

## Nota Sectorial HIDRÓGENO VERDE EN MÉXICO



Esta nota sectorial ha sido elaborada por  
Belén Bouzas Duro

Bajo la supervisión de la Antena Igape México

Agosto 2024



EXENCIÓN DE RESPONSABILIDAD: La información y los contenidos incluidos en este documento no tienen carácter vinculante, pues se trata de un servicio ofrecido con un carácter informativo y divulgativo. Tampoco representan la opinión de la Antena Igape México, que no se responsabiliza del uso que pueda hacerse de ellos.

## Índice

<b>1. Hidrógeno</b> .....	<b>2</b>
1.1 Hidrógeno verde.....	3
<b>2. El hidrógeno verde en México</b> .....	<b>6</b>
2.1 Marco legal.....	6
2.2 Actual situación.....	6
2.3 México como plataforma de manufactura.....	8
<b>3. Proyectos de hidrógeno en desarrollo en México</b> .....	<b>13</b>
<b>4. Principales retos para el desarrollo del hidrógeno verde en México</b> .....	<b>15</b>
<b>5. Oportunidades de negocio para empresas gallegas</b> .....	<b>16</b>
<b>6. Información adicional</b> .....	<b>17</b>
6.1 Ferias.....	17

## 1. Hidrógeno

Ante las grandes emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) producidas por los combustibles fósiles y la situación de urgencia climática que pesa sobre el planeta, surge la necesidad de buscar fuentes de energía alternativas que sean respetuosas con el medio ambiente.

El hidrógeno es el elemento químico más ligero y abundante del universo, representa el 75% de la materia del planeta. Es un gas incoloro, inodoro y altamente inflamable. Actualmente, se utiliza en una variedad de aplicaciones industriales y científicas debido a sus propiedades únicas, como su alta energía de liberación por unidad de masa y su capacidad para formar agua cuando reacciona con oxígeno.

Para obtener el hidrógeno y usarlo como fuente de energía, existen diferentes procesos, diferenciando el tipo de hidrógeno según la fuente de energía utilizada para su obtención.

- **Hidrógeno gris:** se produce principalmente a partir del gas natural (metano) mediante un proceso llamado *reforma de vapor*. Se utiliza en la industria química, como en la producción de amoníaco y metanol. Actualmente, es ampliamente utilizado y de todos los tipos de hidrógeno es el más barato. Sin embargo, no se trata de un tipo de energía limpia ya que emite grandes cantidades de  $\text{CO}_2$  durante su producción y por lo tanto, contribuye de forma activa al cambio climático.
- **Hidrógeno azul:** también se produce a partir de gas natural, pero con la adición de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CAC) para reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$ . Sus usos son similares al hidrógeno gris y principalmente se usa en procesos industriales. Aún así, no es una fuente de energía completamente libre de emisiones y la tecnología de captura puede ser costosa.
- **Hidrógeno turquesa:** se produce a partir del metano mediante un proceso de pirólisis, que descompone el metano en hidrógeno y carbono sólido. Sus usos todavía están en fase de desarrollo, con potencial para aplicaciones similares a las del hidrógeno gris y azul. Su principal ventaja es que no produce  $\text{CO}_2$  y el carbono sólido puede ser utilizado en otros productos, sin embargo, la tecnología para su transformación está en sus primeras etapas, lo que la hace, muy costosa.
- **Hidrógeno verde:** se produce mediante la electrólisis del agua utilizando electricidad proveniente de fuentes de energía renovable (solar, eólica e hidroeléctrica). El hidrógeno verde puede utilizarse en una variedad de aplicaciones, incluyendo transporte, generación de electricidad y almacenamiento de energía. Su principal ventaja es que no produce emisiones del  $\text{CO}_2$  y es considerada, como una de las opciones sostenibles más viables para el futuro, sin embargo, su coste es su principal hándicap, debido al alto costo de las tecnologías de electrólisis y la infraestructura necesaria.

Actualmente, hay una corriente creciente de interés de gobiernos y empresas a nivel global por el hidrógeno verde, ya que, sus características de energía limpia, sostenible, versátil, almacenable y transportable, hacen que muchos expertos lo consideren como el principal candidato a sustituir a los

combustibles fósiles, contribuyendo así al proceso de descarbonización de las economías y a la consecución de los compromisos internacionales asumidos por la mayoría de países al firmar el Acuerdo de París, que establece un marco global para la acción climática con el objetivo de limitar el calentamiento global y minimizar los impactos del cambio climático.

A pesar del enorme interés en el desarrollo de políticas, tecnología, instalaciones y proyectos relacionados con el hidrógeno verde, en que despuntan países como China, EEUU, los miembros de la UE, la India, Japón, Corea del Sur y en Latinoamérica, Chile, el hidrógeno verde todavía es un vector energético caro en comparación con otros combustibles y tiene algunos condicionantes en cuanto a seguridad, ya que, es volátil e inflamable y requiere de agua constante, otro recurso natural escaso y no siempre disponible.

### 1.1 Hidrógeno verde

El hidrógeno no es un elemento que se encuentre en estado puro en la naturaleza, por lo que se debe producir. Para conseguir este elemento en estado puro hay que utilizar agua y energía renovables como la fotovoltaica, la eólica o la hidráulica.

