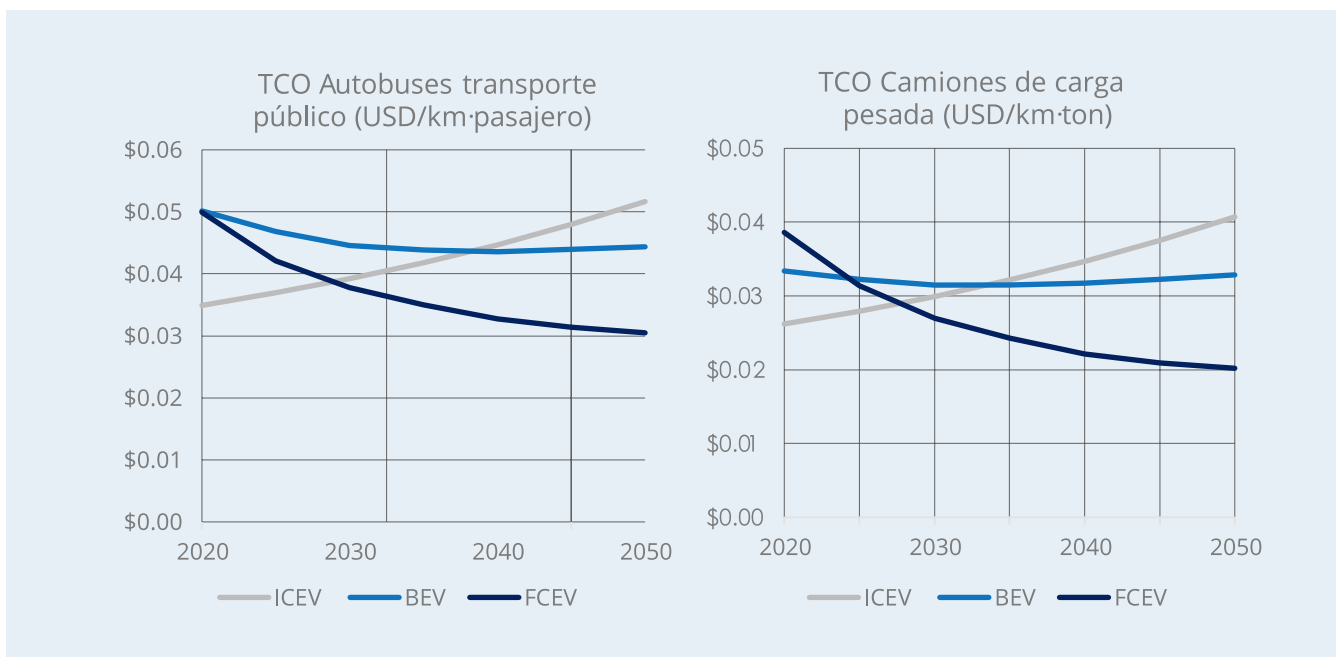
Los FCEV se están posicionando frente a los eléctricos de batería en los segmentos donde el largo alcance y el reabastecimiento de combustible rápido son críticos, como los autobuses de pasajeros y los camiones de carga. Los FCEV alimentados con hidrógeno verde podrían representar una alternativa competitiva y muy prometedora de movilidad con cero emisiones de carbono, especialmente para el segmento de carga de larga distancia y en el transporte público.

El costo de hidrógeno considerado para alimentar autobuses y camiones corresponde al de hidrógeno comprimido a 350 bar, o H35, como es suministrado en las estaciones de recarga HRS. Su costo aumenta en aproximadamente dos tercios en relación con el costo del hidrógeno producido a la salida del electrolizador. Este incremento se atribuye a su compresión, transporte, almacenamiento y suministro en el HRS.

Un análisis de costo total de propiedad (TCO) integra todos los costos para el propietario a lo largo de la vida útil del vehículo y proporciona una base para comparar el costo de diferentes tecnologías de vehículos para un uso en particular. El análisis considera viajes de 65,000 km/año para los autobuses de transporte público y de 160,000 km/año para los camiones de carga pesada.

Los TCO para los FCEV alcanzarán la paridad con los BEV y los FCEV antes de 2030, tanto para el transporte público como para el de carga. Un estudio desagregado del TCO muestra que el mayor costo para los ICEV tanto en 2030 como en 2050 corresponde a al combustible, siendo considerablemente más alto que para los BEV y FCEV incluso antes de 2030. Los costos de adquisición son los componentes de TCO más altos tanto para los BEV como para los FCEV en todo el periodo estudiado, y estos costos disminuyen a medida que el despliegue la tecnología aumenta hacia 2050.

Figura 3-2. Curvas de TCO⁸ para autobuses de transporte público diésel, eléctricos de batería y FCEV (izquierda) y camiones de carga pesada (derecha).



La demanda conjunta de hidrógeno proyectada para autobuses de transporte público y camiones de carga en México es de 13 mil toneladas de H₂ por año en 2030, aumentando a un ritmo exponencial a alrededor de 550 mil toneladas de H₂ por año en 2040, y creciendo tres veces en la década siguiente para alcanzar 1,780 mil toneladas de H₂ por año en 2050.

La capacidad de electrólisis proyectada casi alcanzará los 150 MW en 2030, crecerá más de veinte veces en la siguiente década a 6,200 MW en 2040 y alcanzará casi 19,500 MW en 2050.

Se proyecta que el valor de mercado del hidrógeno comprimido (H35) suministrado en HRS sea de más de 50 millones de dólares para 2030 y crezca a un ritmo acelerado a 1.6 mil millones de dólares en 2040 y 3.6 mil millones de dólares para 2050.

⁸ Los cálculos de TCO consideran recorridos de 65,000 km/año para los autobuses de transporte público y de 160,000 km/año para los camiones de carga pesada para todas las tecnologías.

