



Comprimiendo el hidrógeno para la descarbonización

Mayra Polett Gurrola
Luis Gerardo Arriaga Hurtado
Janet Ledesma García
Gloria Elena Marín Sansores



Comprimiendo el hidrógeno para la descarbonización

Hoy en día existen tecnologías que pueden evitar la contaminación y el aumento del impacto global. Solo falta que se adopten de forma masiva para poder abastecer al mundo de energía renovable y limpia.

Cómo citar este artículo: Polett-Gurrola M, Arriaga-Hurtado L, Ledesma-García J, Marín-Sansores G. 2025. Comprimiendo el hidrógeno para la descarbonización. Revista Ciencia y Naturaleza (1169).

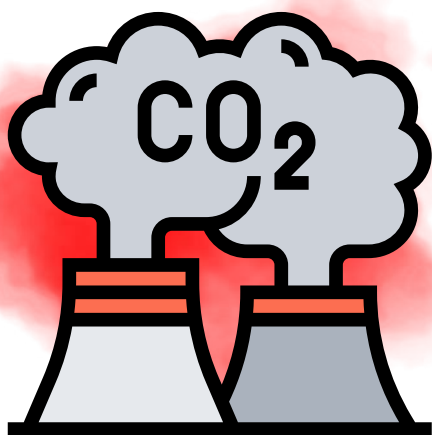




La transición energética, un cambio urgente para nuestro planeta



Actualmente, nuestro planeta enfrenta graves problemas ecológicos, destacando el cambio climático como uno de los más críticos. Aunque esto se debe a diversas causas, fundamentalmente se centra en la manera en que hemos generado energía a lo largo de la historia, ya que, durante muchos años hemos utilizado el carbón, el petróleo y el gas natural (combustibles fósiles) para generar la energía que consumimos en todo el mundo.



Pero, ¿cuál es el problema con estos combustibles si son de origen natural?, resulta que, al ser quemados se libera dióxido de carbono y otros gases (de efecto invernadero), que no representan un problema por sí mismos, porque cuando están en concentraciones de equilibrio, estos gases forman parte de un ciclo natural del planeta; se convierte en un grave problema cuando se emiten en exceso, y forman una barrera que no permite que se libere calor desde la Tierra, por eso, se produce un aumento de la temperatura.



Entonces, si imaginamos la cantidad de gases que hemos emitido por mucho tiempo y seguimos emitiendo, podemos entender todo el daño provocado al ambiente.

Se sabe que, más allá de las tres cuartas partes de la energía global necesaria se genera con estos combustibles, y en los últimos años, la cantidad de la energía demandada se ha elevado de manera importante por el aumento de la población, los cambios de estilo de vida y el avance de la tecnología.

Resulta alarmante pensar que el crecimiento poblacional y tecnológico no se detienen, y en este punto, es posible imaginar el daño que seguiremos ocasionando si no cambiamos.



Entendiendo esta situación, es muy clara la urgencia de dejar atrás el uso de estos combustibles y en su lugar, emplear fuentes de energía no contaminantes. Es aquí, donde el Hidrógeno surge como una opción para la generación de energía limpia.

"Si No Cuidamos El Medio Ambiente, No Tendremos Un Lugar Donde Vivir".

Rachel Carson

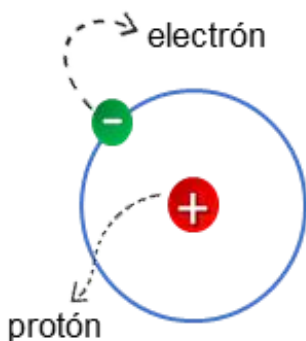


¿Qué es el Hidrógeno y dónde se encuentra?