El hidrógeno verde se consigue a través de la electrolisis del agua, en la que se utilizan únicamente energías renovables. Este proceso consiste en conectar al agua una corriente eléctrica continua mediante electrodos. Con esta electricidad se consigue descomponer las moléculas que componen en el agua el hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ). Si esto se realiza con energías renovables, se estará consiguiendo este hidrógeno sin emitir dióxido de carbono a la atmósfera. Esta energía solo emite vapor de agua y no deja ningún tipo de residuos en el aire. A pesar de que esta no es la única forma de conseguir hidrógeno verde, actualmente es la más prometedora para producirlo a gran escala y de forma económica.

Este recurso renovable es considerado el combustible del futuro debido a su gran capacidad de almacenaje de energía. Tiene un bajo impacto ambiental y contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, y además, es muy versátil. Este hidrógeno verde además se puede convertir a otros productos como el metanol o el amoníaco para utilizarlo en fertilizantes o como combustible. De hecho, un kilogramo de hidrógeno contiene la misma energía que 2,6 kg de gas natural o 3 kg de gasolina.

A pesar de sus innumerables ventajas, también existen varios inconvenientes que actualmente dificultan su implantación. El primero de ellos es el alto coste de su producción a gran escala, ya que actualmente no existen muchas instalaciones de grandes dimensiones. Además, requiere de una corriente de energía limpia 24 horas al día, ya que para la producción elevaría los costes. Por último, su transporte y almacenaje. Al ser un gas es necesario ejercer mucha presión para almacenarlo y distribuirlo, sin embargo, puede ser utilizado directamente o bien inyectado en la red de gasoductos, y por lo tanto, producido en un lugar y momento dado y utilizado en otro lugar más adelante.

Para solucionar esta dificultad inicial a la hora de transportarlo, algunas empresas deciden utilizar el hidrógeno verde para producir metanol verde. Esto lo convierte en un elemento líquido y es más fácil de transportar en barco, pudiendo utilizarse incluso como combustible para el mismo.

Entre las principales aplicaciones del hidrógeno verde se encuentran:

- **Industria:** actualmente la industria representa más del 90% del consumo del hidrógeno a nivel global pero se trata principalmente de hidrógeno gris, es decir, el que se realiza a través del gas y el carbón, lo que en la práctica supone la emisión de 830 toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera al año. A día de hoy, la electrolisis únicamente produce el 5% del hidrógeno a nivel global. Llegar a utilizar hidrógeno verde en estos procesos supone un paso muy relevante que permitiría minimizar la huella ambiental. Solo en Europa, con la utilización de hidrógeno verde se podría evitar, hasta el año 2050, aproximadamente unos 560 millones de toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero, generar unos ingresos anuales en torno a 820 billones de euros, reducir alrededor del 15% de emisiones locales en transporte por carretera y crear más de cinco millones de empleos.
- **Transporte:** otro de los sectores en los que los gases renovables, y en concreto, el hidrógeno verde va a tener un papel fundamental es en la movilidad. En la actualidad existen muchos proyectos orientados a desarrollar vehículos de todo tipo impulsados por hidrógeno: aviación, vehículos eléctricos de pila de combustible, ferrocarril y transporte marítimo. La utilización de los gases renovables en movilidad permitirá la descarbonización de uno de los sectores que más emisiones de dióxido de carbono emite y de mayor impacto en cuanto a la calidad del aire que se respira en las ciudades. Así mismo, su uso va más allá de los vehículos ligeros y se extenderá al transporte pesado, el ferroviario y marítimo, sectores en los que la electrificación no es, hoy por hoy, una solución técnicamente factible.
- **Usos domésticos:** este gas renovable puede destinarse al consumo doméstico y comercial. Su principal ventaja reside en que puede ser transportado y almacenado en la red de gasoductos ya existente, sin necesidad de realizar inversiones adicionales relevantes en redes. Un ejemplo de este uso son los sistemas de calefacción en entornos residenciales y comerciales, en los que la descarbonización se presenta como un gran desafío. La solución como paso previo a la descarbonización total podría pasar por el uso combinado de hidrógeno verde y gas natural, aprovechando la infraestructura gasista. El hidrógeno renovable también podrá ser utilizado para la generación de electricidad mediante pilas de combustible, un proceso totalmente limpio y que puede originar agua caliente sanitaria.
- **Generación de energía eléctrica:** aprovechando los excesos de generación eléctrica renovable en las horas punta se puede generar hidrógeno verde que se destine a la producción de electricidad, vertiendo a la red eléctrica en las horas valle.

El contexto del cambio climático ha llevado a los gobiernos, empresas e incluso a la academia, a buscar soluciones, que van desde la creación de un marco de cooperación para buscar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero hasta la Investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que contribuyan en este objetivo. Actualmente, en el marco del Acuerdo de París, se obliga a las partes a indicar sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional, que son medidas tomadas por cada país para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático. Esto debe lograrse en línea con la Agenda 2030 para el Desarrollo sostenible, misma que

establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y contempla un plan de acción con enfoque transversal respecto a las tres dimensiones del desarrollo sostenible (social, económico y ambiental).

Por lo anterior, el hidrógeno verde es una herramienta útil para lograr el cumplimiento de los ODS, particularmente de los siguientes:

**Meta 7.1** Garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.

**Meta 7.2** Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.

El hidrógeno verde puede servir como alternativa de almacenamiento y que permita brindar confiabilidad a los sistemas eléctricos.

**Meta 9.4** Modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles.

El hidrógeno verde puede ayudar en estimular a las industrias a adaptarse a su uso y desarrollar infraestructuras y procesos para su aprovechamiento por las características propias del hidrógeno.

