

**Artículo**

# ¿Combustible obtenido del agua?



**José Oswaldo Ceballos  
Luis Carlos Ordoñez López**

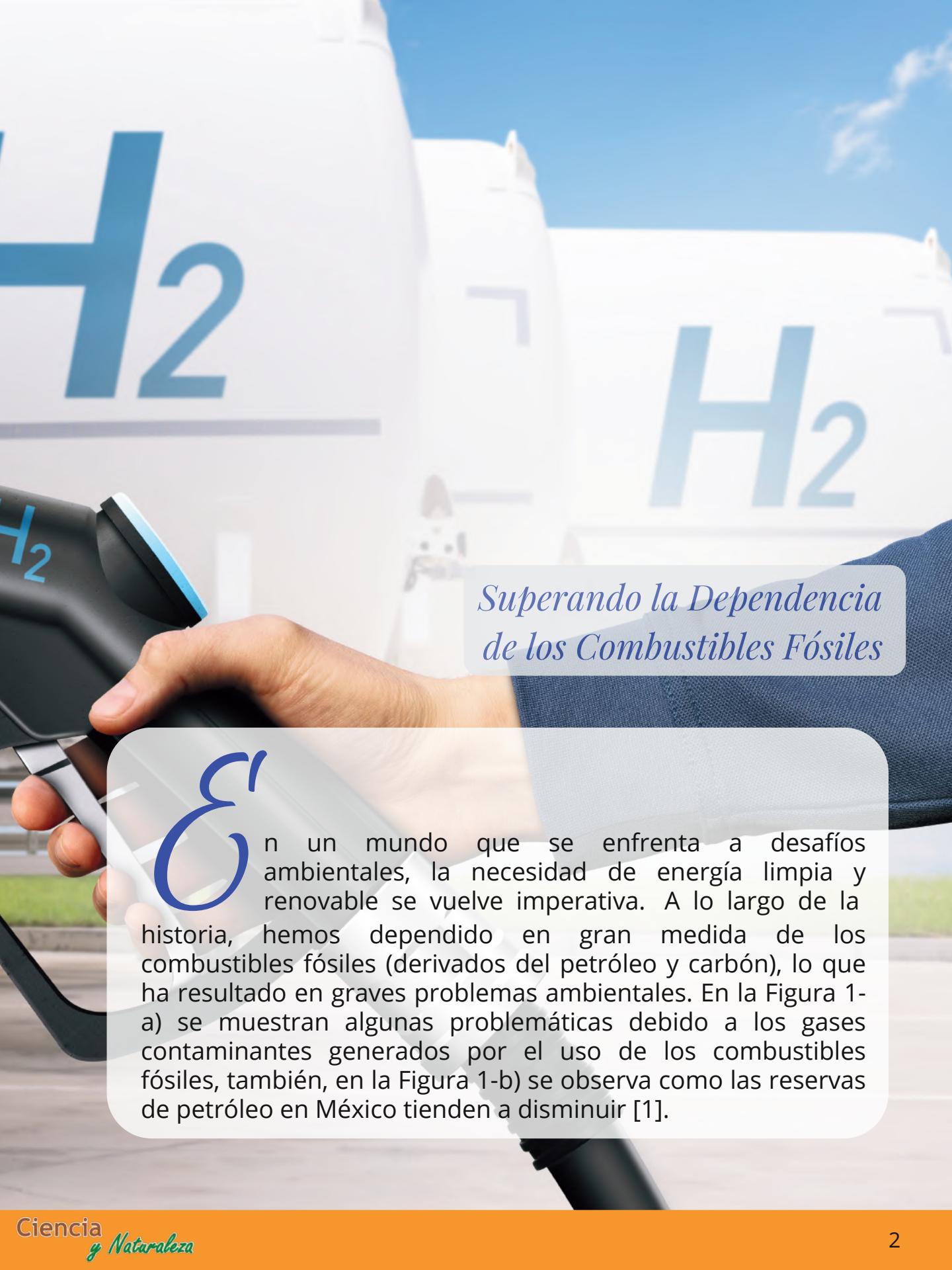
Artículo

# ¿Combustible obtenido del agua?



Cómo citar este artículo: Oswaldo-Ceballos J, Ordoñez López LC. 2024. ¿Combustible obtenido del agua? Revista Ciencia y Naturaleza (1097).