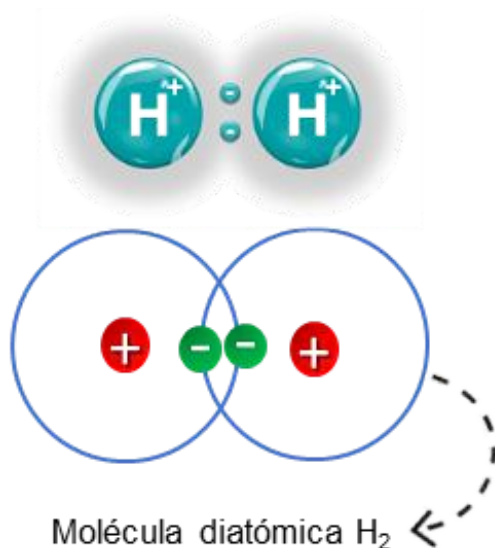
El Hidrógeno tiene mayor presencia en el universo que otros elementos, no tiene color ni olor, además, es muy inflamable; en nuestro planeta es abundante y lo podemos encontrar en el agua, en los hidrocarburos y en una gran variedad de compuestos.



Es el elemento más ligero y simple, ya que está formado solamente por un electrón y un protón, pero es más estable cuando se unen dos átomos (H_2), es decir, como molécula diatómica (Figura 1). En estado gaseoso no es tóxico y es más ligero que el aire.



Átomo de Hidrógeno (H)



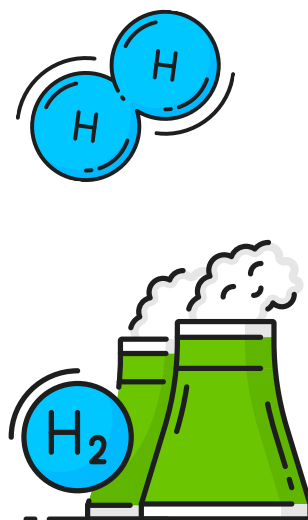
Molécula diatómica H_2

Figura 1. Molécula de hidrógeno



Un elemento con mucha energía

El hidrógeno tiene una característica de gran interés: su alto contenido de energía por masa. Para entender esto, podemos pensar que con 1 kg de gas hidrógeno se puede obtener hasta 141.8 MJ (a temperatura ambiente), este valor es tres veces mayor que la mayoría de los combustibles tradicionales, por ejemplo, con 1 kg de gasolina convencional solamente obtenemos 46.52 MJ [1] (Figura 2). Por otro lado, su combustión no genera emisiones contaminantes, solo se produce vapor de agua, haciéndolo aún más atractivo.



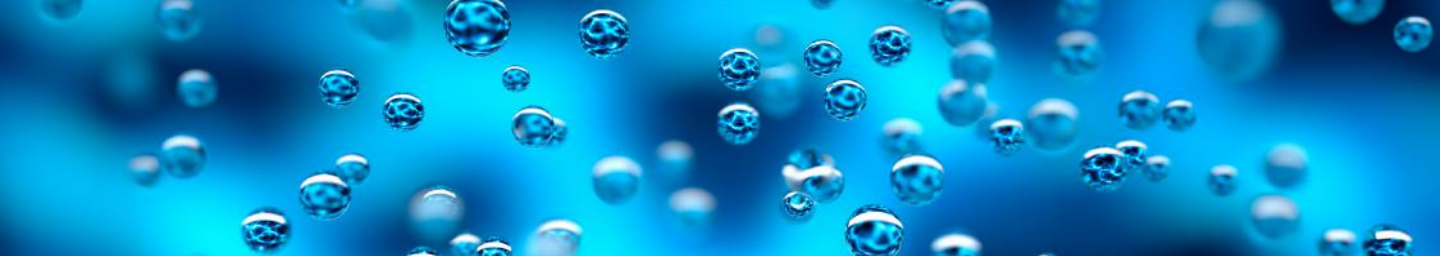
Mayor contenido energético que los combustibles convencionales

Para 39.41 kWh se requiere:



Figura 2. Comparación del contenido energético por peso del H_2 con respecto a los combustibles tradicionales.

