

## Nota Sectorial HIDRÓXENO VERDE EN MÉXICO



Esta nota sectorial foi elaborada por  
Belén Bouzas Duro

Baixo a supervisión da Antena Igape México

Agosto 2024



EXENCIÓN DE RESPONSABILIDADE: A información e os contidos incluídos neste documento non teñen carácter vinculante, pois se trata dun servizo ofrecido cun carácter informativo e divulgativo. Tampouco representan a opinión da Antena Igape México, que non se responsabiliza do uso que poida facerse deles.

## Índice Xeneral

1. Hidróxeno.....	1
1.1 Hidróxeno verde .....	2
2. O hidróxeno verde en México.....	5
2.1 Marco legal .....	5
2.2 A situación actual .....	5
2.3 México como plataforma de manufactura .....	7
3. Proxectos de hidróxeno en desenvolvemento en México .....	12
4. Principais retos para o desenvolvemento do hidróxeno verde en México .....	14
5. Oportunidades de negocio para empresas galegas .....	15
6. Información adicional.....	16
6.1 Ferias.....	16

## 1. Hidróxeno

Ante as grandes emisións de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) producidas polos combustibles fósiles e a situación de urxencia climática que pesa sobre o planeta, surxe a necesidade de buscar fontes de enerxía alternativas que sexan respectuosas co medio ambiente.

O hidróxeno é o elemento químico máis lixeiro e abundante do universo, representa o 75% da materia do planeta. É un gas incoloro, inodoro e altamente inflamable. Actualmente, utilízase nunha variedade de aplicacións industriais e científicas debido ás súas propiedades únicas, como a súa alta enerxía de liberación por unidade de masa e a súa capacidade para formar auga cando reacciona con osíxeno.

Para obter o hidróxeno e usalo como fonte de enerxía, existen diferentes procesos, diferenciando o tipo de hidróxeno segundo a fonte de enerxía utilizada para a súa obtención.

- **Hidróxeno gris:** prodúcese principalmente a partir do gas natural (metano) mediante un proceso chamado *reforma de vapor*. Utilízase na industria química, como na produción de amoníaco e metanol. Actualmente, é amplamente utilizado e de todos os tipos de hidróxeno é o máis barato, con todo, non se trata dun tipo de enerxía limpa xa que emite grandes cantidades de  $\text{CO}_2$  durante a súa produción e por tanto, contribúe de forma activa ao cambio climático.
- **Hidróxeno azul:** tamén se produce a partir de gas natural, pero coa adición de tecnoloxías de captura e almacenamento de carbono (CAC) para reducir as emisións de  $\text{CO}_2$ . Os seus usos son similares ao hidróxeno gris e principalmente úsase en procesos industriais. Aínda así, non é unha fonte de enerxía completamente libre de emisións e a tecnoloxía de captura pode ser custosa.
- **Hidróxeno turquesa:** prodúcese a partir do metano mediante un proceso de pirólisis, que descompón o metano en hidróxeno e carbono sólido. Os seus usos aínda están en fase de desenvolvemento, con potencial para aplicacións similares ás do hidróxeno gris e azul. A súa principal vantaxe é que non produce  $\text{CO}_2$  e o carbono sólido pode ser utilizado noutros produtos, con todo, a tecnoloxía para a súa transformación está nas súas primeiras etapas, o que a fai, moi custosa.
- **Hidróxeno verde:** prodúcese mediante a electrólise da auga utilizando electricidade proveniente de fontes de enerxía renovable (solar, eólica e hidroeléctrica). O hidróxeno verde pode utilizarse nunha variedade de aplicacións, incluíndo transporte, xeración de electricidade e almacenamento de enerxía. A súa principal vantaxe é que non produce emisións de  $\text{CO}_2$  e é considerada, como unha das opcións sostibles máis viables para o futuro, con todo, o seu custo é o seu principal hándicap, debido ao alto custo das tecnoloxías de electrólises e a infraestrutura necesaria.

Actualmente, hai unha corrente crecente de interese de gobernos e empresas a nivel global polo hidróxeno verde, xa que, as súas características de enerxía limpa, sostible, versátil, almacenable e transportable, fan que moitos expertos considérenlo como o principal candidato a substituír aos combustibles fósiles, contribuindo así ao proceso de descarbonización das economías e á consecución dos compromisos internacionais asumidos pola maioría de países ao asinar o Acordo de París, que establece un marco global para a acción climática co obxectivo de limitar o quecemento global e minimizar os impactos do cambio climático.

A pesar do enorme interese no desenvolvemento de políticas, tecnoloxía, instalacións e proxectos relacionados co hidróxeno verde, en que despuntan países como China, EEUU, os membros da UE, a India, Xapón, Corea do Sur e en Latinoamérica, Chile, o hidróxeno verde aínda é un vector enerxético caro en comparación con outros combustibles e ten algúns condicionantes en canto a seguridade, xa que, é volátil e inflamable e require de auga constante, outro recurso natural escaso e non sempre dispoñible.

### 1.1 Hidróxeno verde

O hidróxeno non é un elemento que se atope en estado puro na natureza, polo que se debe producir. Para conseguir este elemento en estado puro hai que utilizar auga e enerxía renovables como a fotovoltaica a eólica ou a hidráulica.

O hidróxeno verde conséguese a través da electrolisis da auga, na que se utilizan unicamente enerxías renovables. Este proceso consiste en conectar ao auga unha corrente eléctrica continua mediante eléctrodos. Con esta electricidade conséguese descompoñer as moléculas que compoñen na auga o hidróxeno ( $H_2$ ) e osíxeno ( $O_2$ ). Se isto realízase con enerxías renovables, estarase a conseguir este hidróxeno sen emitir dióxido de carbono á atmosfera. Esta enerxía só emite vapor de auga e non deixa ningún tipo de residuos no aire. A pesar de que esta non é a única forma de conseguir hidróxeno verde, actualmente é a máis prometedora para produci-lo a gran escala e de forma económica.