**Meta 11.2** Proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos.

**Meta 11.6** Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales de otro tipo.

El hidrógeno verde puede contribuir a la reducción de emisiones, la mejora de la calidad del aire y el desarrollo de espacios urbanos más sostenibles.

**Meta 13.2** Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales, en el marco legal nacional se han adoptado medidas que estimulen la consecución de los objetivos ambientales del país.

El hidrógeno si bien se considera como una fuente de energía limpia conforme a la LTE (Ley de Transición Energética), hasta el momento no se ha incorporado dentro de la política pública o marco normativo que prevea los usos, aplicaciones actuales y potenciales.

El hidrógeno verde va a ser clave para alcanzar la neutralidad climática y un sistema eléctrico totalmente renovable para 2050. A nivel mundial más de 30 países cuentan con hojas de ruta de hidrógeno y están en desarrollo más de 200 proyectos de hidrógeno a gran escala en toda la cadena de valor, el 85% de los cuales se encuentran en Europa, Asia y Australia.

En los próximos diez años, está previsto que Europa destine hasta 30.000 millones de euros al despliegue de esta tecnología.

En el caso de España, el país cuenta con uno de los planes de desarrollo de energía eléctrica renovable más ambiciosos de la Unión Europea, el PNIEC, y una hoja de Ruta del Hidrógeno. Además, cuenta con el apoyo de la industria privada, con numerosas compañías energéticas trabajando en proyectos de desarrollo de hidrógeno verde.

## 2. El hidrógeno verde en México

### 2.1 Marco legal

México no cuenta por el momento con una estrategia nacional ni con regulación específica para el desarrollo del mercado del hidrógeno verde, lo que limita el aprovechamiento y su competitividad frente a otros países.

A pesar de no existir estrategia nacional, las empresas públicas CFE y PEMEX, principal productora y consumidora de hidrógeno del país, se han mostrado interesadas en incorporar y/o impulsar la utilización del hidrógeno verde en sus procesos, habiendo puesto en marcha algunos proyectos piloto y planteado objetivos y metas a conseguir, como por ejemplo, el [Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional](#), incorporando la producción de hidrógeno en centrales de ciclo combinado.

En el Senado de la República, se está estudiando un proyecto de decreto para impulsar el mercado del hidrógeno verde en México, que, aunque no es muy ambicioso en cuanto objetivos, si muestra un interés y voluntad en empezar a explorar las potencialidades que este tipo de combustible tiene para el país. En el decreto se señala que “consideramos establecer una nueva atribución a la Secretaría de Energía, para que a través de la CFE promueva e instrumente, un programa nacional de uso de hidrógeno verde, así como establezca metas y mecanismos para limitar la producción de hidrógeno producido con combustibles fósiles, con el fin de que redunden en un beneficio sistemático y promuevan la transición a energías renovables”.

La [Asociación Mexicana de Hidrógeno \(AMH2\)](#) presentó en mayo de 2022 una Hoja de Ruta para impulsar la industria del hidrógeno verde, que ha puesto a disposición de autoridades, legisladores y sectores que pudieran estar interesados: [“Hidrógeno verde: El vector energético para descarbonizar la economía de México”](#).

Además, el hidrógeno está regulado en el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en el que se señala que corresponde a la Nación el dominio directo de todos los carburos de hidrógeno sólidos, líquidos y gaseosos (DOF).

Por último, mencionar que la Ley de la Industria Eléctrica, en su artículo 3 apartado XXII, considera la energía generada por el aprovechamiento del hidrógeno una energía limpia cuando se cumpla con la eficiencia mínima que establezca la Comisión Reguladora de Energía.

### 2.2 Actual situación

Hasta el 2023, en el país se identificaban 19 plantas que producen hidrógeno gris, la mayoría de las cuales lo utilizan para autoconsumo o como materia prima en diferentes procesos. Las plantas que operan en la actualidad proveen de hidrógeno para usos tradicionales relacionados con las siguientes industrias:



- **Alimentaria:** concretamente, las empresas que producen grasas y mantecas mediante procesos de hidrogenación. La mayoría de estas plantas son pequeñas y de autoconsumo.
- **Petroquímica:** para producir pinturas, fibras textiles, tintes y solventes.
- **Acerera:** con plantas de autoconsumo para producir bienes como el alambre y el alambrón.
- **Petrolera:** para la refinación (esta industria posee algunas de las plantas más grandes por las dimensiones de su consumo).
- **De fertilizantes:** para la producción de amoníaco.
- **Cementera:** que utiliza el hidrógeno por su alto potencial calorífico, necesario en sus procesos.
- **Eléctrica:** para el enfriamiento de generadores.

Además de las plantas on-site, también hay empresas que comercializan gases industriales como el hidrógeno, producidos centralmente y distribuidos en tanques por medio de tráilers. En este nicho, participan tres grandes empresas: [Cryoinfra](#), [Air Liquide](#) y [Linde](#).

La producción y el consumo de hidrógeno se encuentra mayoritariamente concentrado en los procesos de refinación de petróleo (60%), lo que significa, que la empresa productiva del Estado, Petróleos Mexicanos (PEMEX), es el principal actor de la industria, pues consumió en el año 2022 362 kilotón (kt) al año.