El Hidrógeno no lo encontramos aislado o puro en la naturaleza, por lo que es necesario producirlo a partir de otros compuestos.



El hidrógeno, un vector energético limpio

La imperante necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, demanda la búsqueda de fuentes y tecnologías energéticas limpias, eficientes y sostenibles. En este contexto, el hidrógeno surge como una alternativa ideal en la producción de energía renovable [2].

El hidrógeno no es un recurso natural primario y no se encuentra en estado libre o puro en la naturaleza, es necesario su producción a partir de compuestos, por lo tanto, representa un medio para almacenar y transportar energía (la energía que contiene) para ser utilizada en el lugar y en el momento que se necesite, es decir, un vector energético.



Un vector energético es un portador de energía que se debe producir a partir de fuentes primarias, almacenándola para posteriormente liberarla de forma controlada.

Por contener mucha energía y tener una combustión libre de emisiones contaminantes, el hidrógeno ha ganado valor como vector energético limpio y eficiente. Se considera que tiene grandes posibilidades de reducir las emisiones de gases que dañan la atmósfera y contaminan nuestro medio ambiente [3].



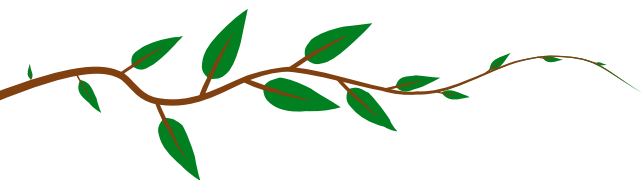
El hidrógeno puede producirse a partir del agua, mediante un proceso conocido como electrólisis, separando la molécula del agua en los átomos oxígeno e hidrógeno mediante el uso de la electricidad, y cuando la energía empleada en este proceso proviene de fuentes renovables, se obtiene un hidrógeno limpio, que al ser consumido solo produce agua (o vapor) como subproducto.



Este subproducto puede reutilizarse para iniciar de nuevo el proceso de producción de hidrógeno, o bien, puede devolverse a la naturaleza, cerrando un ciclo sostenible y respetuoso con el medio ambiente (Figura 3). Por todo esto, resulta una excelente alternativa para el futuro, de manera conjunta con fuentes renovables [4].



Figura 3. Ciclo sustentable del Hidrógeno



"Sé El Cambio Que Quieres Ver En El Mundo "

Mahatma Gandhi

Usos del hidrógeno

Es tan versátil que es utilizado en numerosas aplicaciones como el transporte, la generación de energía, en la calefacción y refrigeración; también es esencial en la fabricación de fertilizantes, amoníaco, metanol, en el refinado del petróleo, la producción de acero, fabricación de cemento, entre otras (Figura 4).

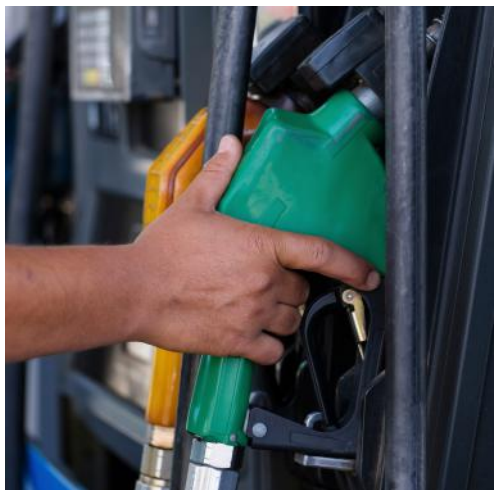


Figura 4. Usos del Hidrógeno



Limitantes para su uso generalizado

Existen varias razones que no han permitido que el hidrógeno se utilice de forma generalizada como los combustibles comunes. Una de estas razones es, que su obtención generalmente requiere de procesos adicionales para purificarlo, pues, si recordamos, debe generarse a partir de compuestos como el agua o los hidrocarburos, por lo que el hidrógeno que se obtiene puede contener impurezas; y, como es de esperarse, los procesos adicionales aumentan los costos de producción, además, requieren de más energía para realizarlos.