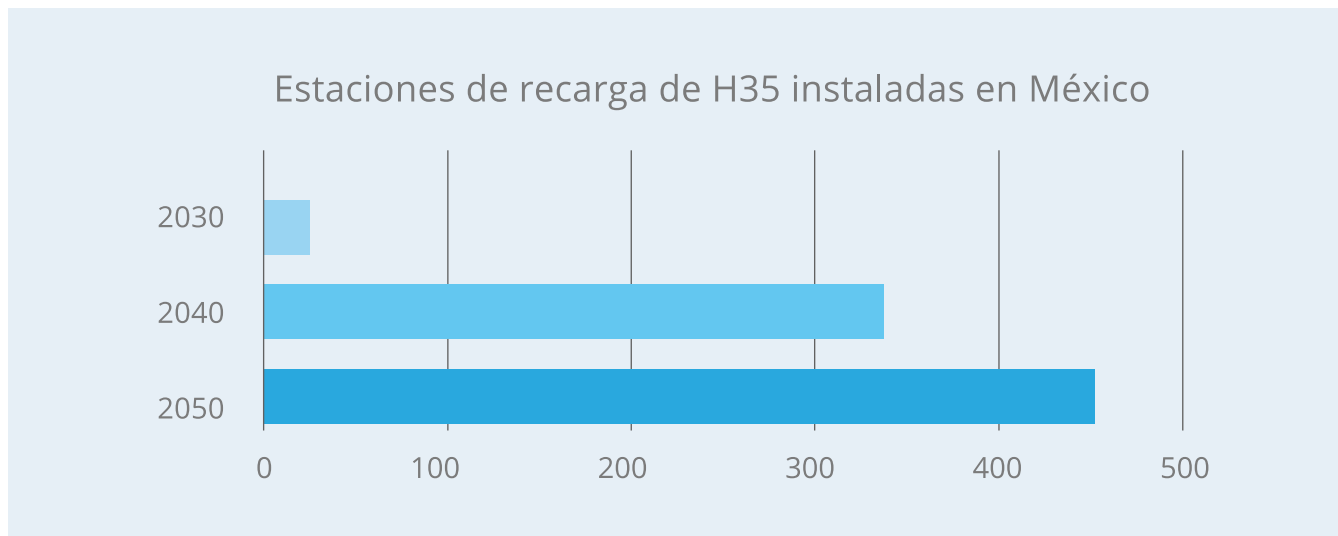
Tabla 3-1. Tamaño proyectado de la flota de FCEV para autobuses de transporte público y camiones de carga pesada.

Año	Flota FCEV		
	Autobuses	Camiones	Totales
2030	1889	1,436	3,325
2040	93,055	69,633	162,689
2050	257,373	242,202	499,575

La proporción de la demanda de hidrógeno fluctúa de alrededor del 40% para los autobuses de transporte público y el 60% para los camiones pesados de 2030 a 2040 y pasa a alrededor de un tercio al transporte público y dos tercios al transporte de carga en 2050. Lo mismo sucede con la correspondiente capacidad de electrólisis necesaria para la producción del hidrógeno demandado y su valor de mercado.

Los valores de mercado H35 proyectados consideran solo su producción y suministro, pero también se crearán grandes mercados complementarios para la producción o importación nacional de FCEV, componentes, servicio de mantenimiento dedicado, transporte de hidrógeno e infraestructura de reabastecimiento, entre otros. Se proyecta que la infraestructura de reabastecimiento de hidrógeno crezca a medida que lo hace la demanda de H₂ de los FCEV, lo que requiere un número creciente de HRS empezando con 14 en 2030 y creciendo a 340 en 2040 y casi 450 en 2050.

Figura 3-3. Número proyectado de estaciones de reabastecimiento de hidrógeno H35 para FCEV de transporte público y de transporte de carga pesada en México.



Los combustibles sintéticos podrían suministrar a la industria de la aviación desde 2035

Los combustibles sintéticos serán los siguientes en alcanzar la paridad de costos en 2035 para suministrar a la industria de la aviación con combustible neutro en carbono. Estos hidrocarburos sintéticos producidos mediante la combinación de H₂ verde con CO₂ capturado podrían sustituir aproximadamente 9,200 barriles de petróleo equivalente por año para 2050, suministrando el 12% de la demanda de combustible de la aviación y contribuyendo a un tercio de los objetivos de reducción de emisiones del sector del transporte establecidos en el NDC de México. Solo para esta aplicación, se necesitarían 3.500 MW de capacidad de electrólisis a mediados de siglo. En el tomo V sobre oportunidades de hidrógeno verde para las empresas paraestatales se puede encontrar más contexto y análisis sobre el potencial despliegue de los combustibles sintéticos en México.

4. Hidrógeno verde en la industria: 80% de la demanda en el sector minero

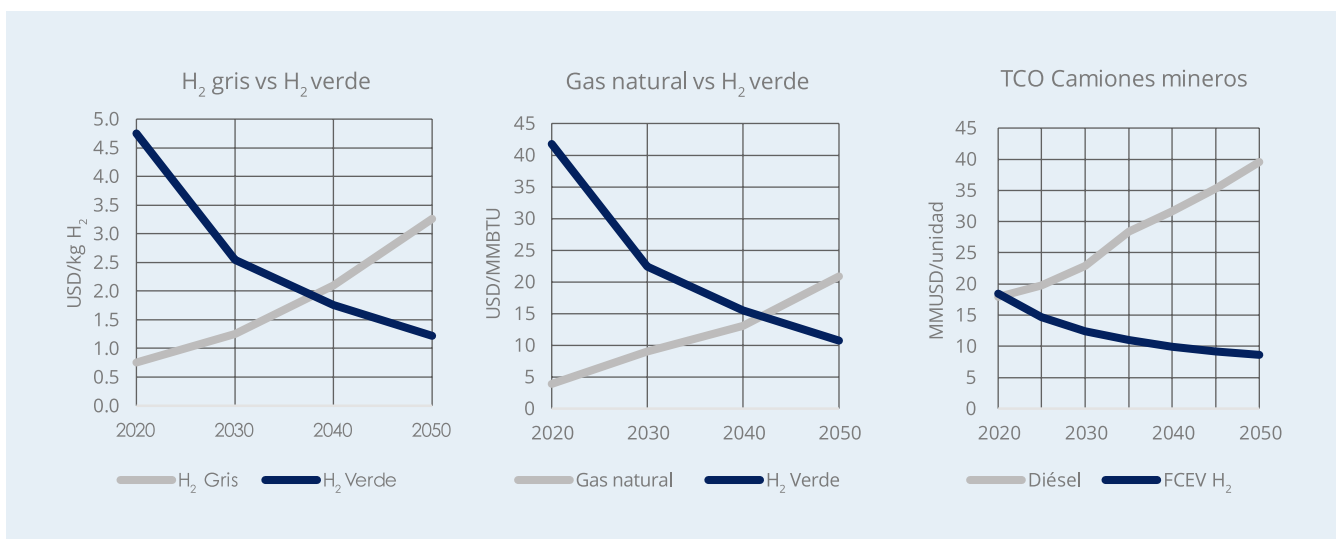
Empresas de todo el mundo ven al hidrógeno verde como un vector clave para la descarbonización y cumplir con sus objetivos climáticos y se espera que el desarrollo de la economía del hidrógeno establezca el terreno para nuevas oportunidades de negocio y creación de valor.

Sector minero: los camiones mineros y la reducción de minerales impulsarán la demanda de H₂ verde.

La mayor área de oportunidad para el hidrógeno verde en la industria está en el sector minero, con una demanda que podría alcanzar medio millón de toneladas por año para 2050. El 50% de esta demanda alimentaría

1,500 camiones de extracción mineros de celda de combustible, el 42% se utilizaría para reducir una cuarta parte del mineral de hierro del país para la fabricación de acero, y el 8% para suministrar 4.3 PJ de energía para las aplicaciones térmicas de esta industria. En conjunto, estas aplicaciones representarán más del 80% de la demanda del sector privado no destinado al transporte para 2050.