Este recurso renovable é considerado o combustible do futuro debido á súa gran capacidade de almacenaxe de enerxía. Ten un baixo impacto ambiental e contribúe á redución de emisións de gases de efecto invernadoiro, e ademais, é moi versátil. Este hidróxeno verde ademais pódese converter en outros produtos como o metanol ou o amoníaco para utilizalo en fertilizantes ou como combustible. De feito, un quilogramo de hidróxeno contén a mesma enerxía que 2,6 kg de gas natural ou 3 kg de gasolina.

A pesar das súas innumerables vantaxes, tamén existen varios inconvenientes que actualmente dificultan a súa implantación. O primeiro deles é o alto custo da súa produción a gran escala, xa que actualmente non existen moitas instalacións de grandes dimensións. Ademais, require dunha corrente de enerxía limpa 24 horas ao día, xa que parar a produción elevaría os custos. Por último, o seu transporte e almacenaxe. Ao ser un gas é necesario exercer moita presión para almacenalo e distribuí-lo, con todo, pode ser utilizado directamente ou ben inxectado na rede de gasodutos, e por tanto, producido nun lugar e momento dado e utilizado noutro lugar máis adiante.

Para solucionar esta dificultade inicial á hora de transportalo, algunhas empresas deciden utilizar o hidróxeno verde para producir metanol verde. Isto convérteo nun elemento líquido e é máis fácil de transportar en barco, podendo utilizarse mesmo como combustible para o mesmo.

Entre as principais aplicacións do hidróxeno verde atópanse:

- **Industria:** actualmente a industria representa máis do 90% do consumo do hidróxeno a nivel global pero trátase principalmente de hidróxeno gris, é dicir, o que se realiza a través do gas e o carbón, o que na práctica supón a emisión de 830 toneladas de dióxido de carbono á atmosfera ao ano. A día de hoxe, a electrolisis unicamente produce o 5% do hidróxeno a nivel global. Chegar a utilizar hidróxeno verde nestes procesos supón un paso moi relevante que permitiría minimizar a pegada ambiental. Só en Europa, coa utilización de hidróxeno verde poderíase evitar, ata o ano 2050, aproximadamente uns 560 millóns de toneladas de emisións de gases de efecto invernadoiro, xerar uns ingresos anuais ao redor de 820 billóns de euros, reducir ao redor do 15% de emisións locais en transporte por estrada e crear máis de cinco millóns de empregos.
- **Transporte:** outro dos sectores nos que os gases renovables, e en concreto, o hidróxeno verde vai ter un papel fundamental é na mobilidade. Na actualidade existen moitos proxectos orientados a desenvolver vehículos de todo tipo impulsados por hidróxeno: aviación, vehículos eléctricos de pila de combustible, ferrocarril e transporte marítimo. A utilización dos gases renovables en mobilidade permitirá a descarbonización dun dos sectores que máis emisións de dióxido de carbono emite e de maior impacto en canto á calidade do aire que se respira nas cidades. Así mesmo, o seu uso vai máis aló dos vehículos lixeiros e estenderase ao transporte pesado, o ferroviario e marítimo, sectores nos que a electrificación non é, neste momento, unha solución tecnicamente factible.
- **Usos domésticos:** este gas renovable pode destinarse ao consumo doméstico e comercial. A súa principal vantaxe reside en que pode ser transportado e almacenado na rede de gasodutos xa existente, sen necesidade de realizar investimentos adicionais relevantes en redes. Un exemplo deste uso son os sistemas de calefacción en contornas residenciais e comerciais, en os que a descarbonización preséntase como un gran desafío. A solución como paso previo á descarbonización total podería pasar polo uso combinado de hidróxeno verde e gas natural, aproveitando a infraestrutura gasista. O hidróxeno renovable tamén poderá ser utilizado para a xeración de electricidade mediante pilas de combustible, un proceso totalmente limpo e que pode orixinar auga quente sanitaria.
- **Xeración de enerxía eléctrica:** aproveitando os excesos de xeración eléctrica renovable nas horas punta pódese xerar hidróxeno verde que se destine á produción de electricidade, vertiendo á rede eléctrica nas horas val.

O contexto do cambio climático ha levado aos gobernos, empresas e mesmo á academia, a buscar solucións, que van desde a creación dun marco de cooperación para buscar a redución de emisións de gases de efecto invernadoiro ata a Investigación e desenvolvemento de novas tecnoloxías que contribúan neste obxectivo. Actualmente, no marco do Acordo de París, obrígase ás partes para indicar as súas Contribucións Determinadas a Nivel Nacional, que son medidas tomadas por cada país para reducir as emisións nacionais e adaptarse para os efectos do cambio climático. Isto debe lograrse en liña coa Axenda 2030 para o Desenvolvemento sostible, mesma que establece 17 Obxectivos de Desenvolvemento Sostible (ODS) e contempla un plan de acción con enfoque transversal respecto a as tres dimensións do desenvolvemento sostible (social, económico e ambiental).

Polo anterior, o hidróxeno verde é unha ferramenta útil para lograr o cumprimento dos ODS, particularmente dos seguintes:

**Meta 7.1** Garantir o acceso universal a servizos enerxéticos alcanzables, fiables e modernos.

**Meta 7.2** Aumentar considerablemente a proporción de enerxía renovable no conxunto de fontes enerxéticas.

O hidróxeno verde pode servir como alternativa de almacenamento e que permita brindar confiabilidade aos sistemas eléctricos.