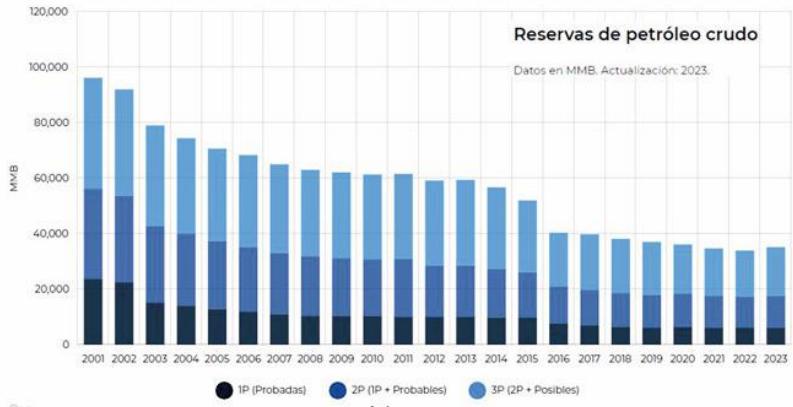


## *Superando la Dependencia de los Combustibles Fósiles*

**E**n un mundo que se enfrenta a desafíos ambientales, la necesidad de energía limpia y renovable se vuelve imperativa. A lo largo de la historia, hemos dependido en gran medida de los combustibles fósiles (derivados del petróleo y carbón), lo que ha resultado en graves problemas ambientales. En la Figura 1-a) se muestran algunas problemáticas debido a los gases contaminantes generados por el uso de los combustibles fósiles, también, en la Figura 1-b) se observa como las reservas de petróleo en México tienden a disminuir [1].



a)



b)

**Figura 1.** a) Estragos por el cambio climático generado por las emisiones contaminantes. b) Tendencia de reservas de petróleo en México.

Por ello, el uso de otros combustibles es de interés y si son a partir de energías renovables, mejor. El minimizar el uso de combustibles fósiles y pasar al uso de energías alternativas se convierte en una prioridad para mitigar estos impactos negativos. Este cambio no solo beneficia al medio ambiente, sino que también crea oportunidades laborales y fomenta la innovación tecnológica. Una solución revolucionaria en esta transición es la electrólisis, un proceso que separa el agua en hidrógeno y oxígeno utilizando electricidad.



El hidrógeno producido puede convertirse en un vector energético versátil (un medio para almacenar o transportar la energía), aplicable en sectores como el transporte, la industria y la generación de energía eléctrica. La obtención del hidrógeno se realiza con un dispositivo llamado electrolizador que puede tener eficiencias de hasta el 95% [1]. Esta tecnología contribuye significativamente a un sistema energético más limpio y sostenible, construyendo el camino hacia un futuro respetuoso con el medio ambiente.

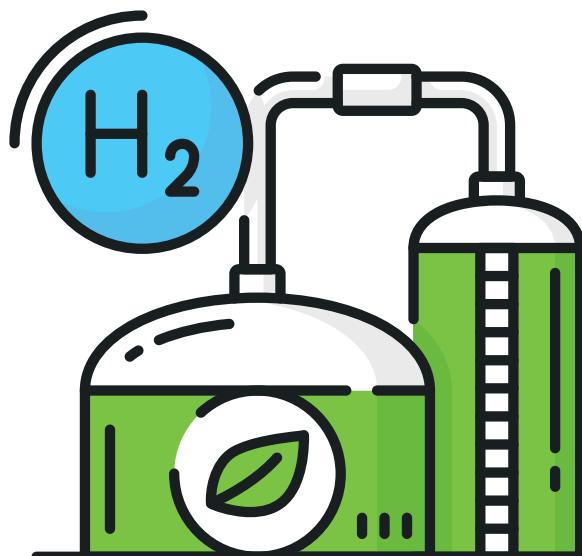


## ¿Qué es un electrolizador?

Un electrolizador es un dispositivo electroquímico que usa electricidad para separar el agua en sus dos componentes fundamentales: el hidrógeno y el oxígeno (a este proceso se le llama electrólisis). El electrolizador es una celda no espontánea, es decir, se requiere de energía eléctrica para su funcionamiento, la cual puede ser suministrada por fuentes renovables.

Los componentes básicos de un electrolizador son: un electrodo anódico, un electrodo catódico y un electrolito; estos componentes no son fáciles de conseguir y actualmente son caros, pero se está trabajando para cambiar esta situación. En cada uno de estos electrodos ocurre una reacción electroquímica conocida como reacción de electrodo y puede ser una oxidación, la cual ocurre en el ánodo, y una reacción de reducción, que se lleva a cabo en el cátodo.

El hidrógeno que se produce por el proceso de la electrólisis del agua se produce en el cátodo de un electrolizador. El hidrógeno, puede utilizarse como un combustible, y su molécula elemental tiene uno de los más altos contenidos energéticos por kilogramo.

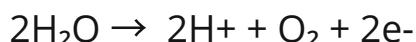


¿Entonces, cómo ocurre el proceso de electrólisis?