Figura 3. Curvas de costo de hidrógeno gris vs hidrógeno verde (izquierda), gas natural vs hidrógeno verde (centro) y TCO de camiones mineros diésel vs FCEV (derecha).



Aplicaciones térmicas en la industria química y la fabricación de cemento: demanda moderada de H₂ verde

Las aplicaciones térmicas en la industria química y la fabricación de cemento presentarán una demanda moderada de H₂ verde, requiriendo 520 MW y 400 MW de electrólisis, respectivamente, y reemplazando conjuntamente hasta 350 mil millones de pies cúbicos de gas natural por año para 2050. Las oportunidades como materia prima química para la fabricación de vidrio plano, resinas sintéticas y margarinas serán muy pequeñas en comparación con el mercado nacional de

hidrógeno verde, donde incluso una sustitución completa de H₂ verde demandaría apenas 3,500 ton/año para 2050.

En general para el sector industrial se mantiene una prevalencia de las aplicaciones de movilidad en la minería y la reducción de minerales, que en conjunto representan casi el 80% de la demanda proyectada para 2050. Un entorno industrial favorable permite los primeros proyectos en todos los segmentos, excepto en la industria química como materia prima, para que en 2030 estén instalados 200 MW de capacidad de electrólisis estén instalados con una producción anual de hidrógeno

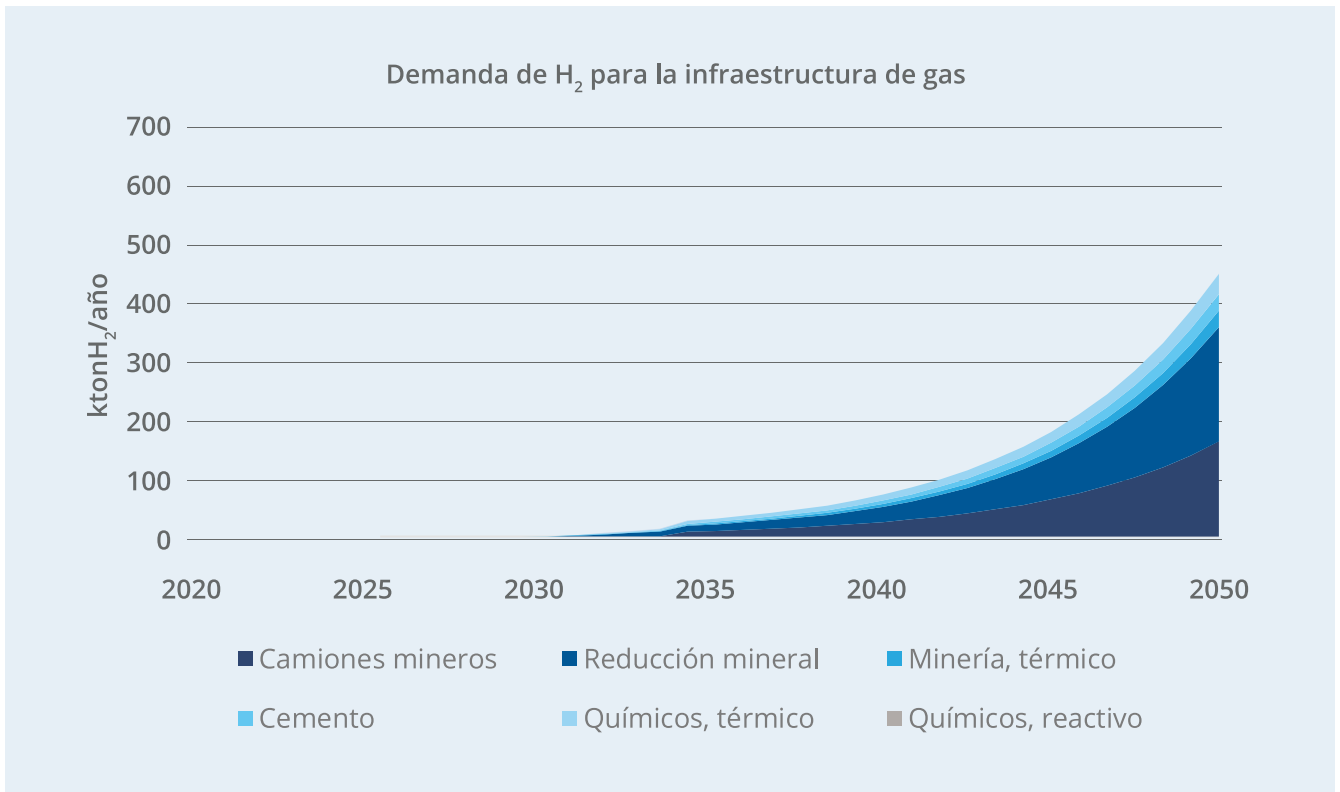
verde de 17,000 toneladas. En la siguiente década se verá un despliegue acelerado a medida que la mayoría de las aplicaciones alcancen la paridad de costos o se acerquen a ella, con una demanda que crece más de siete veces en ese período hasta alcanzar las 120,000 toneladas por año y más de 1,400 MW de capacidad de electrólisis en 2040.

A mediados de siglo, la demanda de hidrógeno verde crece todavía más hasta alcanzar las 250 mil toneladas por año para la reducción de minerales, 210 mil para la movilidad en la minería, y aún considerables pero más moderadas demandas para aplicaciones térmicas en las industrias química y minera y su uso en la producción de cemento, con las tres aplicaciones en el rango entre

35 y 45 mil toneladas por año. Para su uso como materia prima de la industria, la demanda de hidrógeno sigue siendo mínima e incluso suponiendo una sustitución completa de hidrógeno gris a verde para la producción de vidrio plano, resinas sintéticas y margarina, su demanda combinada no alcanzaría las 4 mil toneladas por año.

La demanda acumulada de hidrógeno verde para todos los segmentos industriales estudiados alcanzará las 580,000 toneladas por año en 2050, requiriendo 6,750 MW de capacidad de electrólisis, y tendrá un valor de más de 700 millones de dólares anuales.

Figura 4-1. Demanda proyectada de hidrógeno para todos los usos finales para el sector privado en México.



5. Hidrógeno verde para PEMEX y CFE: 11 GW de electrólisis en 2050

Las paraestatales PEMEX y CFE podrían convertirse en actores principales en el sector del hidrógeno verde en México para descarbonizar sus operaciones con un suministro independiente de hidrocarburos, con más de 11GW de demanda potencial de electrólisis para 2050.