**Meta 9.4** Modernizar a infraestrutura e reconverter as industrias para que sexan sostibles.

O hidróxeno verde pode axudar en estimular ás industrias para adaptarse ao seu uso e desenvolver infraestruturas e procesos para o seu aproveitamento polas características propias do hidróxeno.

**Meta 11.2** Proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, alcanzables, accesibles e sostibles para todos.

**Meta 11.6** Reducir o impacto ambiental negativo per cápita das cidades, incluso prestando especial atención á calidade do aire e a xestión dos refugallos municipais doutro tipo.

O hidróxeno verde pode contribuír á redución de emisións, a mellora da calidade do aire e o desenvolvemento de espazos urbanos máis sostibles.

**Meta 13.2** Incorporar medidas relativas ao cambio climático nas políticas, estratexias e plans nacionais, no marco legal nacional adoptáronse medidas que estimulen a consecución dos obxectivos ambientais do país.

O hidróxeno aínda que se considera como unha fonte de enerxía limpa conforme á LTE (Lei de Transición Enerxética), ata o momento non se incorporou dentro da política pública ou marco normativo que preveza os usos, aplicacións actuais e potenciais.

O hidróxeno verde vai ser clave para alcanzar a neutralidade climática e un sistema eléctrico totalmente renovable para 2050. A nivel mundial máis de 30 países contan con follas de roteiro de hidróxeno e están en desenvolvemento máis de 200 proxectos de hidróxeno a gran escala en toda a cadea de valor, o 85% dos cales se atopan en Europa, Asia e Australia.

No próximos dez anos, está previsto que Europa destine ata 30.000 millóns de euros ao despregamento desta tecnoloxía.

No caso de España, o país conta cun dos plans de desenvolvemento de enerxía eléctrica renovable máis ambiciosos da Unión Europea, o PNIEC, e unha folla de Roteiro do Hidróxeno. Ademais, conta co apoio da industria privada, con numerosas compañías enerxéticas traballando en proxectos de desenvolvemento de hidróxeno verde.

## 2. O hidróxeno verde en México

### 2.1 Marco legal

México non conta polo momento cunha estratexia nacional nin con regulación específica para o desenvolvemento do mercado do hidróxeno verde, o que limita o aproveitamento e a súa competitividade fronte a outros países.

A pesar de non existir estratexia nacional, as empresas públicas CFE e PEMEX, principal produtora e consumidora de hidróxeno do país, mostráronse interesadas en incorporar e impulsar a utilización do hidróxeno verde nos seus procesos, poñendo en marcha algúns proxectos piloto con obxectivos e metas a conseguir, por exemplo, o [Programa de Desenvolvemento do Sistema Eléctrico Nacional](#), incorporando a produción de hidróxeno en centrais de ciclo combinado.

No Senado da República, está a estudarse un proxecto de decreto para impulsar o mercado do hidróxeno verde en México, que, aínda que non é moi ambicioso en canto obxectivos, si mostra un interese e vontade en comezar a explorar as potencialidades que este tipo de combustible ten para o país. No decreto sinalase que “consideramos establecer unha nova atribución á Secretaría de Enerxía, para que a través da CFE promova e instrumente, un programa nacional de uso do hidróxeno verde, así como estableza metas e mecanismos para limitar a produción de hidróxeno producido con combustibles fósiles, co fin de que redunden nun beneficio sistemático e promovan a transición a enerxías renovables”.

[A Asociación Mexicana de Hidróxeno \(AMH2\)](#) presentou en maio de 2022 unha Folla de Roteiro para impulsar a industria do hidróxeno verde, que puxo ao dispor de autoridades, legisladores e sectores que puidesen estar interesados: [“Hidróxeno verde: O vector enerxético para descarbonizar a economía de México”](#).

Ademais, o hidróxeno está regulado no artigo 27 da Constitución Política dos Estados Unidos Mexicanos, no que se sinala que corresponde á Nación o dominio directo de todos os carburos de hidróxeno sólidos, líquidos e gaseosos (DOF).

Por último, mencionar que a Lei da Industria Eléctrica, no seu artigo 3 apartado XXII, considera a enerxía xerada polo aproveitamento do hidróxeno unha enerxía limpa cando se cumpra coa eficiencia mínima que estableza a Comisión Reguladora de Enerxía.

### 2.2 A situación actual

Ata o 2023, no país identificábanse 19 plantas que producen hidróxeno gris, a maioría das cales o utilizan para autoconsumo ou como materia prima en diferentes procesos. As plantas que operan na actualidade provén de hidróxeno para usos tradicionais relacionados coas seguintes industrias:



- **Alimentaria:** concretamente, as empresas que producen graxas e manteigas mediante procesos de hidroxenación. A maioría destas plantas son pequenas e de autoconsumo.
- **Petroquímica:** para producir pinturas, fibras téxtiles, tinguiduras e solventes.
- **Acerera:** con plantas de autoconsumo para producir bens como o arame e o alambión.
- **Petroleira:** para a refinamento (esta industria posúe algunhas das plantas máis grandes polas dimensións do seu consumo).
- **De fertilizantes:** para a produción de amoníaco.
- **Cementeira:** que utiliza o hidróxeno polo seu alto potencial calorífico, necesario nos seus procesos.
- **Eléctrica:** para o arrefriado de xeradores.

Ademais das plantas on-site, tamén hai empresas que comercializan gases industriais como o hidróxeno, producidos centralmente e distribuídos en tanques por medio de tráileres. Neste nicho, participan tres grandes empresas: [Cryoinfra](#), [Air Liquide](#) e [Linde](#).