De manera general el funcionamiento de un electrolizador es el siguiente:



1. En el electrodo conocido como ánodo, la molécula del agua ( $H_2O$ ) se oxida, y se liberan moléculas elementales de oxígeno ( $O_2$ ) en forma de burbujas. Sí, ese oxígeno que está presente en el aire que respiramos (aire: 21% de oxígeno + 79 % de nitrógeno). La reacción que ocurre en el ánodo de un electrolizador que utiliza un electrolito ácido es la siguiente:



2. En el otro electrodo, al que llamamos cátodo, los iones de hidrógeno ( $H^+$ ) presentes en el electrolito, ganan electrones y se transforman en una molécula de hidrógeno ( $H_2$ ) y se desprenden de la superficie del cátodo en forma de burbujas. La reacción del cátodo en un medio ácido es la siguiente:



La reacción global del electrolizador es:  $2H_2O \rightarrow O_2 + 2H_2$

Los componentes principales de un electrolizador típico deben tener las siguientes características:

- **Electrodos:** Los electrodos deben tener la capacidad de conducir la corriente eléctrica, es decir, son piezas conductoras, generalmente están hechas de materiales como platino, grafito o acero inoxidable, que entran en contacto con el electrolito.
- **Electrolito o Membrana:** En algunos electrolizadores, se utiliza un electrolito líquido, y en otros, una membrana polimérica capaz de transportar o conducir los protones ( $H^+$ ).
- En este caso, la membrana separa físicamente los compartimentos del ánodo y el cátodo, como se mencionó, permite que los iones pasen a través de ella, pero no los electrones, lo que garantiza que las



reacciones de oxidación y reducción ocurran en compartimentos separados y evita que los gases producidos, hidrógeno y oxígeno, se mezclen.

- Fuente de energía: Un electrolizador necesita una fuente de energía eléctrica para funcionar. Esta puede ser una batería, paneles solares, turbinas eólicas o electricidad de la red eléctrica.
- Canales de flujo: Los canales se utilizan para transportar los gases producidos en el ánodo y el cátodo a sus respectivos puntos de recolección y almacenamiento.

## Electrólisis

La electrólisis es la separación del agua ( $H_2O$ ) en sus componentes gaseosos, hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ), al aplicar una corriente eléctrica constante. Esta corriente puede ser suministrada por una fuente de energía convencional o renovable [2].

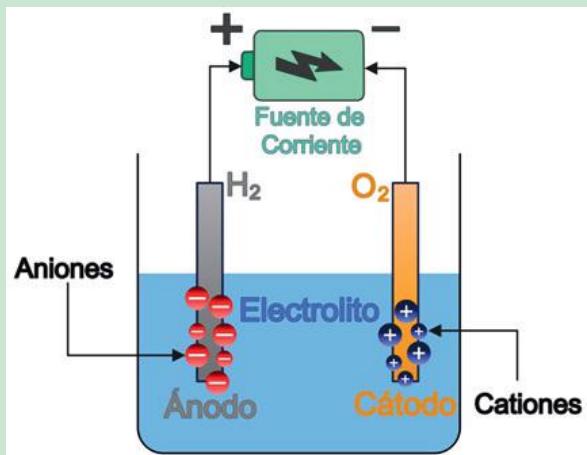


Figura 2. Esquema básico de la electrólisis.

Los electrolizadores se clasifican de acuerdo con el electrolito que utilizan en alcalinos, de membrana de intercambio protónico y de óxido sólido. La configuración y los materiales específicos de los electrodos pueden variar según el tipo de electrolizador. Por ejemplo, los electrolizadores alcalinos que utilizan una disolución alcalina como electrolito pueden usar electrodos basados en Níquel, mientras que los



los electrolizadores de membrana de intercambio protónica (PEM: Proton exchange membrane, en inglés) utilizan electrodos de metales nobles como el Platino (Pt) o materiales compuestos con este metal. Es importante mencionar que los electrolizadores comerciales constan de un conjunto de celdas conectadas para suministrar la cantidad de hidrógeno esperada.

## *Tipos de electrolizadores*

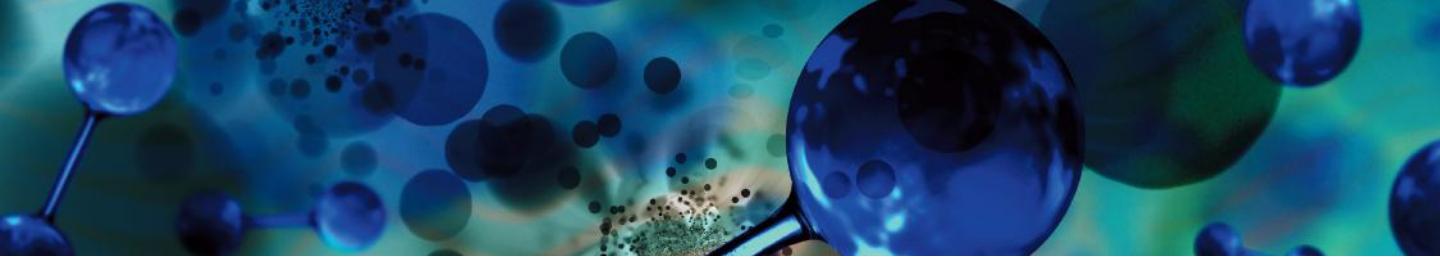
En la Figura 3 se presentan los diferentes tipos de electrolizadores que se han desarrollado, cada uno con sus propias características y aplicaciones específicas. A continuación, exploraremos los principales tipos de electrolizadores [3]:

- Electrolizadores alcalinos
  - Funcionamiento: Los electrolizadores alcalinos utilizan una disolución alcalina (o básica) como electrolito, usualmente el hidróxido de potasio (KOH) o el hidróxido de sodio (NaOH). El proceso se lleva a cabo en una celda dividida en compartimentos donde se colocan los electrodos ánodo y cátodo.

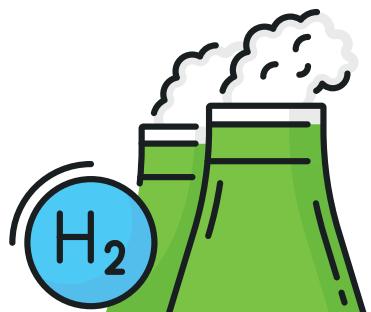
Estos materiales pueden adquirirse en tiendas físicas o en línea que distribuyan material químico, pero la aplicación en un electrolizador requiere de personal calificado y equipo especializado.

- Ventajas: Son conocidos por su alta eficiencia y durabilidad, lo que los hace adecuados para aplicaciones industriales de gran escala
- Aplicaciones: Se utilizan en la producción a gran escala de hidrógeno para aplicaciones industriales.





- Electrolizadores de óxido sólido
  - Funcionamiento: Estos electrolizadores utilizan materiales cerámicos como electrolito y operan a temperaturas altas, por arriba de los 600°C. Esto permite que se utilice calor residual para mejorar la eficiencia del proceso.
  - Ventajas: Son adecuados para aplicaciones de alta temperatura y tienen potencial en aplicaciones de almacenamiento de energía a gran escala.
  - Aplicaciones: A pesar de que todavía están en proceso de desarrollo, se cree que estos dispositivos de electrólisis muestran un gran potencial para ser utilizados en la producción masiva de hidrógeno.
- Electrolizadores de membrana de intercambio aniónico (electrólisis alcalina).
  - Funcionamiento: Usan una membrana especial que permite que los iones hidróxilo ( $\text{OH}^-$ ) pasen a través de ella, pero bloquea los iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ). En el ánodo, los iones  $\text{OH}^-$  reaccionan con el agua para producir oxígeno ( $\text{O}_2$ ), mientras que, en el cátodo, los iones  $\text{H}^+$  se combinan para formar hidrógeno ( $\text{H}_2$ ).
  - Ventajas: Son eficientes en la producción de hidrógeno resistentes a la contaminación del electrolito por impurezas, lo que los hace más duraderos y confiables.
  - Aplicaciones: Se utilizan en aplicaciones en la producción de productos químicos y, posiblemente, en la refinación de petróleo.





- Electrolizadores de membrana de intercambio protónico
  - Funcionamiento: Los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM: Proton Exchange Membrane) utilizan una membrana sólida como electrolito y operan a temperaturas relativamente bajas. La membrana permite el paso de protones (iones H<sup>+</sup>), pero no de electrones, lo que separa eficazmente el hidrógeno y el oxígeno.
  - Ventajas: Son conocidos por su capacidad de respuesta rápida y alta eficiencia, lo que los hace ideales para aplicaciones móviles y de menor escala.
  - Aplicaciones: Generación de alta pureza para aplicaciones científicas, para la electromovilidad utilizando vehículos eléctricos que utilizan celdas de combustible.

Con Membrana de Intercambio Protónico	Con Membrana de Intercambio aniónico
 Cátodo (-) Pt/C      Ánodo (+) Ir/IrO <sub>2</sub>	 Cátodo (-) Ni      Ánodo (+) NiCoFe
50 - 80 °C	40 - 80 °C
Electrolizador Alcalino	Electrolizador de Óxido Sólido
 Cátodo (-) Ni      Ánodo (+) NiCoFe DIAPRAGMA KOH	 Cátodo (-) NiCeramic      Ánodo (+) NiYSZ/Cermet
60 - 95 °C	700 - 1000 °C

**Figura 3.** Tipos de electrolizadores con sus componentes generales (Pt/C = catalizador basado en nanopartículas de platino depositado sobre la superficie de un material de carbono, Ir/IrO<sub>2</sub> = iridio y dióxido de iridio, Ni = níquel, Co = cobalto, Fe= hierro, KOH = hidróxido de potasio, Ni-YSZ=matriz cerámica de óxido de circonio estabilizado con óxido de lantano, -OH = hidroxilo, H<sup>+</sup>= protones, H<sub>2</sub>=hidrógeno gaseoso, O<sub>2</sub> = oxígeno gaseoso, H<sub>2</sub>O= agua líquida).