PEMEX: Oportunidades considerables en refinерías, amoníaco y combustibles sintéticos

Para 2050, se producirían casi 1.35 millones de toneladas de amoníaco verde anualmente para fabricar fertilizantes, más de 750 mil barriles de petróleo se refinarían utilizando hidrógeno verde todos los días, y la demanda mexicana de combustibles sintéticos para aviación habrá superado los 1.4 millones de litros cada año. Esto llevaría la demanda de hidrógeno verde de PEMEX a más de 650 mil toneladas por año, requiriendo más de 7.5 GW de capacidad de electrólisis, y resultaría en un suministro de hidrógeno verde por valor de 800 millones de dólares al año en 2050.

CFE: Mayor potencial en turbinas de hidrógeno

Para CFE, se espera una demanda relativamente pequeña para la inyección en la red de gas natural debido a una baja competitividad económica. Las mayores oportunidades se proyectan en las centrales térmicas de gas natural con hidrógeno para alimentar el equivalente a casi 670 MW de centrales de gas de ciclo combinado (CCGT) con hidrógeno verde en 2050, lo que representa más del 87% de la demanda de hidrógeno de la eléctrica paraestatal de 310 mil toneladas por año. El suministro de del hidrógeno verde para CFE requeriría de una capacidad de electrólisis instalada de alrededor de 3.5 GW, y tendría un costo de 380 millones de dólares por año para mediados de siglo.

PEMEX y CFE podrían sentar las bases para el desarrollo de una economía de hidrógeno verde a gran escala en México

Una vez que sea competitivo económicamente, el hidrógeno verde libre de recursos fósiles y producido localmente, podría proporcionar una alternativa de menor costo y emisiones e independiente del suministro extranjero de hidrocarburos y las fluctuaciones de costos y suministro de los mercados internacionales, lo cual podrían proporcionar beneficios tanto a las paraestatales

como a la soberanía energética de México, permitiendo que porciones más grandes de la cadena de valor de cada producto final⁹ permanezcan en el país junto con sus inversiones asociadas, puestos de trabajo creados e infraestructura desarrollada.

Se proyecta que la adopción del hidrógeno tenga un auge en la década de 2040, pero podría acelerarse drásticamente mediante la adopción de objetivos orientados a la transición energética soberana y medidas para cumplir con los compromisos climáticos, como establecer un precio al carbono. Esto permitiría que el hidrógeno verde alcance antes la competitividad en costos, posibilitando un despliegue más robusto de las tecnologías de hidrógeno en México y sus beneficios.

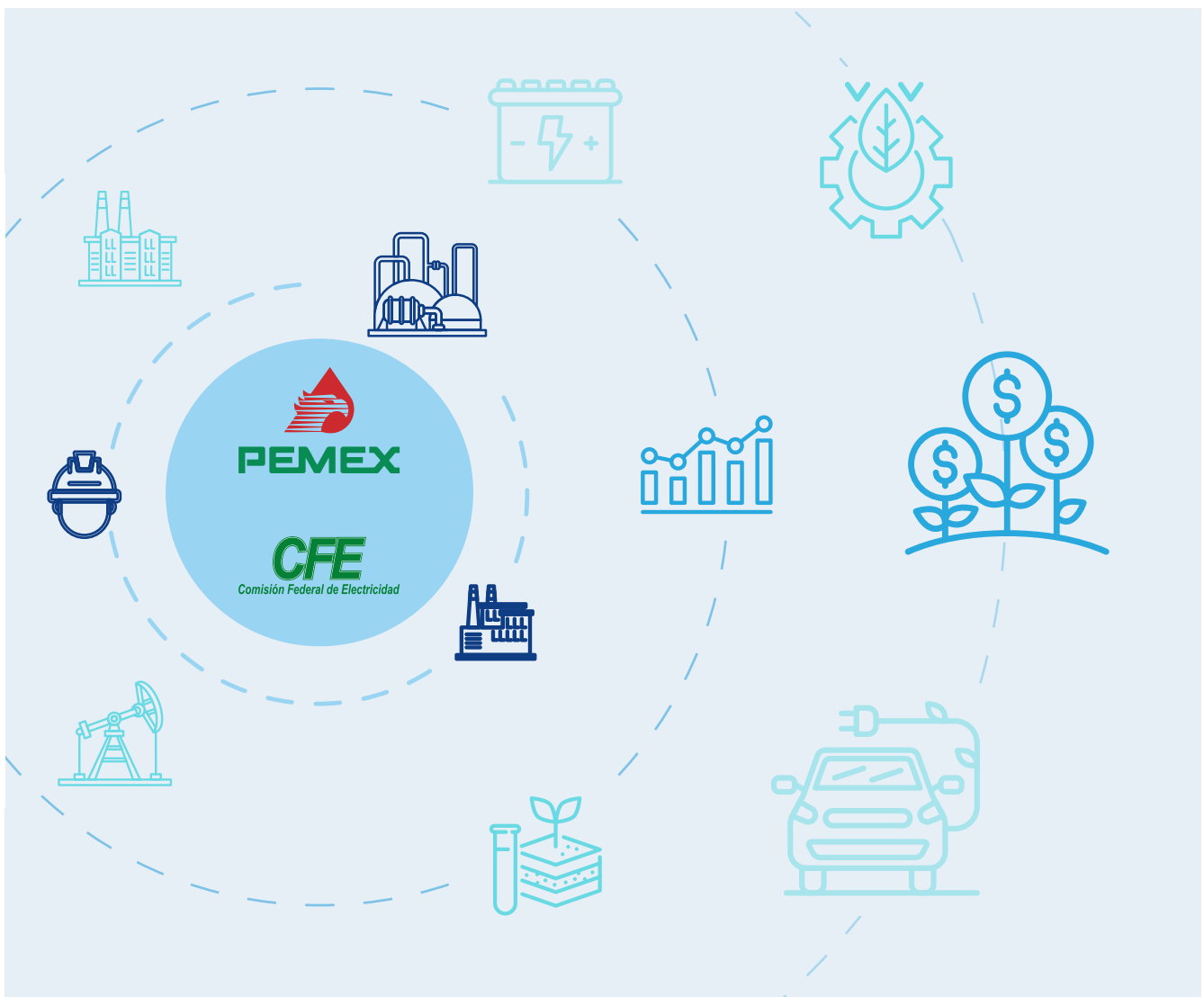
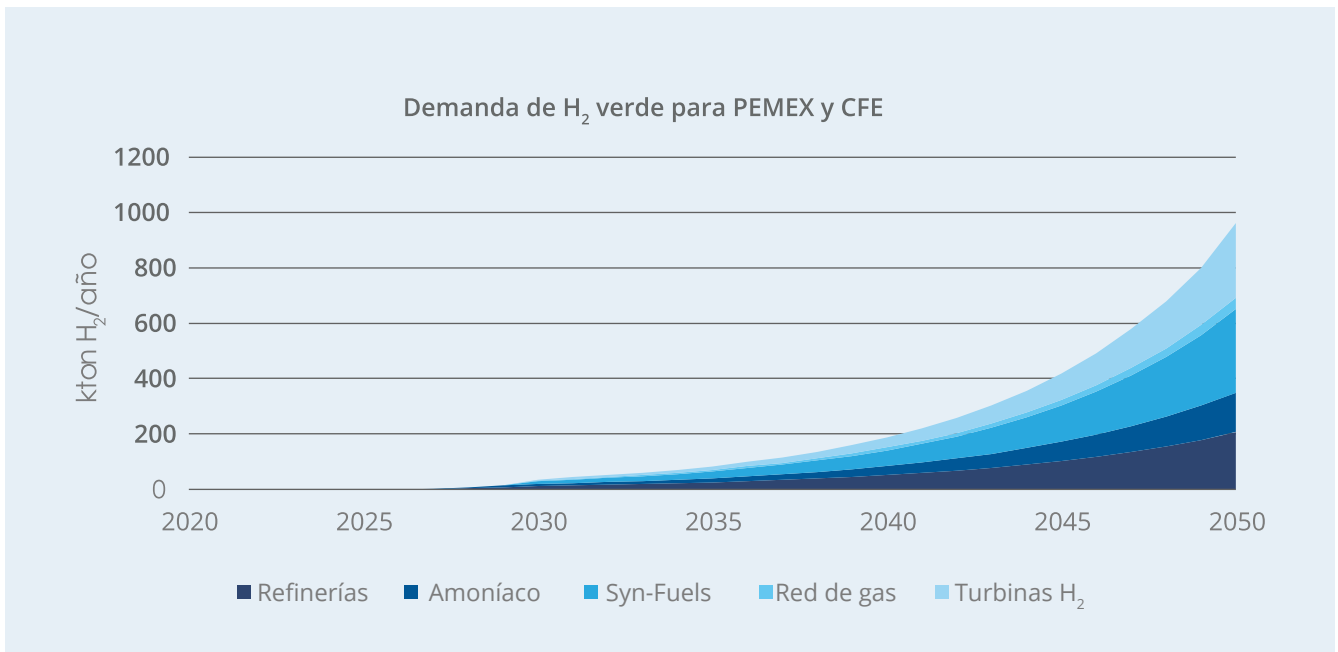
Incluso si no existieran incentivos específicos para la acción climática o para el hidrógeno, las empresas paraestatales de México tienen el potencial de impulsar la creación de un extenso mercado de hidrógeno verde en el país bajo supuestos optimistas pero realistas de costos y desempeño de las tecnologías del hidrógeno¹⁰. Consecuentemente, PEMEX y CFE podrían permitir conjuntamente el despliegue de 11 GW de electrólisis en México, alcanzando casi un millón de toneladas de demanda de hidrógeno por un valor cercano a 1.2 mil millones de dólares por año para 2050.