A produción e o consumo de hidróxeno atópase maioritariamente concentrado nos procesos de refinación de petróleo (60%), o que significa, que a empresa produtiva do Estado, Petróleos Mexicanos (PEMEX), é o principal actor da industria, pois consumiu no ano 2022 36 kilotón (kt) ao ano.

En canto aos métodos de produción do hidróxeno no país, case a totalidade, o 95% leva a cabo mediante reformado do gas natural, só unha pequena parte, o 4%, mediante electrólise. Con todo, ningún dos proxectos de produción de hidróxeno mediante electrólise que se atopan en operación catalógase como verde, xa que os electrolizadores atópanse conectados á rede. O restante 1% provén da industria cloro álcali. O anterior tradúcese nunha intensa xeración de gases de efecto invernadoiro, só no 2021, PEMEX xerou 71.1 millóns de toneladas de dióxido de carbono, destas, o 21.4% foi produto de procesos de refinación de petrolíferos, e o 5.5% de procesos de produción de petroquímicos como fertilizantes.

Ante este escenario, a produción e o uso do hidróxeno verde aparece como unha alternativa relevante para cumprir o Acordo de París, onde a Contribución Determinada a Nivel Nacional de México establece como obxectivos a redución dos gases de efecto invernadoiro e das emisións de carbono negro en 22% e 51%, respectivamente, para 2030. Nese sentido, a incorporación do hidróxeno verde en usos tradicionais e en novas aplicacións coaduxaría á descarbonización dalgúns dos sectores que xeran máis emisións. As actividades de produción de electricidade e o autotransporte, por se mesmas, foron responsables do 23.27% e do 18.52% das emisións totais de dióxido de carbono no ano 2019, respectivamente. O anterior significa que a incursión do hidróxeno verde como vector enerxético posúe un elevado potencial de contribución no roteiro facía a redución dos gases de efecto invernadoiro, ao ser un complemento cruce das enerxías renovables pola súa capacidade de almacenamento e de conversión, así como polo potencial que garda para ser utilizado en centrais de ciclo combinado en mestura co gas natural.

### 2.3 México como plataforma de manufactura

A transición cara ás enerxías renovables ha significado o nacemento de novos desenvolvementos e de novas industrias, así como dun ecosistema de competencia entre os países, que vai desde o desenvolvemento tecnolóxico e a manufactura, ata a provisión de materias primas. Nesa orde de ideas, a economía verde resulta ser un modelo económico que provoca relacións virtuosas entre as tres dimensións do desenvolvemento: económica, social e ambiental.

No caso do hidróxeno verde, México posúe características que o colocan como un xogador competitivo na produción do devandito elemento, grazas aos recursos prospectivos renovables (solar e eólico) cos que conta o territorio nacional. Adicionalmente, a fortaleza do sector industrial do país coloca nunha posición privilexiada para incorporarse na manufactura de diversas tecnoloxías para a produción, almacenamento e o aproveitamento do hidróxeno verde. México é a principal potencia en materia de exportacións de América Latina (37.9%), máis aínda, é responsable de máis da metade das exportacións da rexión relacionadas con manufacturas de media e alta tecnoloxía. Nos últimos anos, máis do 80% das exportacións do sector de manufacturas en México corresponden a bens de media e alta tecnoloxía.

O anterior detonou, en primeiro lugar, o desenvolvemento de habilidades e capacidades, polo que existe unha forza laboral capacitada e especializada nos sectores metalmecánico, automotriz, aeroespacial, eléctrico e electrónico, entre outros. En segundo lugar, favoreceu o desenvolvemento de infraestrutura e dunha rede loxística que permite procesos de encadenamiento produtivo, áxiles e eficientes. Así mesmo, desenvolveuse un ecosistema industrial robusto para prover compoñentes das diferentes tecnoloxías. Na actualidade, México conta con preto de 580 mil unidades económicas asociadas ao seitor industrial, ao redor de 116 mil pertencen a subsectores con potencial de encadenamiento produtivo para manufacturar tecnoloxías asociadas á produción, ao almacenamento e á conversión do hidróxeno verde. Estes subsectores, empregan a preto de tres millóns de persoas.

Doutra banda, a posición xeográfica de México, grazas á súa proximidade con Estados Unidos, brinda acceso a un dos mercados máis grandes a nivel global. Adicionalmente, conta co Sistema Portuario Nacional, composto por 117 portos e terminais, que posibilita o comercio con máis de 145 países. A extensa rede de estradas e ferroviaria, pola súa banda, permite o transporte de mercadoría facía o interior do país por vía terrestre.

Nesa orde de ideas, existen factores que constitúen unha oportunidade para consolidar a posición de México na cadea global de valor do hidróxeno verde contribuirá á xeración de empregos de boa calidade e ben remunerados, promoverá dinamismo nas entidades federativas, diversificará as actividades económicas do país, abrirá novos mercados e permitirá seguir consolidando ao país en actividades económicas de manufactura.

### 2.3.1 Electrolizadores

Os electrolizadores son unha tecnoloxía fundamental para xerar hidróxeno de baixas emisións. A electrólise consiste nun proceso que, co uso de electricidade, divide a auga ( $H_2O$ ) nas súas moléculas compoñentes: Hidróxeno ( $H_2$ ) e osíxeno ( $O_2$ ). Unha vez ocorrida a separación, o hidróxeno pode almacenarse como gas comprimido ou licuado para o seu uso final no sector industrial, eléctrico ou de transporte.

A separación das moléculas da auga ocorre en electrolizadores alimentados por electricidade. Para que o hidróxeno producido sexa catalogado como verde e teña un maior impacto na redución dos gases de efecto invernadoiro, é necesario que a enerxía requirida para a electrólise proveña dunha fonte renovable, como a solar ou a eólica.