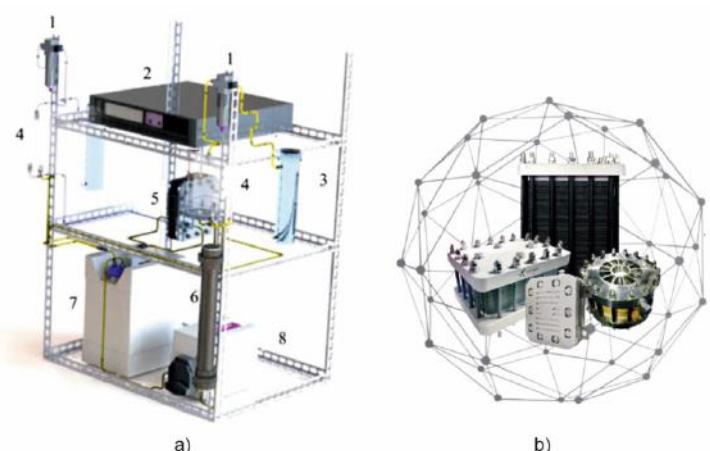


Cada tipo de electrolizador tiene sus propias ventajas y desafíos. La elección del tipo de electrolizador depende de las necesidades específicas de la aplicación y de factores como la escala de producción, la eficiencia energética y los costos asociados. Con el avance de la tecnología, se espera que los electrolizadores se vuelvan más eficientes, accesibles y versátiles, lo que impulsará al hidrógeno como vector energético que ayude a la descarbonización de varios sectores: la industria, el transporte y la generación de electricidad.

## *El electrolizador PEM desarrollado en el CICY*

En el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), uno de los centros CONACYT, se realizaron esfuerzos para desarrollar electrolizadores tipo PEM. En la Unidad de Energía Renovable del CICY, estudiantes y profesores, diseñaron distintos componentes, maquinaron piezas y las integraron en un prototipo de electrolizador con membrana de intercambio protónico (PEM-WE) para la producción de hidrógeno. En la Figura 4-a) se muestran los componentes principales utilizados en el PEM-WE como banco de pruebas y en la Figura 4-b) algunos tipos de electrolizadores comerciales de diferentes geometrías que se pueden encontrar en la industria del hidrógeno.

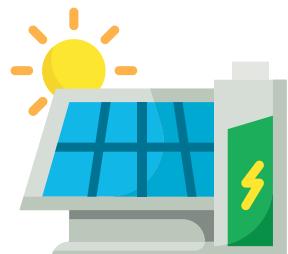
**Figura 4.** a) Banco de pruebas PEM-WE desarrollado por la Unidad de Energía Renovable del CICY. 1) Filtros coalescentes, 2) Fuente de alimentación, 3) Desecantes, 4) Tanques separadores (hidrógeno y oxígeno), 5) PEM-WE, 6) Intercambiador de calor, 7) Tanque de agua desionizada, 8) bomba peristáltica [5]. b) Tipos de electrolizadores comerciales por Titanium Products©





El equipo evaluó el régimen de flujo en los electrodos, y la producción de hidrógeno bajo varias condiciones de operación. El hidrógeno se considera un portador de energía ideal y una alternativa a los combustibles fósiles debido a su alto contenido energético (118 MJ/Kg a 25 °C), que es tres veces mayor que el de los hidrocarburos líquidos como la gasolina (44MJ/kg a 25 °C). Sin embargo, presenta la desventaja de poseer la menor energía específica por unidad de volumen (10.4 MJ/m<sup>3</sup>), lo que resulta en una ocupación significativamente mayor de espacio en comparación con la gasolina (32000 MJ/m<sup>3</sup>) [4]. Este equipo utiliza agua desionizada y produce 42 L de H<sub>2</sub> por hora con 15 V y 8.81 A, con una eficiencia de 59.65 %.

Por otro lado, es importante mencionar que los métodos convencionales de producción de hidrógeno, como el reformado de metano con vapor, generan diversos contaminantes que se emiten al medio ambiente. De esta manera, el desarrollo tecnológico para producir hidrógeno se ha enfocado en utilizar fuentes de energía renovables y respetuosas con los ecosistemas. Siendo la electrólisis, uno de los métodos más prometedores, que utiliza agua (10 kg de agua por kg de hidrógeno) y energía eléctrica de diferentes fuentes renovables, como la solar y la eólica.