⁹ Los productos finales de las aplicaciones abordadas en este reporte incluyen petroquímicos, fertilizantes, combustibles líquidos para el transporte aéreo, energía térmica y electricidad.

¹⁰ Estos supuestos corresponden al escenario Hydrogen Breakthrough, en línea por lo planteado por el Hydrogen Council para el despliegue del hidrógeno verde a nivel mundial hacia 2050.

Figura 5-1. Demanda proyectada de hidrógeno para todos los usos finales de las empresas paraestatales.



6. Integración de energías renovables en la red: bajo impacto

El almacenamiento de energía con hidrógeno verde podría aumentar un 2% de la generación renovable en 2050.

El almacenamiento de energía con hidrógeno está lejos de ser la alternativa de almacenamiento más competitiva, ubicándose en el puesto 7 de 11 tecnologías evaluadas. Para 2030, la reconversión en electricidad del hidrógeno será pequeña en comparación con los más de 100 GW instalados en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), con 1 GW de capacidad de electrólisis instalada para producir hidrógeno verde para suministrar a una turbina de gas de ciclo abierto de hidrógeno de 300 MW para la reconversión en electricidad.

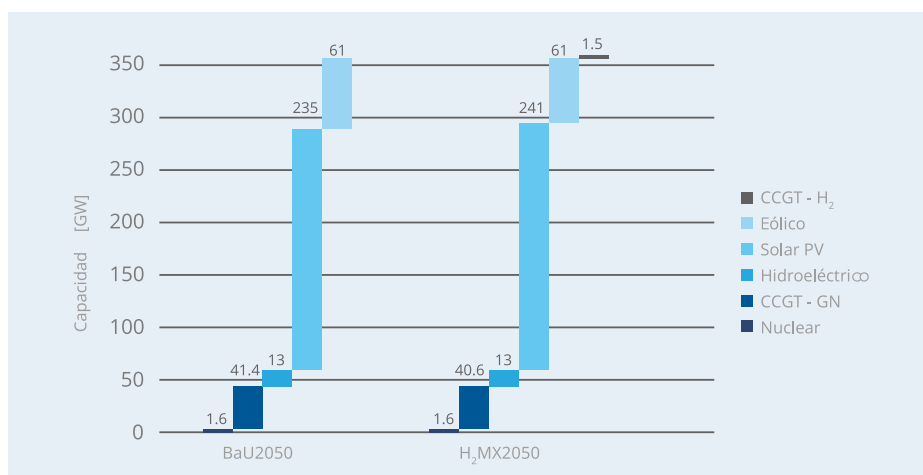
Es hasta 2050 que el hidrógeno podría ser más relevante en el Sistema Eléctrico Nacional, impulsado principalmente por la mejora en costos y el rendimiento de las tecnologías observado en las tendencias actuales. En 2050, acerca de 5.5 TWh/año serán producidos a partir de la reconversión de hidrógeno en electricidad, que es aproximadamente la mitad de la generación actual de energía nuclear en el país. Esta electricidad será generada por 1.5 GW de turbinas de gas de ciclo combinado alimentadas con hidrógeno (CCGT-H₂). Esta capacidad instalada es alta para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde pero bajo cuando se compara con los más de 300 GW de capacidad instalada proyectados para el SEN.

La incorporación de tecnologías de hidrógeno en el SEN permitirá incrementar la generación renovable. Los resultados de un análisis muestran que con la reconversión de hidrógeno en electricidad (escenario H₂MX2050) hay 15 TWh/año adicionales generados a partir de fuentes renovables en 2050, casi un 2% de aumento en relación con un escenario sin hidrógeno (BaU2050), como se muestra en la Figura 6-1. El consumo de agua necesario para producir el hidrógeno demandado para abastecer los CCGT-H₂ representa menos del 0,1% del consumo actual en cada región de producción.

Mulegé: el H₂ verde favorece el despliegue de la generación fotovoltaica de bajo costo

Un análisis centrado en el sistema de energía de Mulegé, Baja California Sur, revela que la integración del hidrógeno permite una solución de almacenamiento competitiva para la energía solar de bajo costo de esta región. Se puede observar una reducción local de la capacidad eólica de 108 MW a 30 MW y un aumento en la capacidad fotovoltaica de 302 MW a 407 MW al introducir el almacenamiento de energía con hidrógeno en 2050 en comparación con un escenario sin hidrógeno. La capacidad total de almacenamiento de energía también aumenta de 0.9 GWh a 2.4 GWh, de los cuales 1.7 GWh son en forma de almacenamiento de energía con hidrógeno con una capacidad de 50 toneladas.