Na actualidade, existen tres tipos principais de electrolizadores: alcalinos (AKL), de membrana de intercambio de protóns (PEM) e de óxido sólido (SOEC), que funcionan de formas lixeiramente diferentes, dependendo do material electrolítico involucrado e varían en aspectos como a eficiencia enerxética, a capacidade, a temperatura de operación e o período de vida útil. Os electrolizadores ALK e PEM representan importancia comercial, outros, como os SOEC e os electrolizadores de membrana de intercambio de aniones (AEM) atópanse aínda en etapa de laboratorio con prototipos de baixa potencia.

En México, existen varios proxectos de desenvolvemento tecnolóxico ao redor da produción de hidróxeno vía electrólise da auga. [O Instituto Nacional de Electricidade e Enerxías Limpas \(INEEL\)](#), desde hai 20 anos, conta con proxectos relacionados co desenvolvemento de electrolizadores. Devanditos proxectos oriéntanse a incrementar a eficiencia e a capacidade de electrolizadores tradicionais de tecnoloxía PEM. Hoxe contan con prototipos de 1 kW con eficiencias do 75% que buscan ser escalados no curto prazo a unha categoría intermedia de 2 kW, que permita un posterior escalamiento vía integración de módulos e con eficiencias superiores ao 80%. No medio prazo, espérase un escalamiento de 5 kW. Así mesmo, traballan en tecnoloxías de electrolizadores con menor madurez de membranas de intercambio aniónico, con obxecto de reducir os custos mediante a substitución dos materiais das membranas e dos catalizadores, por metais menos custosos e máis comúns en México, como a prata, o cobre, o níquel e o ouro. De maneira paralela, a investigación busca reducir o custo da electricidade, o que impactaría de maneira positiva ás tecnoloxías de produción de hidróxeno verde, xa que, leste é o principal insumo que impacta o custo nivelado do hidróxeno (LCOH<sub>2</sub>).

[O Centro de Investigacións Científicas de Iucatán \(CICY\)](#) tamén desenvolve unha investigación de relevancia para substituír metais nobres no electrolito por outras materias primas dispoñibles en México, como o manganeso, o grafito e os polímeros. Así mesmo, a investigación do CICY comprende o modelamiento por dinámica computacional de novos prototipos para alcanzar maiores niveis de eficiencia a partir de diversas variables.

[O Instituto Politécnico Nacional \(IPN\)](#) especializouse no desenvolvemento de electrolizadores AKL e desenvolveu prototipos que hoxe se atopan en proceso de transferencia. No curto prazo, espérase o escalamiento de 5 a 10 kW, e en en o medio prazo, ata 50 kW. O prototipo actual de 5 kW tivo un

custo de ao redor de 57 millóns de dólares, con varios compoñentes integrados en México. En total, hai 11 institucións nacionais que levan a cabo investigación e desenvolvemento tecnolóxico ao redor dos electrolizadores para a produción do hidróxeno.

A investigación ao redor da manufactura de electrolizadores en México permitiu instalar capacidades para desenvolver os diferentes compoñentes. Algunhas limitacións relaciónanse con que prototipos de baixa potencia aínda non se transfiren á industria, o que non permite a súa escalamiento. Ademais, a fabricación de electrolizadores leva a cabo manualmente, o que, en caso de alta demanda, poderían producirse pescozos de botella. Por último, os centros de investigación e desenvolvemento tecnolóxico enfrontan orzamentos limitados.

De conformidade coas persoas expertas, México conta cun amplo potencial para participar na cadea de proveduría e fabricación de electrolizadores e de cada un dos seus compoñentes. Algúns dos factores que representan fortalezas nese sentido son:

- A formación de capital humano na materia desde as universidades e os centros de investigación.
- A capacidade instalada en México en relación coa manufactura metalmecánica, que permitiría participar na integración do hardware das celas electrolíticas e doutros compoñentes do balance de planta.
- A relevancia da industria acerera e a súa capacidade de produción, que coloca a México como o 15º maior produtor de aceiro no mundo.
- A relevancia da industria de fabricación de compoñentes electrónicos, con 444 empresas en México que empregan a mais de 190 mil persoas.
- Os avances tecnolóxicos para substituír materiais críticos nos electrolizadores ALK e PEM por materiais dispoñibles en México, este último aspecto permitiría o desenvolvemento da industria mineira a fin de prover insumos para a manufactura de electrolizadores.

### 2.3.2 Turbinas eléctricas

As turbinas son unha tecnoloxía madura que consiste en motores que converten a enerxía dun fluído (aire, gas, vapor de auga) en enerxía mecánica ou eléctrica. Inicialmente, o aire é comprimido e logo mesturado co combustible nun combustor. A mestura de aire-combustible é queimada e os gases de combustión quentes expándese a través dunha turbina para producir enerxía eléctrica nun xerador.

As eficiencias termodinámicas das turbinas de gas (28-35%) pódense aumentar cando o gas exhausto quente utilízase para xerar vapor, que á súa vez, pon en marcha unha turbina de vapor para producir enerxía eléctrica adicional. A este proceso coñéceselle como ciclo combinado (CC), xa que emprega dous ciclos termodinámicos, alcanzado eficiencia de 55- 60%.

En todos os casos, emprégase gas natural (constituído principalmente por metano) como combustible de alimentación en turbinas de gas. Con todo, recentemente creceu o interese de utilizar mesturas de gas natural con hidróxeno, proceso coñecido como *blending*. O anterior ten como propósito reducir a pegada de carbono no proceso de xeración eléctrica.

A intensidade de carbono (medido en kg CO<sub>2</sub> por cada megavoltio (MW) xerado) redúcese a medida que se aumenta a porcentaxe de contido de hidróxeno na mestura de gas combustible. Isto débese principalmente a que a combustión de hidróxeno resulta en emisións de vapor de auga.