Una de sus principales desventajas frente a otros combustibles es su baja densidad energética por volumen, ya que un litro de hidrógeno proporciona únicamente 8 MJ. Este valor es 4 veces menor si hacemos la comparación con el mismo volumen de gasolina, el cual puede aportar 32 MJ. Por lo tanto, para que pueda competir con los otros combustibles que utilizamos es necesario comprimirlo a altas presiones [5].



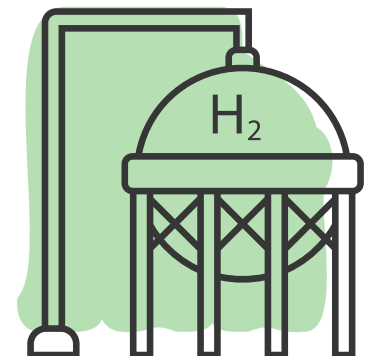
Tecnologías para la compresión del hidrógeno

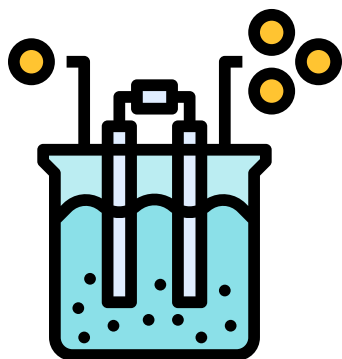
Actualmente, existen diversos dispositivos para comprimir el hidrógeno, que se pueden dividir en dos grupos principales: los compresores mecánicos y los compresores no mecánicos.



En el primer grupo, se encuentran los de diafragma, líquido iónico y los de pistón, los cuales resultan eficientes, pero, entre otras desventajas, son equipos grandes, pesados y muy ruidosos. Cuentan con muchas piezas que se desgastan por la vibración producida durante su funcionamiento, haciendo que los costos de mantenimiento sean muy altos [6].

Contrariamente, los de tipo no mecánico tienen menos piezas móviles, lo que permite reducir las vibraciones, siendo más seguros y de menor mantenimiento. En estos encontramos los compresores criogénicos, los de hidruro metálico, de adsorción y los electroquímicos.



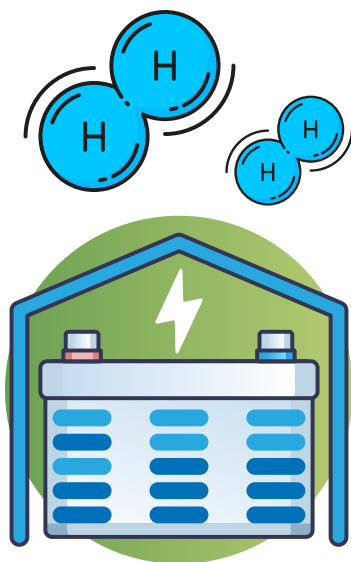


En el método criogénico se usan grandes cantidades de energía para mantener el hidrógeno en estado líquido, por lo que es una vía muy costosa. Los de hidruro metálico son muy costosos por los materiales empleados y, además, son pesados; por su parte, los de adsorción aún tienen una capacidad de almacenamiento muy limitada.

En particular, los compresores electroquímicos sobresalen por la capacidad de comprimir el hidrógeno a altas presiones y al mismo tiempo, purificarlo. Además, su funcionamiento es silencioso, fácil de usar y, lo que es más atractivo, requiere muy poca energía externa para realizar el proceso, la cual puede provenir de fuentes renovables [7].