En cuanto a los métodos de producción del hidrógeno en el país, casi la totalidad, el 95% se lleva a cabo mediante reformado del gas natural, solo una pequeña parte, el 4%, mediante electrólisis. Sin embargo, ninguno de los proyectos de producción de hidrógeno mediante electrólisis que se encuentran en operación se cataloga como verde, ya que los electrolizadores se encuentran conectados a la red. El restante 1% proviene de la industria cloro álcali. Lo anterior se traduce en una intensa generación de gases de efecto invernadero, solo en el 2021, PEMEX generó 71.1 millones de toneladas de dióxido de carbono, de éstas, el 21.4% fue producto de procesos de refinación de petrolíferos, y el 5.5% de procesos de producción de petroquímicos como fertilizantes.

Ante este escenario, la producción y el uso del hidrógeno verde aparece como una alternativa relevante para cumplir el Acuerdo de París, donde la Contribución Determinada a Nivel Nacional de México establece como objetivos la reducción de los gases de efecto invernadero y de las emisiones de carbono negro en 22% y 51%, respectivamente, para 2030. En ese sentido, la incorporación del hidrógeno verde en usos tradicionales y en nuevas aplicaciones coadyuvaría a la descarbonización de algunos de los sectores que generan más emisiones. Las actividades de producción de electricidad y el autotransporte, por sí mismas, fueron responsables del 23.27% y del 18.52% de las emisiones totales de dióxido de carbono en el año 2019, respectivamente. Lo anterior significa que la incursión del hidrógeno verde como vector energético posee un elevado potencial de contribución en la ruta hacia la reducción de los gases de efecto invernadero, al ser un complemento clave de las energías renovables por su capacidad de almacenamiento y de conversión, así como por el potencial que guarda para ser utilizado en centrales de ciclo combinado en mezcla con el gas natural.

### 2.3 México como plataforma de manufactura

La transición hacia las energías renovables ha significado el nacimiento de nuevos desarrollos y de nuevas industrias, así como de un ecosistema de competencia entre los países, que va desde el desarrollo tecnológico y la manufactura, hasta la provisión de materias primas. En ese orden de ideas, la economía verde resulta ser un modelo económico que provoca relaciones virtuosas entre las tres dimensiones del desarrollo: económica, social y ambiental.

En el caso del hidrógeno verde, México posee características que lo colocan como un jugador competitivo en la producción de dicho elemento, gracias a los recursos prospectivos renovables (solar y eólico) con los que cuenta el territorio nacional. Adicionalmente, la fortaleza del sector industrial del país coloca en una posición privilegiada para incorporarse en la manufactura de diversas tecnologías para la producción, almacenamiento y el aprovechamiento del hidrógeno verde. México es la principal potencia en materia de exportaciones de América Latina (37.9%), más aún, es responsable de más de la mitad de las exportaciones de la región relacionadas con manufacturas de media y alta tecnología. En los últimos años, más del 80% de las exportaciones del sector de manufacturas en México corresponden a bienes de media y alta tecnología.

Lo anterior ha detonado, en primer lugar, el desarrollo de habilidades y capacidades, por lo que existe una fuerza laboral capacitada y especializada en los sectores metalmecánico, automotriz, aeroespacial, eléctrico y electrónico, entre otros. En segundo lugar, ha favorecido el desarrollo de infraestructura y de una red logística que permite procesos de encadenamiento productivo, ágiles y eficientes. Así mismo, se ha desarrollado un ecosistema industrial robusto para proveer componentes de las diferentes tecnologías. En la actualidad, México cuenta con cerca de 580 mil unidades económicas asociadas al sector industrial, alrededor de 116 mil pertenecen a subsectores con potencial de encadenamiento productivo para manufacturar tecnologías asociadas a la producción, al almacenamiento y a la conversión del hidrógeno verde. Estos subsectores, emplean a cerca de tres millones de personas.

Por otro lado, la posición geográfica de México, gracias a su cercanía con Estados Unidos, brinda acceso a uno de los mercados más grandes a nivel global. Adicionalmente, se cuenta con el Sistema Portuario Nacional, compuesto por 117 puertos y terminales, que posibilita el comercio con más de 145 países. La extensa red de carreteras y ferroviaria, por su parte, permite el transporte de mercancía hacia el interior del país por vía terrestre.

En ese orden de ideas, existen factores que constituyen una oportunidad para consolidar la posición de México en la cadena global de valor del hidrógeno verde, contribuirá a la generación de empleos de buena calidad y bien remunerados, promoverá dinamismo en las entidades federativas, diversificará las actividades económicas del país, abrirá nuevos mercados y permitirá seguir consolidando al país en actividades económicas de manufactura.

### 2.3.1 Electrolizadores

Los electrolizadores son una tecnología fundamental para generar hidrógeno de bajas emisiones. La electrólisis consiste en un proceso que, con el uso de electricidad, divide el agua ( $H_2O$ ) en sus moléculas componentes: Hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ). Una vez ocurrida la separación, el hidrógeno puede almacenarse como gas comprimido o licuado para su uso final en el sector industrial, eléctrico o de transporte.

La separación de las moléculas del agua ocurre en electrolizadores alimentados por electricidad. Para que el hidrógeno producido sea catalogado como verde y tenga un mayor impacto en la reducción de los gases de efecto invernadero, es necesario que la energía requerida para la electrólisis provenga de una fuente renovable, como la solar o la eólica.

En la actualidad, existen tres tipos principales de electrolizadores: alcalinos (AKL), de membrana de intercambio de protones (PEM) y de óxido sólido (SOEC), que funcionan de formas ligeramente diferentes, dependiendo del material electrolítico involucrado y varían en aspectos como la eficiencia energética, la capacidad, la temperatura de operación y el período de vida útil. Los electrolizadores ALK y PEM representan importancia comercial, otros, como los SOEC y los electrolizadores de membrana de intercambio de aniones (AEM) se encuentran aún en etapa de laboratorio con prototipos de baja potencia.