Actualmente, existen turbinas de gas coa capacidade de operar con porcentaxes de blending de hidróxeno de baixos medios ( $\leq 30\%$  vol), realízaselles modificacións menores, en especial ao sistema de manexo de combustible e combustor. Con todo, espérase que a longo prazo (2050) gran parte da infraestrutura actual de turbinas de gas sexa capaz de reconfigurarse para operar con altas porcentaxes de blending de hidróxeno ( $\geq 50\%$  vol). [Mitsubishi Power](#) está a executar un dos proxectos máis relevantes para o uso de blending de hidróxeno en turbinas gas no mundo. Devandito proxecto consiste nunha turbina de 840 MW, con capacidade de blending crecente: 30% de hidróxeno en 2025 e 100% en 2045.

En México, algunhas empresas, como [Turbomáquinas SA de CV](#), dedícanse ao mantemento e fabricación de compoñentes menores das turbinas (por exemplo, álabes, selos, chumaceras). En total, o Censo Económico 2019 identificou 61 unidades económicas dedicadas á actividade de fabricación de motores de combustión interna, turbinas e transmisións, actividades que empregan a 24.090 persoas. Aínda que non se trata exclusivamente de empresas de manufactura de turbinas, o dato reflicte o capital humano desenvolvido ao redor de dita industria.

### 2.3.3 Power to X (PtX)

Power to X (en diante PtX), é unha tecnoloxía que consiste no uso de enerxía proveniente de fontes renovables e a súa transformación nun vector enerxético que pode tomar diferentes formas. Noutras palabras, tras o proceso de electrólise, esta tecnoloxía permite almacenar o hidróxeno en forma pura ou como composto (Power to Gas, Power to Liquid, Power to Chemicals), dependendo das necesidades que se atendan. O hidróxeno é un gas con alta capacidade enerxética por quilo, pero baixa capacidade se se considera o gran volume que ocupa, dada a súa liviandad. Polo anterior, PtX permite non só almacenar hidróxeno, senón combinalo con outros elementos para incrementar a súa densidade enerxética. Por exemplo, ao mesturalo con outros compostos, posteriormente, contribúen a alimentar o transporte marítimo, o transporte aéreo, aplicacións residenciais e aplicacións industriais.

PtX é clave nunha economía do hidróxeno, pois permite liquidar algunhas barreiras principais asociadas ás fontes renovables tradicionais e ao propio hidróxeno, en particular, a capacidade de almacenar esa enerxía para a súa posterior reconversión e uso con fins industriais ou de transporte pesado. Desta maneira, PtX contribúe a descarbonizar industrias ou medios de transporte onde as enerxías renovables non chegan de maneira directa. Más aínda, permite reciclar o CO<sub>2</sub> emitido noutras aplicacións para a xeración dos compostos de PtX.

Esta tecnoloxía, por tanto, propón solución a tres grandes paradigmas:

- Almacenar enerxía limpa para aumentar a capacidade, a flexibilidade, a calidade e a resiliencia da rede eléctrica e o sector da mobilidade eléctrica.
- Solucionar a intermitencia da fonte primaria renovable.

- Transportar enerxía de maneira sostible.

No ámbito internacional, a viabilidade das tecnoloxías Power to X depende en gran medida, da capacidade para reducir custos. Neste sentido, México atópase nunha posición privilexiada, particularmente polo potencial de poder reducir os custos relacionados co proceso de xeración de enerxía de fontes renovables. Ademais, o país ten a capacidade de desenvolvemento tecnolóxico nos laboratorios, capacidade que debe de ser escalada.

En canto ás tecnoloxías de Power to X, México conta con materia prima para desenvolver os catalizadores dos reactores, a fin de producir e-metanol. O cobre, presente en devandito compoñente, é o cuarto metal que máis se produce en México, especialmente no estado de Sonora. O zinc é o sexto metal con maior volume de produción, en particular en Baixa California Sur, Zacatecas, Durango e Chihuahua.

#### 2.3.4 Almacenamento a pequena escala

En función de diversas variables, o hidróxeno pode ser producido e utilizado no sitio, almacenado e distribuído localmente (por medio de tubaxes, como ocorre co gas, ou en camións como se fai co líquido ou o gas), ou transportado longas distancias (mediante tubaxes, ferrocarrís, camións ou buques).

Polo anterior, o almacenamento é un aspecto clave para aproveitar o hidróxeno nas súas múltiples aplicacións, xa que favorece transportalo para o seu consumo nun lugar distinto ao lugar de produción, a fin de alimentar vehículos de hidróxeno, como respaldo de enerxía estacionaria e portátil, entre outras. O hidróxeno pode almacenarse de forma sólida, líquida ou gasosa. A decisión sobre o tipo de almacenamento está restrinxida pola aplicación final desexada: capacidade enerxética, velocidade de carga/descarga e limitacións de espazo.

O hidróxeno pódese almacenar fisicamente como gas, crío-comprimido e como líquido:

- O seu almacenamento como gas require tanques de alta presión, entre 359 e 700 bar.
- Como líquido, require temperaturas criogénicas, pois o punto de ebulición do hidróxeno a unha atmosfera de presión é de  $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- En forma de gas criogénico, combina ambas as propiedades dos sistemas de hidróxeno gaseoso comprimido e criogénico. Non hai licuefacción e o gas comprímese a 300 bar a  $-233\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- O hidróxeno tamén se pode almacenar nas superficies dos sólidos (por absorción) ou dentro dos sólidos (por absorción).

Para aplicacións estacionarias e dependendo da cantidade requirida, pódese almacenar hidróxeno en recipientes de presión, tanques de hidróxeno líquido illados termicamente, ou en cavernas de minas de sal.