Figura 6-1. Capacidad de generación instalada en el Sistema Eléctrico Nacional en 2050 para dos escenarios evaluados.



7. Exportaciones de hidrógeno

México: un exportador competitivo de hidrógeno a Europa y Asia

México también tiene el potencial de convertirse en un fuerte exportador de hidrógeno verde. Para 2030 México podría exportar más de 300 millones de dólares de H₂ verde. En comparación con los potenciales grandes exportadores de hidrógeno verde, México se coloca como un exportador de larga distancia competitivo para los mercados de Europa y Asia, dado un bajo costo de producción de hidrógeno y su privilegiada posición geográfica con acceso tanto a los océanos Atlántico y Pacífico y su latitud norte, compitiendo de cerca con Chile y Australia con alrededor de 0.20 USD/kg de diferencia en LCOH de entrega en los puertos de importación.

Para obtener estos resultados se realizó un análisis comparativo para evaluar la competitividad de costos de las rutas de transporte marítimo de importación-exportación de hidrógeno. Se construyó una matriz de distancias de envío con las distancias en millas náuticas entre todas las combinaciones posibles. También se calculó el costo de producción en los países exportadores, se calculó un LCOH final de entrega en el destino de la importación¹¹ para cada combinación de países productores y consumidores suponiendo que el transporte al extranjero fuera hidrógeno líquido, como se muestra en la Tabla 7-1.



Tabla 7-1. LCOH en el puerto de destino para cada ruta de exportación de hidrógeno, considerando transporte marítimo de hidrógeno líquido.

LCOH en destino (USD/kgH ₂)	Origen				Ranking México
Destino	Australia	Chile	México	Marruecos	
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

Un desglose de los costos del hidrógeno entregado en puerto muestra que alrededor de la mitad de los costos son fijos para todas las rutas y la otra mitad varía con la producción local de hidrógeno y la distancia de envío, lo que explica las diferencias de costo en función del país de origen y de destino.

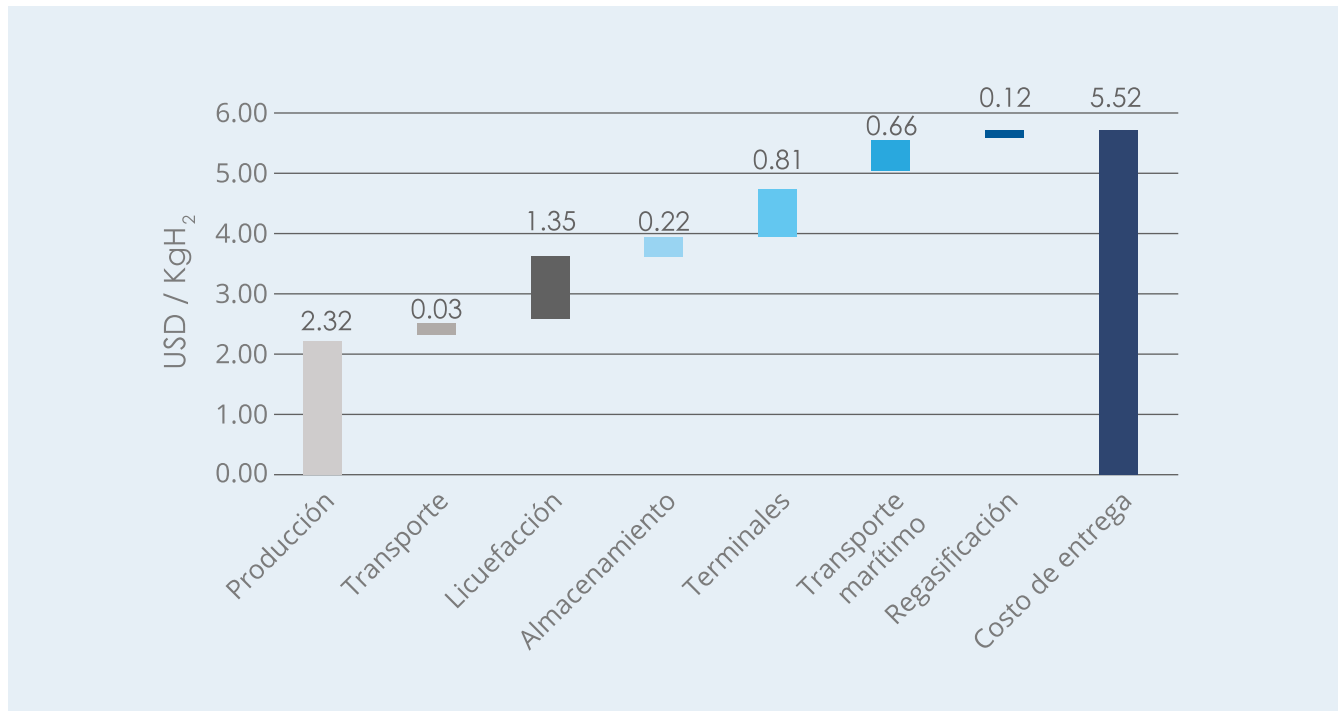
México sería el segundo o tercer exportador más competitivo a todos los mercados de destino en el estudio, dado un bajo costo de producción de hidrógeno y su

privilegiada posición geográfica con acceso tanto al Océano Atlántico como al Pacífico y su latitud norte, acortando la distancia de envío a los principales países importadores.

En este estudio se realizó un análisis adicional para estimar la participación de la demanda de hidrógeno que México podría abastecer a los mercados extranjeros objetivo. Para 2030 México podría exportar 60 mil toneladas de H₂ verde al año con un valor de 330 millones de dólares con casi 700 MW de electrólisis dedicados para este fin.

¹¹ El LCOH de entregada en puerto se calcula utilizando un modelo de Inicio y incluye los costos de producción, licuefacción, transporte marítimo, terminales, regasificación y distribución por ductos.