En México, existen varios proyectos de desarrollo tecnológico en torno a la producción de hidrógeno vía electrólisis del agua. El [Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias \(INEEL\)](#), desde hace 20 años, cuenta con proyectos relacionados con el desarrollo de electrolizadores. Dichos proyectos se orientan a incrementar la eficiencia y la capacidad de electrolizadores tradicionales de tecnología PEM. Hoy cuentan con prototipos de 1 kW con eficiencias del 75% que buscan ser escalados en el corto plazo a una categoría intermedia de 2 kW, que permita un posterior escalamiento vía integración de módulos y con eficiencias superiores al 80%. En el medio plazo, se espera un escalamiento de 5 kW. Así mismo, trabajan en tecnologías de electrolizadores con menor madurez de membranas de intercambio aniónico, con objeto de reducir los costos mediante la sustitución de los materiales de las membranas y de los catalizadores, por metales menos costosos y más comunes en México, como la plata, el cobre, el níquel y el oro. De manera paralela, la investigación busca reducir el costo de la electricidad, lo que impactaría de manera positiva a las tecnologías de producción de hidrógeno verde, ya que, este es el principal insumo que impacta el costo nivelado del hidrógeno (LCOH<sub>2</sub>).

El [Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán \(CICY\)](#) también desarrolla una investigación de relevancia para sustituir metales nobles en el electrolito por otras materias primas disponibles en México, como el manganeso, el grafito y los polímeros. Así mismo, la investigación del CICY comprende el modelamiento por dinámica computacional de nuevos prototipos para alcanzar mayores niveles de eficiencia a partir de diversas variables.

El [Instituto Politécnico Nacional \(IPN\)](#) se ha especializado en el desarrollo de electrolizadores AKL y ha desarrollado prototipos que hoy se encuentran en proceso de transferencia. En el corto plazo, se espera el escalamiento de 5 a 10 kW, y en el medio plazo, hasta 50 kW. El prototipo actual de 5

kW tuvo un costo de alrededor de 57 millones de dólares, con varios componentes integrados en México. En total, hay 11 instituciones nacionales que llevan a cabo investigación y desarrollo tecnológico en torno a los electrolizadores para la producción del hidrógeno.

La investigación en torno a la manufactura de electrolizadores en México ha permitido instalar capacidades para desarrollar los diferentes componentes. Algunas limitaciones se relacionan con que prototipos de baja potencia aún no se transfieren a la industria, lo que no permite su escalamiento. Además, la fabricación de electrolizadores se lleva a cabo manualmente, lo que, en caso de alta demanda, podrían producirse cuellos de botella. Por último, los centros de investigación y desarrollo tecnológico enfrentan presupuestos limitados.

De conformidad con las personas expertas, México cuenta con un amplio potencial para participar en la cadena de proveeduría y fabricación de electrolizadores y de cada uno de sus componentes. Algunos de los factores que representan fortalezas en ese sentido son:

- La formación de capital humano en la materia desde las universidades y los centros de investigación.
- La capacidad instalada en México en relación con la manufactura metalmecánica, que permitiría participar en la integración del hardware de las celdas electrolíticas y de otros componentes del balance de planta.
- La relevancia de la industria acerera y su capacidad de producción, que coloca a México como el 15º mayor productor de acero en el mundo.
- La relevancia de la industria de fabricación de componentes electrónicos, con 444 empresas en México que emplean a más de 190 mil personas.
- Los avances tecnológicos para sustituir materiales críticos en los electrolizadores ALK y PEM por materiales disponibles en México, este último aspecto permitiría el desarrollo de la industria minera a fin de proveer insumos para la manufactura de electrolizadores.

### 2.3.2 Turbinas eléctricas

Las turbinas son una tecnología madura que consiste en motores que convierten la energía de un fluido (aire, gas, vapor de agua) en energía mecánica o eléctrica. Inicialmente, el aire es comprimido y luego mezclado con el combustible en un combustor. La mezcla de aire-combustible es quemada y los gases de combustión calientes se expande a través de una turbina para producir energía eléctrica en un generador.

Las eficiencias termodinámicas de las turbinas de gas (28-35%) se pueden aumentar cuando el gas exhausto caliente se utiliza para generar vapor, que a su vez, pone en marcha una turbina de vapor para producir energía eléctrica adicional. A este proceso se le conoce como ciclo combinado (CC), ya que emplea dos ciclos termodinámicos, alcanzado eficiencia de 55- 60%.

En todos los casos, se emplea gas natural (constituido principalmente por metano) como combustible de alimentación en turbinas de gas. Sin embargo, recientemente ha crecido el interés de utilizar mezclas de gas natural con hidrógeno, proceso conocido como *blending*. Lo anterior tiene como propósito reducir la huella de carbono en el proceso de generación eléctrica.

La intensidad de carbono (medido en kg CO<sub>2</sub> por cada megavatio (MW) generado) se reduce a medida que se aumenta el porcentaje de contenido de hidrógeno en la mezcla de gas combustible. Esto se debe principalmente a que la combustión de hidrógeno resulta en emisiones de vapor de agua.