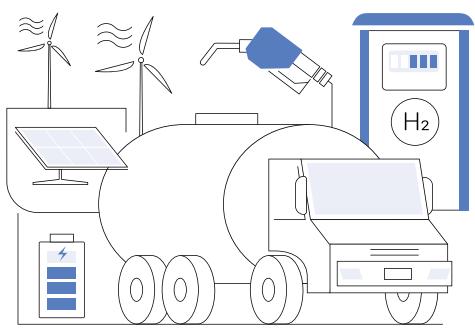
## *Ok, ya tenemos hidrógeno, ¿ahora qué?*

El hidrógeno ha estado en el centro de la atención como un vector energético limpio y versátil. Una de sus aplicaciones más emocionantes es como combustible. A medida que el mundo busca reducir el impacto de las emisiones de carbono y afrontar los desafíos del cambio climático, el hidrógeno como combustible se presenta como una solución prometedora. A continuación, exploramos las diversas aplicaciones del hidrógeno como combustible y su impacto en la construcción de un futuro más sostenible.



## 1. Transporte limpio:

Una de las aplicaciones más visibles y prometedoras del hidrógeno como combustible es en el transporte. Los vehículos eléctricos utilizan hidrógeno comprimido a altas presiones almacenado en tanques ocultos dentro del vehículo para generar electricidad a bordo y alimentar motores eléctricos. Aquí están algunas de las ventajas clave:



- Cero emisiones locales: Los vehículos de hidrógeno producen cero emisiones locales. El único subproducto es agua, lo que significa aire más limpio en las ciudades y una mejora en la calidad del aire.
- Larga autonomía y recarga rápida: Los vehículos de hidrógeno ofrecen una mayor autonomía en comparación con los vehículos eléctricos con baterías.

Además, el tiempo de recarga es similar al de los vehículos de combustibles fósiles, lo que reduce la ansiedad por la autonomía.

- Versatilidad: El hidrógeno se puede utilizar en una variedad de vehículos, siendo una mejor alternativa para autobuses de transporte público, camiones de carga, trenes e incluso barcos. Esto lo hace una alternativa muy adaptable para el transporte sostenible.

## 2. Generación de energía:

El hidrógeno también se puede utilizar para generar electricidad y calor en aplicaciones estacionarias. Esto incluye:

- Plantas de energía de hidrógeno: Las plantas de energía de hidrógeno utilizan celdas de combustible para convertir hidrógeno en electricidad de manera eficiente y sin emisiones.

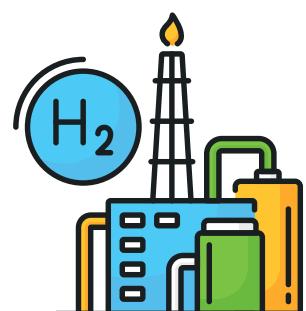




- Aplicaciones de respaldo: El hidrógeno se puede utilizar como fuente de energía de respaldo en áreas donde la red eléctrica es intermitente o inaccesible, proporcionando energía confiable en momentos críticos.
- Mezclas hidrógeno-gas natural para ser utilizado en plantas de ciclo combinado. En este sentido el PRODESEN ha marcado la meta de incorporar el hidrógeno verde producido a partir de electrólisis y fuentes renovables de energía en las plantas de ciclo combinado de CFE para el 2035.

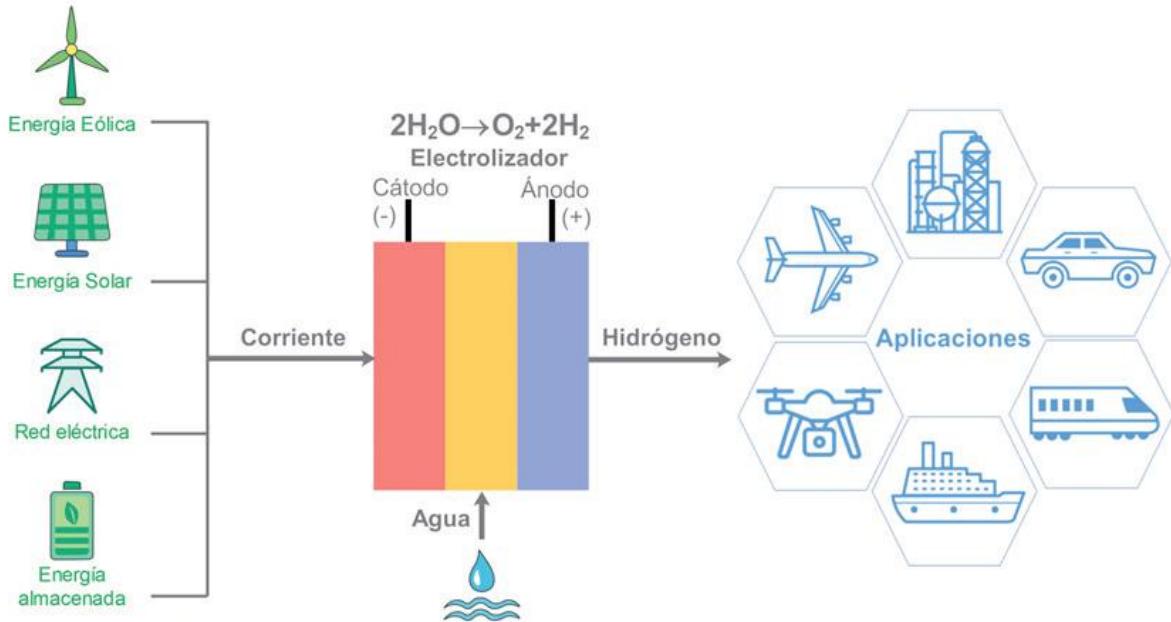
### 3. Almacenamiento de energía:

El hidrógeno también se está utilizando cada vez más como una solución de almacenamiento de energía a gran escala. En momentos de exceso de energía renovable, el exceso de electricidad se utiliza para producir hidrógeno con ayuda de la electrólisis. Luego, el hidrógeno se almacena y se utiliza cuando la demanda de energía es alta o cuando la generación de energía renovable es baja. Esto ayuda a estabilizar las redes eléctricas y a aprovechar al máximo las fuentes de energía intermitentes.



### 4. Industria y producción de materias primas:

El hidrógeno se utiliza en la producción de productos químicos y materiales, como el amoníaco, el cemento y el acero. La transición hacia la producción de hidrógeno verde puede reducir significativamente las emisiones asociadas con estas industrias. En la Figura 5 se muestra un diagrama donde un electrolizador se puede alimentar con fuentes de energías renovables y las aplicaciones más comunes. También, en la Figura 6 se presenta una imagen donde se ejemplifica como un autobús puede funcionar con hidrógeno contenido en un tanque sujeto a presión.



**Figura 5.** Representación del proceso para obtener hidrógeno de diferentes fuentes de energía y sus aplicaciones.

## ¿Qué hace que el electrolizador sea importante?

El electrolizador desempeña un papel fundamental en la transición hacia un futuro más sostenible y libre de emisiones de carbono. Permite la producción de hidrógeno verde (producido con muy bajas o cero emisiones de CO<sub>2</sub>), que se produce utilizando energía renovable. Esto hace al hidrógeno una fuente de energía genuinamente ecológica y duradera. Ya que la huella de carbono se reduce en gran medida.



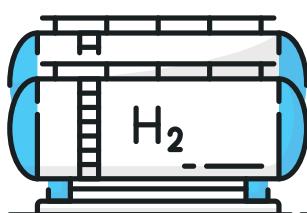
**Figura 6.** Imagen representativa de un autobús que funciona con hidrógeno.



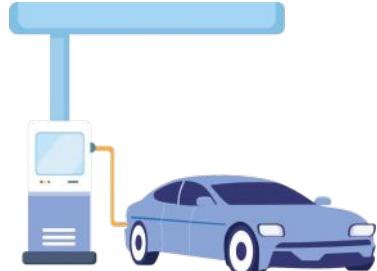
## Desafíos y futuro de la electrólisis de hidrógeno

A pesar del gran potencial de la electrólisis para obtener hidrógeno limpio, esta enfrenta varios desafíos que deben abordarse para su adopción generalizada y su contribución efectiva a la transición hacia una economía sostenible descarbonizada. Algunos de estos desafíos son [6]:

1. Eficiencia energética: Mejorar la eficiencia energética de la electrólisis es uno de los principales desafíos. La conversión de electricidad en hidrógeno y su posterior uso puede implicar pérdidas de energía considerables. Mejorar la eficiencia de los electrolizadores es crucial para maximizar la producción de hidrógeno utilizando fuentes renovables y disminuir los costos asociados con la energía desperdiciada.
2. Costos de producción: Los costos todavía son relativamente altos en comparación con otros métodos de producción de hidrógeno, como el reformado de gas natural. Reducir los costos es esencial para que el hidrógeno sea competitivo en el mercado y para ampliar su adopción.
3. Almacenamiento y distribución: El almacenamiento y la distribución eficientes del hidrógeno son desafíos adicionales. El hidrógeno es un gas difícil de manejar por el tamaño muy pequeño de su molécula. Se requieren avances en tecnologías de almacenamiento y transporte para garantizar su seguridad y viabilidad a gran escala.