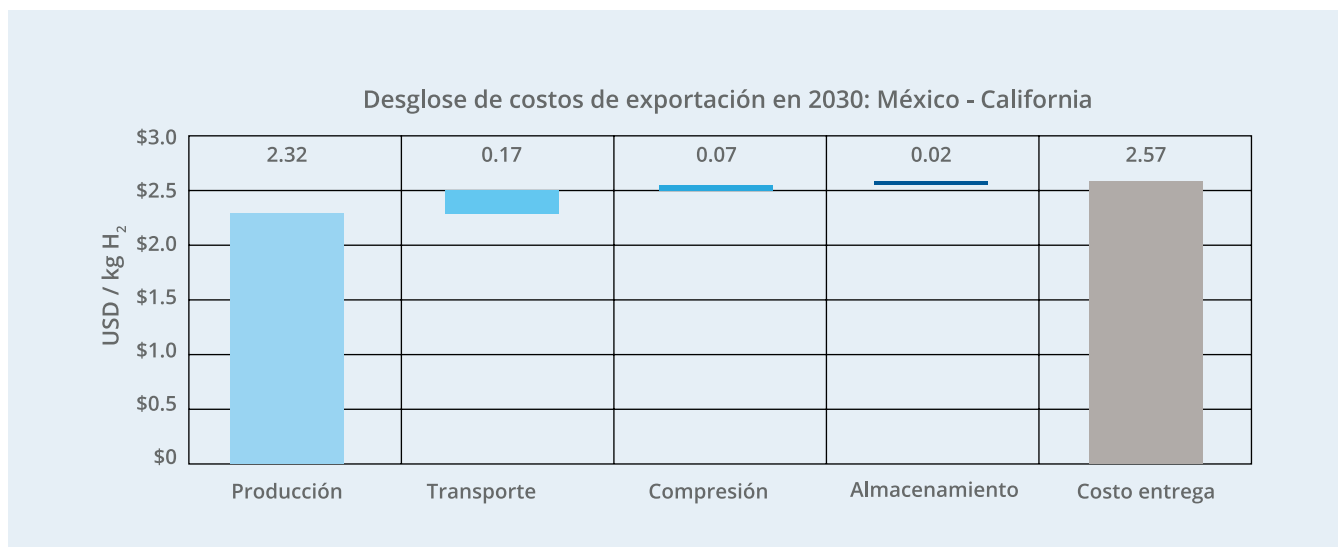
Figura 7-1. Desglose de costos de exportación de hidrógeno verde de México a la Unión Europea en 2030, con transporte marítimo de H₂ líquido.



California: hidrógeno verde entregado por ductos a bajo costo

Se realizó un análisis adicional para evaluar la exportación de hidrógeno verde de México al estado de California en Estados Unidos por tierra a través de ductos, suponiendo una corta distancia recorrida por el mismo de menos de 200 km. México podría entregar H₂ verde a California por ductos tan barato como 2.57 USD/kg en 2030. Del LCOH de entrega, el 90% son costos de producción y el 10% están asociados a su transporte, compresión y almacenamiento, como se muestra en la Figura 7-2.

Figura 7-2. Desglose del costo de exportación de hidrógeno por ducto de México a California en 2030.



Los abundantes recursos renovables de México y su posición privilegiada le proporcionan un gran potencial para exportar hidrógeno a los grandes mercados de importación, creando aún más oportunidades de negocio y contribuyendo a las necesidades internacionales de transición energética, metas climáticas, y estrategias nacionales de hidrógeno.

8. Barreras y recomendaciones

Para alcanzar su potencial de hidrógeno verde, el país ya cuenta con capacidades intelectuales, financieras y legales desarrolladas. Sin embargo, México debería replantear su política climática, promover las energías renovables desde la perspectiva política y regulatoria, garantizar la protección de las inversiones, desarrollar una Estrategia Nacional del Hidrógeno con objetivos y acciones definidas, y asignar financiamiento e incentivos para el desarrollo y adopción de infraestructura y tecnologías de hidrógeno verde.

Estas medidas podrían permitir que el hidrógeno verde se vuelva competitivo en costos hasta una década antes que en un escenario BaU¹² en México y permita un despliegue acelerado desde la década de 2030. En un escenario BaU menos optimista, sin un fuerte apoyo público al hidrógeno verde, la energía renovable y las medidas climáticas, las oportunidades proyectadas de hidrógeno verde podrían reducirse a la mitad para el sector privado y reducirse hasta siete veces para PEMEX y CFE, con una disminución significativa esperada en el transporte las oportunidades de exportación de hidrógeno.

A lo largo de los análisis e investigación para esta serie de reportes para el diagnóstico de oportunidades en hidrógeno verde en México se identificaron una serie de barreras para su implementación, y se recopilaron perspectivas y barreras adicionales por medio de entrevistas con actores relevantes en el país de los sectores industrial, energía, transporte, y gobierno. Con estos insumos y tomando como referencia acciones y mejores prácticas a nivel internacional, se elaboraron recomendaciones que son presentadas a continuación en cuatro categorías: políticas y regulación, contexto económico y político, tecnología y capital humano y desarrollo de capacidades.

Políticas y Regulación: Se necesitan Estrategias de Hidrógeno Verde y certidumbre regulatoria

Barreras:

El marco regulatorio y de políticas públicas de México no será suficiente para cumplir con sus compromisos climáticos internacionales. No existen políticas, estrategias, u hojas de ruta nacionales o estatales para el desarrollo del hidrógeno en México. La regulación para el uso del hidrógeno en México no es específica para la mayoría de sus posibles aplicaciones. Además, el sector privado percibe en México un ecosistema actual inadecuado para la inversión en innovación.

Recomendaciones:

Repensar y actualizar la política de cambio climático de México, reconocer los beneficios potenciales del hidrógeno y desarrollar políticas estatales y nacionales para apoyar su despliegue, y crear una Hoja de Ruta Nacional del Hidrógeno con metas y acciones definidas para alcanzarlas junto con regulaciones específicas del hidrógeno para sus diferentes aplicaciones.

Contexto económico y político: La promoción de las energías renovables impulsará la adopción del H₂ verde

Barreras:

En México el acceso a la infraestructura energética está altamente concentrado y presenta importantes barreras de entrada, además la disponibilidad geográfica de las plantas de generación de energía renovable en México no necesariamente coincide con los posibles centros de consumo para el despliegue de proyectos de hidrógeno a gran escala. Además, el acceso de México al gas natural de bajo costo de Estados Unidos plantea desafíos en la competitividad del hidrógeno verde.

Recomendaciones:

Promover las energías renovables desde un punto de vista político y regulatorio, poner 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 verde y PEMEX y CFE. Establecer sistemas de Garantías de Origen para el hidrógeno verde e incentivar su adopción reconociendo sus beneficios ambientales.

¹² BaU: Business-as-Usual, escenario bajo el cual México cumple con sus NDCs pero no se toman medidas adicionales para impulsar al hidrógeno verde o en acción climática

Tecnología y capital humano:

Barreras:

Existe una brecha de competitividad de costos de las tecnologías de producción y consumo de hidrógeno verde, una falta de conciencia de los usos del hidrógeno y sus impactos potenciales y recursos humanos limitados con información en hidrógeno verde o desvinculados para colaborar en atender estos desafíos.