Actualmente, existen turbinas de gas con la capacidad de operar con porcentajes de blending de hidrógeno de bajos medios ( $\leq 30\%$  vol), se les realiza modificaciones menores, en especial al sistema de manejo de combustible y combustor. Sin embargo, se espera que a largo plazo (2050) gran parte de la infraestructura actual de turbinas de gas sea capaz de reconfigurarse para operar con altos porcentajes de blending de hidrógeno ( $\geq 50\%$  vol). [Mitsubishi Power](#) está ejecutando uno de los proyectos más relevantes para el uso de blending de hidrógeno en turbinas gas en el mundo. Dicho proyecto consiste en una turbina de 840 MW, con capacidad de blending creciente: 30% de hidrógeno en 2025 y 100% en 2045.

En México, algunas empresas, como [Turbomáquinas SA de CV](#), se dedican al mantenimiento y fabricación de componentes menores de las turbinas (por ejemplo, álabes, sellos, chumaceras). En total, el Censo Económico 2019 identificó 61 unidades económicas dedicadas a la actividad de fabricación de motores de combustión interna, turbinas y transmisiones, actividades que emplean a 24.090 personas. Si bien no se trata exclusivamente de empresas de manufactura de turbinas, el dato refleja el capital humano desarrollado en torno a dicha industria.

### 2.3.3 Power to X (PtX)

Power to X (en adelante PtX), es una tecnología que consiste en el uso de energía proveniente de fuentes renovables y su transformación en un vector energético que puede tomar diferentes formas. En otras palabras, tras el proceso de electrólisis, esta tecnología permite almacenar el hidrógeno en forma pura o como compuesto (Power to Gas, Power to Liquid, Power to Chemicals), dependiendo de las necesidades que se atiendan. El hidrógeno es un gas con alta capacidad energética por kilo, pero baja capacidad si se considera el gran volumen que ocupa, dada su liviandad. Por lo anterior, PtX permite no solo almacenar hidrógeno, sino combinarlo con otros elementos para incrementar su densidad energética. Por ejemplo, al mezclarlo con otros compuestos, posteriormente, contribuyen a alimentar el transporte marítimo, el transporte aéreo, aplicaciones residenciales y aplicaciones industriales.

PtX es clave en una economía del hidrógeno, pues permite solventar algunas barreras principales asociadas a las fuentes renovables tradicionales y al propio hidrógeno, en particular, la capacidad de almacenar esa energía para su posterior reconversión y uso con fines industriales o de transporte pesado. De esta manera, PtX contribuye a descarbonizar industrias o medios de transporte donde las energías renovables no llegan de manera directa. Más aún, permite reciclar el CO<sub>2</sub> emitido en otras aplicaciones para la generación de los compuestos de PtX.

Esta tecnología, por tanto, propone solución a tres grandes paradigmas:

- Almacenar energía limpia para aumentar la capacidad, la flexibilidad, la calidad y la resiliencia de la red eléctrica y el sector de la movilidad eléctrica.

- Solucionar la intermitencia de la fuente primaria renovable.
- Transportar energía de manera sostenible.

En el ámbito internacional, la viabilidad de las tecnologías Power to X depende en gran medida, de la capacidad para reducir costos. En este sentido, México se encuentra en una posición privilegiada, particularmente por el potencial de poder reducir los costes relacionados con el proceso de generación de energía de fuentes renovables. Además, el país tiene la capacidad de desarrollo tecnológico en los laboratorios, capacidad que debe de ser escalada.

En cuanto a las tecnologías de Power to X, México cuenta con materia prima para desarrollar los catalizadores de los reactores, a fin de producir e-metanol. El cobre, presente en dicho componente, es el cuarto metal que más se produce en México, especialmente en el estado de Sonora. El zinc es el sexto metal con mayor volumen de producción, en particular en Baja California Sur, Zacatecas, Durango y Chihuahua.

#### 2.2.4 Almacenamiento a pequeña escala

En función de diversas variables, el hidrógeno puede ser producido y utilizado en el sitio, almacenado y distribuido localmente (por medio de tuberías, como ocurre con el gas, o en camiones como se hace con el líquido o el gas), o transportado largas distancias (mediante tuberías, ferrocarriles, camiones o buques).

Por lo anterior, el almacenamiento es un aspecto clave para aprovechar el hidrógeno en sus múltiples aplicaciones, ya que favorece transportarlo para su consumo en un lugar distinto al lugar de producción, a fin de alimentar vehículos de hidrógeno, como respaldo de energía estacionaria y portátil, entre otras. El hidrógeno puede almacenarse de forma sólida, líquida o gaseosa. La decisión sobre el tipo de almacenamiento está restringida por la aplicación final deseada: capacidad energética, velocidad de carga/descarga y limitaciones de espacio.

El hidrógeno se puede almacenar físicamente como gas, crio-comprimido y como líquido:

- Su almacenamiento como gas requiere tanques de alta presión, entre 359 y 700 bar.
- Como líquido, requiere temperaturas criogénicas, pues el punto de ebullición del hidrógeno a una atmósfera de presión es de  $-252,8$  °C.
- En forma de gas criogénico, combina ambas propiedades de los sistemas de hidrógeno gaseoso comprimido y criogénico. No hay licuefacción y el gas se comprime a 300 bar a  $-233$  °C.
- El hidrógeno también se puede almacenar en las superficies de los sólidos (por adsorción) o dentro de los sólidos (por absorción).

Para aplicaciones estacionarias y dependiendo de la cantidad requerida, se puede almacenar hidrógeno en recipientes de presión, tanques de hidrógeno líquido aislados termicamente, o en cavernas de minas de sal.