Funcionamiento de un Compresor Electroquímico de Hidrógeno



Un Compresor Electroquímico de Hidrógeno (CEH), permite comprimir hidrógeno y reducir su volumen con alta eficiencia, brindándole al mismo tiempo mayor pureza. El sistema se basa en dos electrodos o superficies donde ocurren reacciones de oxidación-reducción (un ánodo y un cátodo), un electrolito o conductor de iones, entre ellos (membrana intercambio protónico) y un circuito externo (Figura 5).

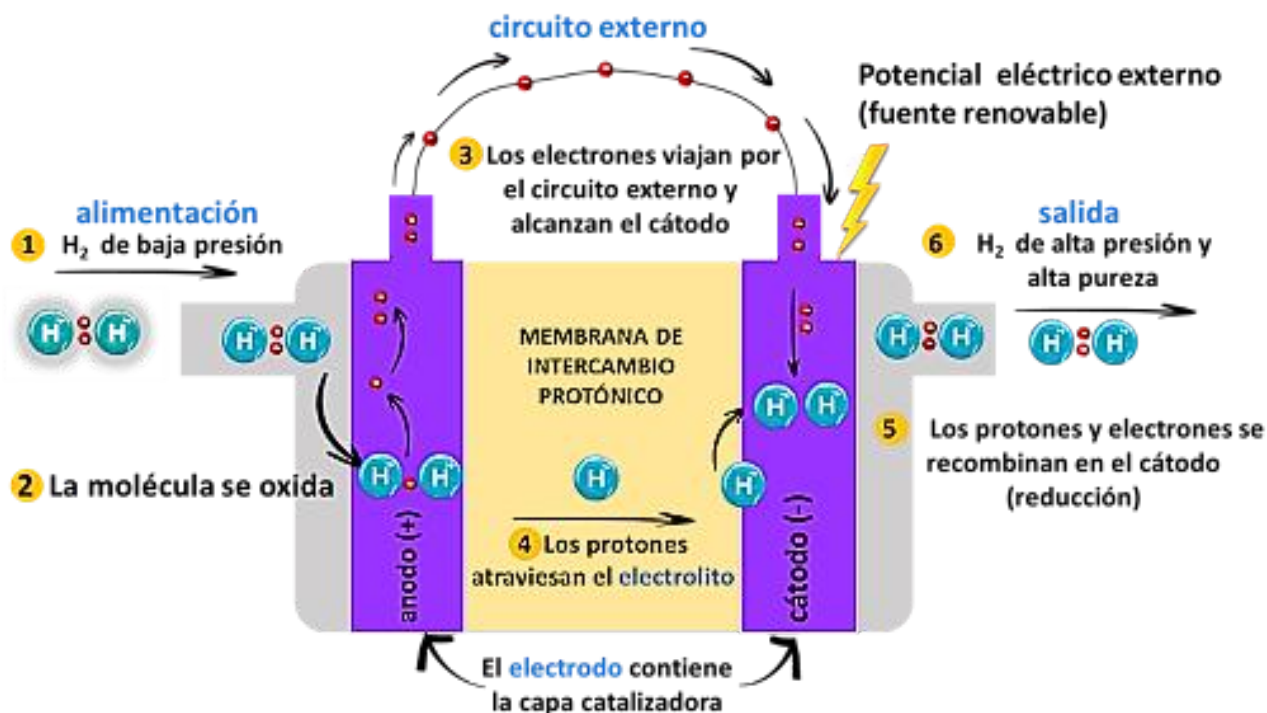
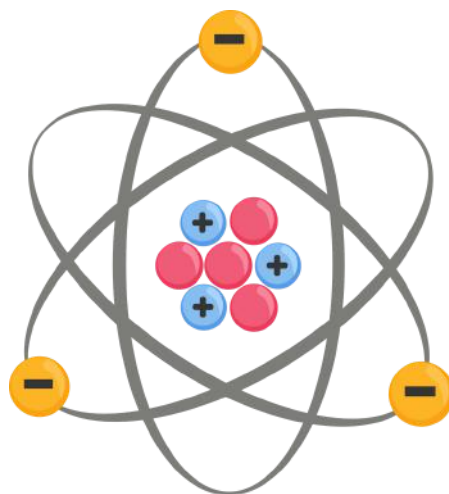
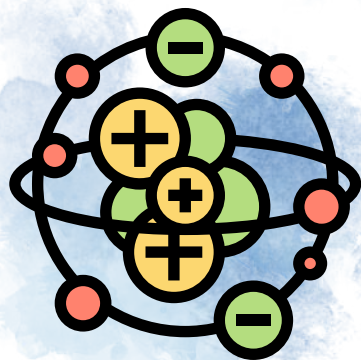