Recomendaciones:

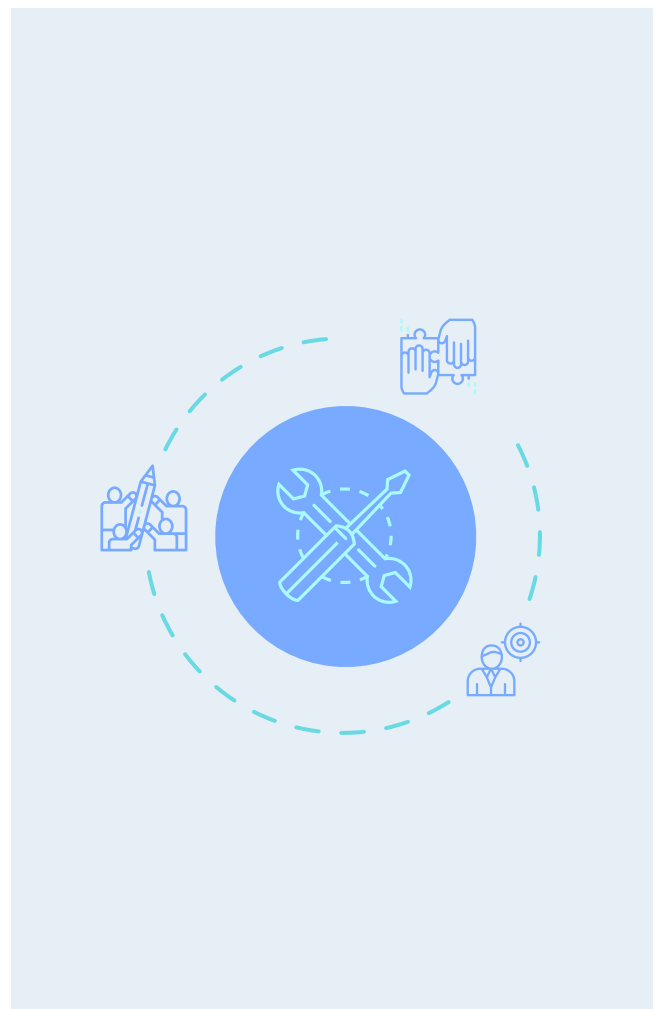
Proporcionar fondos y asistencia financiera para el desarrollo, la ampliación y la implementación de proyectos con tecnologías de hidrógeno, que podrían provenir de fuentes públicas, privadas, banca multilateral o una combinación de ellas. Comunicar activamente los usos y los beneficios del hidrógeno verde a todas las partes interesadas, crear misiones de aprendizaje y alianzas internacionales que incluyan programas de transferencia de conocimientos. Finalmente, establecer una estrategia para desarrollar talento calificado en hidrógeno verde mediante el fomento de la capacitación dedicada, las colaboraciones academia-industria y la cooperación internacional en educación superior, investigación, desarrollo e innovación.

Desarrollo de capacidades: México debe desarrollar competencias y aprovechar las existentes

México tiene muchas capacidades intelectuales, financieras y legales ya desarrolladas. Sin embargo, la adopción de la economía del hidrógeno verde exigirá que el país se desarrolle y expanda nuevas capacidades. Se requiere la formación de recursos humanos calificados, incluidos especialistas en políticas para el hidrógeno verde, expertos en ingeniería e investigación en diferentes puntos de la cadena de valor del hidrógeno, especialistas en salud, seguridad y medio ambiente (HSE), investigadores de mercado y analistas de datos, y expertos en comunicación del hidrógeno, entre otros. En capacidad financiera, México debería crear o adaptar mecanismos de financiamiento para fomentar el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde, cuantificar las externalidades y co-beneficios, y facilitar el acceso a fondos internacionales para el desarrollo del hidrógeno en México.

En cuanto a las capacidades jurídicas, se requieren expertos en derecho industrial, energético y ambiental, junto con el fortalecimiento de organismos reguladores autónomos que proporcionen certidumbre a la inversión y promuevan la competitividad, así como mecanismos para promover las mejores prácticas legales y la participación de todas las partes interesadas a lo largo de la cadena de valor.

En cuanto a las capacidades comerciales, internamente, la capacidad de crear mercados diferenciados entre productos regulares y bajos en carbono; y externamente, el desarrollo de capacidades de exportación de hidrógeno verde, con entendimiento de la cadena de valor de exportación, los mercados objetivo y el potencial competitivo de México.



Bibliografía

- Bloomberg New Energy Finance, Hydrogen Economy Outlook 2020. EEUU, 2020.
- CE Delft, Green hydrogen and employment. Países Bajos, 2019.
- CENACE, Informe de tecnología de generación de referencia, Centro Nacional de Control de Energía, México, 2016.
- CFE, Informe Anual 2019, Comisión Federal de Electricidad. México, 2019.
- Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del Agua en México 2017. México, 2017.
- Element Energy. Hy-Impact Series Study 1: Hydrogen for economic growth Unlocking jobs and GVA while reducing emissions in the UK. Reino Unido, 2019.
- Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, Hydrogen and Fuel Cell Safety Report, EE.UU., 2021.
- Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Fuel Cells Hydrogen Trucks – Heavy-Duty's High Performance Green Solution. Bélgica, 2020.
- HINICIO, LBST. Future fuel for road freight – Techo-economic and environmental performance comparison of GHG-Neutral fuels and drivetrains for heavy-duty trucks. Fondation Truck. Munich-Bruselas-París, 2019.
- Hydrogen Council, Hydrogen Scaling Up, 2017.
- IEA, Energy Technology Perspectives 2020. Francia, 2020.
- IEA, The future of hydrogen – seizing today's opportunities. Japón, 2020.
- INECC, Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2018. Gobierno de México, 2018.
- INECC, Ruta Tecnológica NDC en el Sector Transporte, México 2015.
- IRENA, Green hydrogen: A guide to policy making. Abu Dabi, 2020.
- IRENA, Renewable Energy and Jobs, Annual Review 2020. Abu Dhabi, 2020.
- IRENA, Renewable Power-to-Hydrogen: innovation landscape brief. Abu Dabi, 2019.
- Navigant, Gas for Climate – Job creation by scaling up renewable gas in Europe. UE, 2019.
- PEMEX, Anuario estadístico 2018. Petróleos Mexicanos, México, 2019.
- SEMARNAT, México: Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la CMNUCC. México, 2018.
- SENER, Balance Nacional de Energía 2018, México, 2019.
- SENER, Prospectiva de Petróleo Crudo y Petrolíferos 2018-2032, Secretaría de Energía, México 2018.
- SENER, Prospectiva del Sector Energético 2018-2032, México, 2018.
- Servicio Nacional de Empleo, Observatorio Laboral: Ocupación por sectores económicos - Cuarto trimestre 2020. STPS, Gobierno de México. México, 2021.
- Siemens Energy, Power-to-X: The crucial business on the way to a carbon-free world. Alemania, 2021.
- Us Department of Energy, Fuel Cells, Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. Online, consultado en marzo de 2021.
- World Energy Council, International Hydrogen Strategies. Alemania, 2020.