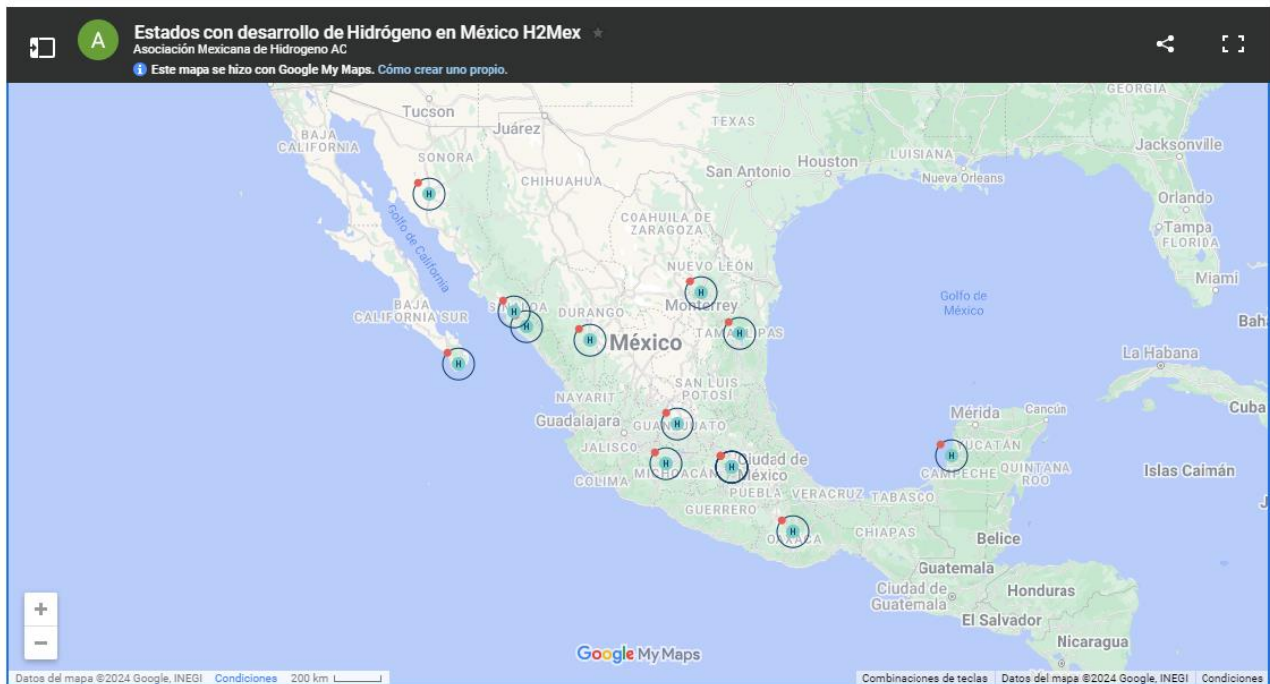
El desarrollo tecnológico comprende cuatro tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno en

estado gaseoso, que se distinguen en cuanto a los materiales que utilizan, las características que presentan y la aplicación a la que pueden servir.

En México, aún no se manufactura esta tecnología. No obstante, la presencia de compañías como [Toyota Gosei](#), [Plastic Omnium](#) y [Forvia](#) en territorio nacional ofrece perspectivas favorables para una futura participación en este mercado. [Toyota Gosei](#) y [Forvia](#) son empresas que manufacturan tanques de hidrógeno de tipo IV en plantas en otros países.

El desarrollo tecnológico e industrial en México tiene potencial para incorporarse, de manera concreta, en la manufactura de tanques de almacenamiento de hidrógeno gaseoso de alta presión, al adaptarlos de otras tecnologías de almacenamiento de gases combustibles, como el gas licuado y el gas natural.

### 3. Proyectos de Hidrógeno en desarrollo en México



#### **1 proyecto**

**Ubicación:** Hermosillo

**Proyecto:** Producción de hidrógeno verde y amoniaco verde

**Etap:** En desarrollo

**Empresa:** ASLAN Energy

**Notas:** La fase 1 del proyecto producirá casi 600 mil toneladas de amoniaco verde

## **2 proyecto**

**Ubicación:** Los Cabos

**Proyecto:** Power to Power

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** Mass Storage Energy, Energía Los Cabos

**Notas:** Aportará entre 15-20% de la generación del sistema eléctrico de Los Cabos. Permitirá la entrada de 2.500 millones USD.

## **3 proyecto**

**Ubicación:** El Fuerte

**Proyecto:** Hidrógeno Verde

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** DH2 Energy

**Notas:** Inversión de 1.172 millones de dólares. Producción solar de 1.708 MW que permitirá la generación de 41.485 toneladas de hidrógeno verde al año mediante electrólisis.