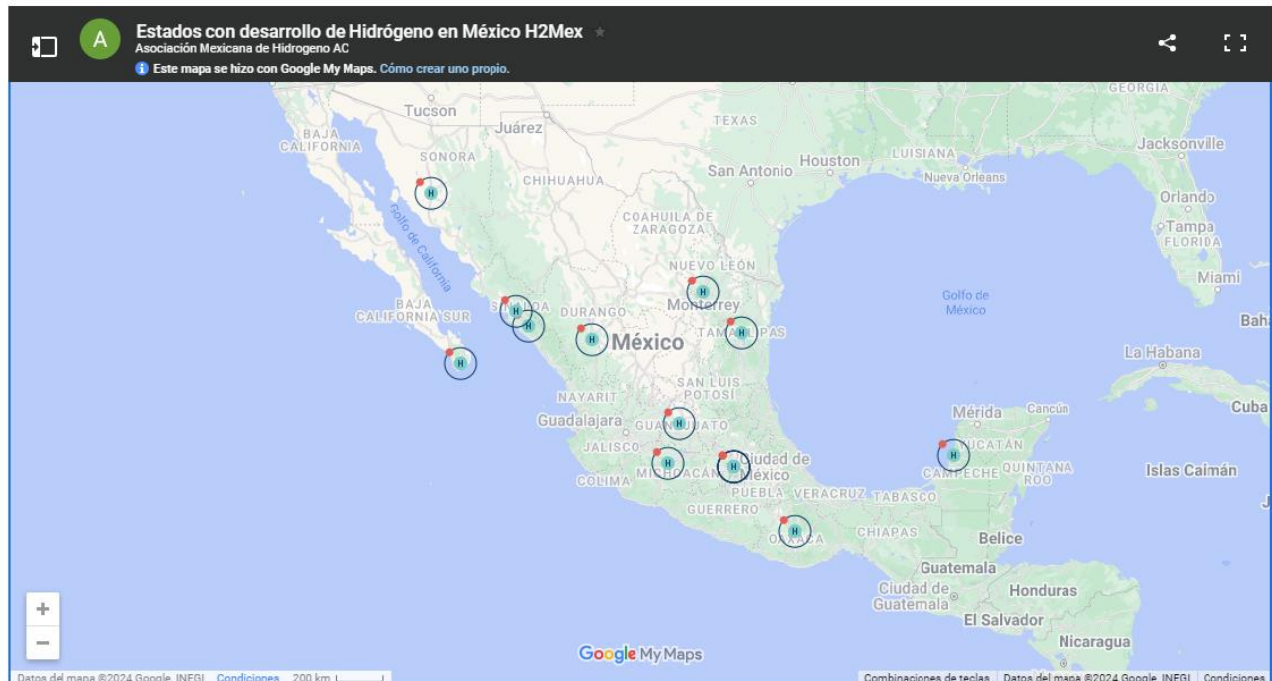
O desenvolvemento tecnolóxico comprende catro tipos de tanques de almacenamento de hidróxeno en estado gaseoso, que se distinguen en canto aos materiais que utilizan, as características que

presentan e a aplicación á que poden servir.

En México, aínda non se manufactura esta tecnoloxía. Con todo, a presenza de compañías como [Toyoda Gosei](#), [Plastic Omnium](#) e [Forvia](#) en territorio nacional ofrece perspectivas favorables para unha futura participación neste mercado. [Toyoda Gosei](#) e [Forvia](#) son empresas que manufacturan tanques de hidróxeno de tipo IV en plantas noutros países.

O desenvolvemento tecnolóxico e industrial en México ten potencial para incorporarse, de maneira concreta, na manufactura de tanques de almacenamento de hidróxeno gaseoso de alta presión, ao adaptalos doutras tecnoloxías de almacenamento de gases combustibles, como o gas licuado e o gas natural.

### 3. Proxectos de hidróxeno en desenvolvemento en México



#### **1 proxecto**

**Localización:** Hermosillo

**Proxecto:** Producción de hidróxeno verde e amoníaco verde

**Etap:** En desenvolvemento

**Empresa:** ASLAN Energy

**Notas:** A fase 1 do proxecto producirá case 600 mil toneladas de amoníaco verde

#### **2 proxecto**

**Localización:** Os Cabos

**Proxecto:** Power to Power

**Etap:** En desenvolvemento

**Empresa:** Mass Storage Energy, Enerxía Os Cabos

**Notas:** Achegará entre 15-20% da xeración do sistema eléctrico dos Cabos. Permitirá a entrada de 2.500 millóns UDS.

### **3 proxecto**

**Localización:** O Forte

**Proxecto:** Hidróxeno Verde

**Etapa:** En desenvolvemento

**Empresa:** DH2 Energy

**Notas:** Investimento de 1.172 millóns de dólares. Producción solar de 1.708 MW que permitirá a xeración de 41.485 toneladas de hidróxeno verde ao ano mediante electrólise.