4. Integración en infraestructura existente: Integrar el hidrógeno producido mediante electrólisis en la infraestructura energética existente es un desafío importante. Esto incluye la adaptación en sistemas de distribución y estaciones de servicio para el suministro de hidrógeno, así como la creación de regulaciones y estándares adecuados.



5. Investigación y desarrollo continuo: La inversión en investigación y desarrollo es esencial para superar los desafíos mencionados anteriormente. Se necesitan avances tecnológicos en los electrolizadores, materiales de electrodos, membranas, diseño para mejorar la eficiencia, disminuir los costos y la optimización de la producción de hidrógeno.

## Pensamientos hacia un Futuro Sostenible

La electrólisis del agua para la producción de hidrógeno se presenta como un componente esencial en la transición hacia una economía impulsada por energía limpia y renovable. Para ello los electrolizadores son fundamentales para avanzar hacia un futuro menos dependiente de los combustibles fósiles. Si bien ofrecen ventajas significativas para el medio ambiente al permitir la producción de hidrógeno verde, todavía existen desafíos, como la eficiencia energética y la gestión de materiales, que deben abordarse para maximizar su impacto positivo en la sostenibilidad a largo plazo.

A medida que se aborden los desafíos técnicos y económicos, es probable que veamos un aumento en la producción y el uso de hidrógeno producido mediante electrólisis en una variedad de aplicaciones, lo que contribuirá significativamente a la reducción de emisiones y a la creación de un futuro más sostenible y resiliente para las generaciones futuras.



La electrólisis de hidrógeno es una prueba más de que la innovación tecnológica puede desempeñar un papel fundamental en la búsqueda de respuestas a los desafíos más urgentes de nuestra actualidad. 

## *Agradecimientos*

Agradecimientos al proyecto CONAHCYT-SENER No. 254667 y a la beca de doctorado No. 789267.

## *Para Consulta*

- [1] Comisión Nacional de Hidrocarburos. 2022. Reporte de la Cuantificación y Certificación de las Reservas de la Nación del año 2022. <https://www.gob.mx/cnh/acciones-y-programas/cuantificacion-y-certificacion-de-reservas>
- [2] New Atlas. 2022. Rompiendo récords, este electrolizador de hidrógeno tiene una eficiencia del 95%. <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/investigacion/rompiendo-records-este-electrolizador-de-hidrogeno-tiene-una-eficiencia-del-95>
- [3] Rodríguez RM, Da Silva G, Urbina L. 2022. Estudio del proceso de electrólisis para la producción de Hidrógeno Verde, a partir del agua de mar. Tekhné 25(3): 01-22.
- [4] Rodríguez Carrasco E. 2022. Electrolizadores: Análisis, Perspectivas de Mercado y Comparación. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- [5] Arango J, Acevedo C. 2013. Proyección al año 2025 para el uso del hidrógeno en el sector transporte del Valle de Aburrá. (18)2. ISSN 0122-1701
- [6] Escobedo E, García D, Ruiz M, et al. 2023. Design, construction, and performance of a proton exchange membrane water electrolyzer (PEM-WE). International Journal of Electrochemical Science 18(5): 100110. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100110>
- [7] Merino C, de Pascual JR, Nieto E. 2023. Uso y costes del hidrógeno en transporte. Revista Digital del Cedex (202): 29-40.



Crédito de imágenes en orden de aparición: rcpstock, Scharfsinn86 (Getty Images, GI), Magda Ehlers (Pexels, P), Pagian Icon, khunkorn, Juicy Studio LTD, Vectortradition, audioundwerbung (GI), John Kevin (GI), geralt (pixabay), Oleksandr Zozulinski, canva samples, valeriimingirov, Thophet, Surakit S, bds studio, Visual Generation, vanitjan, Kester, Juan Roballo, Thinking How, amethyststudio. Crédito de figuras en orden de aparición: figura 4 heletitanium.com, figura 6 blog.energygo.es.

*Diseño de publicación: Yareli Tiburcio*



### **José Oswaldo Ceballos**

Adscripción: Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Estudiante de doctorado trabajando en la simulación numérica de celdas de combustible tipo PEM con una herramienta de código abierto y gratuito. También cuenta con experiencia en la simulación de celdas solares de perovskita.

Contacto: [jose.oswaldo.ceballos@gmail.com](mailto:jose.oswaldo.ceballos@gmail.com)



### **Luis Carlos Ordoñez López**

Profesor-Investigador Titular B, Unidad de Investigación en Energía Renovable (UER), Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Ingeniero Químico y Maestro en Ingeniería Química (Procesos), Facultad de Química-UNAM. Doctorado en Ingeniería (Energía), Centro de Investigación en Energía, UNAM. Su línea de investigación es materiales electrocatalíticos y sistemas electroquímicos para la energía.

Contacto: [lcol@cicy.mx](mailto:lcol@cicy.mx)