## **4 proyecto**

**Ubicación:** Mazatlan

**Proyecto:** Metanol Verde

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** Transition Industries, Internacional Finance Corporation

**Notas:** Inversión de 2.200 millones de dólares

## **5 proyecto**

**Ubicación:** Durango

**Proyecto:** Green Ammonia

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** Tarafert

**Notas:** Producción de hasta 200.000 toneladas métricas de amoníaco verde al año

## **6 proyecto**

**Ubicación:** Monterrey

**Proyecto:** Utilización de H2 verde en plantas cementeras

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** CEMEX

**Notas:** Promoverán la inyección de hidrógeno en plantas de cemento

## **7 proyecto**

**Ubicación:** Reynosa

**Proyecto:** Tratamiento de aguas residuales y producción de hidrógeno verde

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** Gobierno de Reynosa



### **8 proyecto**

**Ubicación:** Guanajuato

**Proyecto:** Blending

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** Dhamma Energy

**Notas:** Inversión de 3.931 millones de pesos mexicanos

### **9 proyecto**

**Ubicación:** Michoacán

**Proyecto:** Producción de Hidrógeno Verde

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** Siemens Energy, Gobierno de Michoacán

**Notas:** Producción para dar servicio al sector industrial, de transporte público, automotriz etc..

### **10 proyecto**

**Ubicación:** Ciudad de México

**Proyecto:** Celdas de combustible de hidrógeno

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** GENCELL / CFE

**Notas:** Inversión de 6 millones de dólares

### **11 proyecto**

**Ubicación:** Oaxaca

**Proyecto:** Producción de hidrógeno verde

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** Copenhagen Infrastructure y Gobierno de Oaxaca

**Notas:** Inversión de 10.000 millones de dólares

### **12 proyecto**

**Ubicación:** Campeche

**Proyecto:** Green Ammonia

**Etapas:** En desarrollo

**Empresa:** SEMABICCE

**Notas:** Se estima producción de 170.000 toneladas de amoníaco verde. Inversión de 1.100 millones de dólares.

## **4. Principales retos para el desarrollo del hidrógeno verde en México**

Los principales retos a los que México debe hacer frente si quiere convertirse en uno de los principales actores en el sector del hidrógeno verde, son los siguientes:

- **Falta de infraestructura en redes de transmisión y redes de gaseoductos:** sobre todo, por la poca capacidad existente y la reducida inversión en redes de transmisión de energía y gaseoductos que permita garantizar la confiabilidad, seguridad y calidad del suministro eléctrico

en el país.

- **Escasa demanda doméstica de hidrógeno:** fundamentalmente concentrada en empresas estatales. Del mismo modo, los reducidos incentivos estatales no promueven inversiones para que las empresas incorporen el hidrógeno verde como fuente para llevar a cabo sus procesos productivos.
- **Reducida planificación estatal:** se requiere superar retos regulatorios y establecer incentivos para la producción, transporte, almacenamiento y uso del hidrógeno verde, a fin de satisfacer la estimación creciente de demanda futura.
- **La participación limitada de las energías renovables en la matriz energética:** el país se encuentra por debajo de los objetivos establecidos en la Ley de Transición Energética en términos de producción de energía limpia. México tenía en 2022 una capacidad instalada de energías renovables de 27.453 MW, mientras que España, en el mismo periodo, alcanzó los 70.452 MW. Esta gran diferencia, muestra la importancia y la falta que hace desarrollar las energías renovables en el país antes de embarcarse en grandes proyectos de hidrógeno verde. Así mismo, el aumento en la participación de energías renovables contribuirá a conseguir el objetivo de que el 35% de la generación nacional sea limpia en 2024 y el 37.7% en 2030.
- México sufre lo que se conoce como **estrés hídrico**, es decir, problemas de escasez de agua, lo que supone un factor limitante para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en México. No obstante, el problema de abastecimiento de agua en las regiones productoras de hidrógeno verde como Baja California podría resolverse con la instalación de plantas desalinizadoras.

## 5. Oportunidades de negocio para empresas gallegas

México tiene, como hemos mencionado a lo largo de este estudio, un gran potencial para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde, ya que factores como sus condiciones favorables para la producción de energías a partir de fuentes renovables, su amplia y desarrollada base manufacturera y las oportunidades para la exportación que le ofrecen su ubicación estratégica y su red de acuerdos de libre comercio, hacen del país un enclave muy interesante para atraer inversión extranjera, repleto de oportunidades.

Por ello, las oportunidades para las empresas gallegas pueden darse en las siguientes áreas:

1. **Producción de hidrógeno verde** en zonas con suministro de energías limpias. Se puede aprovechar la infraestructura existente de generación de energías renovables (solar, eólica) para el establecimiento de plantas de producción de hidrógeno verde.
2. **Incorporación de hidrógeno verde en los procesos de producción de PEMEX.**
3. **Importación de tecnología** destinada a la producción de hidrógeno verde. México importará este tipo de tecnología ya que los esfuerzos gubernamentales son reducidos para generar una industria que abastezca la producción y por tanto se importara tecnología extranjera.
4. **Diseño y construcción de la infraestructura complementaria** necesaria para el transporte y almacenamiento de hidrógeno verde desde las plantas renovables hasta los lugares en los que se utilizará el hidrógeno verde.
5. **Fabricación de todo tipo de equipos para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde:** celdas de combustible, equipo para acondicionamiento, transporte y almacenamiento, para consumo y para

la exportación (nearshoring, acuerdos de libre comercio)

**6. Incorporación de hidrógeno verde en la industria para cumplir con los objetivos de descarbonización. Proyectos a pequeña y mediana escala para la producción y consumo in situ.**

**7. Fabricación de vehículos eléctricos con celda de combustible.**

**8. Instalación de estaciones de servicio de hidrógeno verde** en las principales rutas de transporte de mercancías.

**9. Proyectos públicos de electromovilidad.**

## 6. Información adicional

[Asociación mexicana del hidrógeno](#)

### 6.1 Ferias

[World Hydrogen Energy Conference and Exhibition:](#) 23-27 de junio de 2024

[The green expo 2024:](#) 3 - 5 de septiembre de 2024