### **4 proxecto**

**Localización:** Mazatlan

**Proxecto:** Metanol Verde

**Etapa:** En desenvolvemento

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

**Notas:** Investimento de 2.200 millóns de dólares

### **5 proxecto**

**Localización:** Durango

**Proxecto:** Green Ammonia

**Etapa:** En desenvolvemento

**Empresa:** Tarafert

**Notas:** Producción de ata 200.000 toneladas métricas de amoníaco verde ao ano

### **6 proxecto**

**Localización:** Monterrey

**Proxecto:** Utilización de H2 verde en plantas cimenteiras

**Etapa:** En desenvolvemento

**Empresa:** CEMEX

**Notas:** Promoverán a inxección de hidróxeno en plantas de cemento

### **7 proxecto**

**Localización:** Reynosa

**Proxecto:** Tratamento de augas residuais e produción de hidróxeno verde

**Etapa:** En desenvolvemento

**Empresa:** Goberno de Reynosa

### **8 proxecto**

**Localización:** Guanajuato

**Proxecto:** Blending

**Etapa:** En desenvolvemento

**Empresa:** Dhamma Energy

**Notas:** Investimento de 3.931 millóns de pesos mexicanos



### 9 proxecto

**Localización:** Michoacán

**Proxecto:** Producción de Hidróxeno Verde

**Etapa:** En desenvolvemento

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

**Notas:** Producción para dar servizo ao sector industrial, de transporte público, automotriz etc..

### 10 proxecto

**Localización:** Ciudad de México

**Proxecto:** Celas de combustible de hidróxeno

**Etapa:** En desenvolvemento

**Empresa:** GENCELL / CFE

**Notas:** Inversión de 6 millóns de dólares

### 11 proxecto

**Localización:** Oaxaca

**Proxecto:** Producción de hidróxeno verde

**Etapa:** En desenvolvemento

**Empresa:** Copenhagen Infrastructure e Goberno de Oaxaca

**Notas:** Inversión de 10.000 millóns de dólares

### 12 proxecto

**Localización:** Campeche

**Proxecto:** Green Ammonia

**Etapa:** En desenvolvemento

**Empresa:** SEMABICCE

**Notas:** Estímase produción de 170.000 toneladas de amoníaco verde. Inversión de 1.100 millóns de dólares.

## 4. Principais retos para o desenvolvemento do hidróxeno verde en México

Os principais retos aos que México debe facer fronte se quere converterse nun dos principais actores no sector do hidróxeno verde, son os seguintes:

- **Falta de infraestrutura en redes de transmisión e redes de gasodutos:** sobre todo, pola pouca capacidade existente e o reducido investimento en redes de transmisión de enerxía e gasodutos que permita garantir a confiabilidade, seguridade e calidade da subministración eléctrica no país.
- **Escasa demanda doméstica de hidróxeno:** fundamentalmente concentrada en empresas estatais. Do mesmo xeito, os reducidos incentivos estatais non promoven investimentos para que as empresas incorporen o hidróxeno verde como fonte para levar a cabo os seus procesos produtivos.
- **Reducida planificación estatal:** requírese superar retos regulatorios e establecer incentivos para a produción, transporte, almacenamento e uso do hidróxeno verde, a fin de satisfacer a

estimación crecente de demanda futura.

- **A participación limitada das enerxías renovables na matriz enerxética:** o país atópase por baixo dos obxectivos establecidos na Lei de Transición Enerxética en termos de produción de enerxía limpa. México tiña en 2022 unha capacidade instalada de enerxías renovables de 27.453 MW, mentres que España, no mesmo período, alcanzou os 70.452 MW. Esta gran diferenza, mostra a importancia e a falta que fai desenvolver as enerxías renovables no país antes de embarcarse en grandes proxectos de hidróxeno verde. Así mesmo, o aumento na participación de enerxías renovables contribuirá a conseguir o obxectivo de que o 35% da xeración nacional sexa limpa en 2024 e o 37.7% en 2030.
- México sofre o que se coñece como **estrés hídrico**, é dicir, problemas de escaseza de auga, o que supón un factor limitante para o desenvolvemento da industria do hidróxeno verde en México. Con todo, o problema de abastecemento de auga nas rexións produtoras de hidróxeno verde como Baixa California podería resolverse coa instalación de plantas desalinizadoras.

## 5. Oportunidades de negocio para empresas galegas

México ten, como mencionamos ao longo deste estudo, un gran potencial para o desenvolvemento de proxectos de hidróxeno verde, xa que factores como as súas condicións favorables para a produción de enerxías a partir de fontes renovables, a súa ampla e desenvolvida base manufactureira e as oportunidades para a exportación que lle ofrecen a súa localización estratéxica e a súa rede de acordos de libre comercio, fan do país un enclave moi interesante para atraer investimento estranxeiro, repleto de oportunidades.

Por iso, as oportunidades para as empresas galegas poden darse nas seguintes áreas:

1. **Produción de hidróxeno verde** en zonas con subministración de enerxías limpas. Pódese aproveitar a infraestrutura existente de xeración de enerxías renovables (solar, eólica) para o establecemento de plantas de produción de hidróxeno verde.
2. **Incorporación de hidróxeno verde nos procesos de produción de PEMEX.**
3. **Importación de tecnoloxía** destinada á produción de hidróxeno verde. México importará este tipo de tecnoloxía xa que os esforzos gubernamentais son reducidos para xerar unha industria que abasteza a produción e por tanto importátese tecnoloxía estranxeira.
4. **Deseño e construción da infraestrutura complementaria** necesaria para o transporte e almacenamento de hidróxeno verde desde as plantas renovables ata os lugares nos que se utilizará o hidróxeno verde.
5. **Fabricación de todo tipo de equipos para o desenvolvemento de proxectos de hidróxeno verde:** celas de combustible, equipo para acondicionamento, transporte e almacenamento, para consumo e para a exportación (nearshoring, acordos de libre comercio)
6. **Incorporación de hidróxeno verde na industria para cumprir cos obxectivos de descarbonización. Proxectos a pequena e mediana escala para a produción e consumo in situ.**
7. **Fabricación de vehículos eléctricos con cela de combustible.**
8. **Instalación de estacións de servizo de hidróxeno verde** nos principais roteiros de transporte de mercadorías.
9. **Proxectos públicos de electromovilidad.**

## 6. Información adicional

[Asociación mexicana do hidróxeno](#)

### 6.1 Ferias

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

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