Figura 5. Proceso de compresión del Hidrógeno

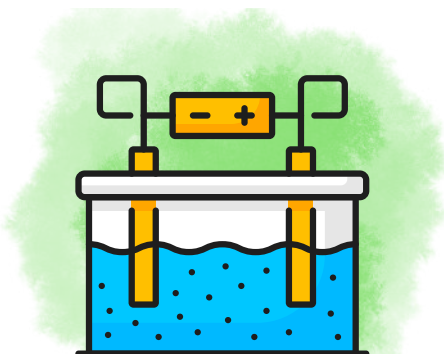
El aumento de presión y la purificación del gas de hidrógeno se logra a través de un proceso en el que intervienen reacciones electroquímicas, y el cual se inicia alimentando el dispositivo con gas de hidrógeno que posee baja presión, cuando la molécula de H_2 tiene contacto con el ánodo y el catalizador empleado, se divide en protones (H^+) y electrones (e^-), esto se conoce como reacción de oxidación.





Entonces, los electrones viajan por un circuito externo, mientras que, los protones migran a través del electrolito hasta llegar al otro electrodo. Protones y electrones se unen en el cátodo (reacción de reducción), para formar nuevamente moléculas de gas H_2 , pero de mayor presión.

Debido a que el electrolito que se emplea solo deja que pasen los protones hacia el cátodo, se puede realizar la purificación, ya que no permite el paso de impurezas (Figura 5) [8].



Los retos actuales del sistema CEH

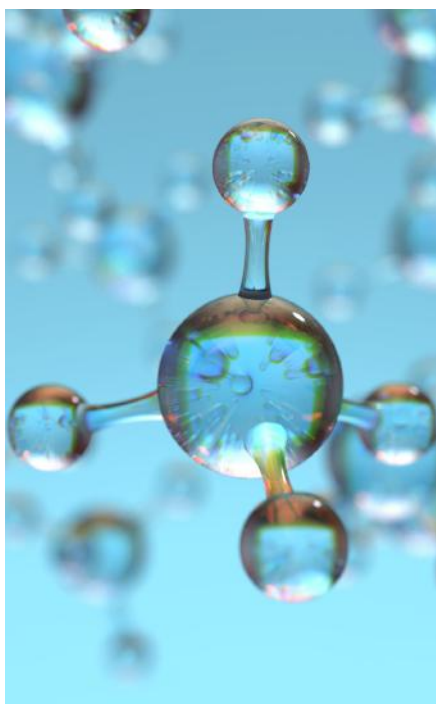
Estos sistemas constan de una serie de partes o componentes con una función específica, todos de importancia y necesarios para un buen funcionamiento. Actualmente, continúa siendo un reto la durabilidad de los componentes, especialmente del Ensamble Membrana-Electrodo, conformado por una membrana central y un electrodo (con la capa catalizadora) a cada lado.





En este componente, es crucial el transporte eficiente de protones, ya que suele presentarse la acumulación de agua y las pérdidas de eficiencia. Es por ello que, la membrana debe tener una alta tolerancia a las impurezas, resistencia a altas temperaturas, baja permeabilidad a los gases y alta resistencia mecánica para la presurización de hidrógeno [1].

Actualmente se realizan investigaciones orientadas a mejorar el desempeño integral del sistema, con la búsqueda de materiales y parámetros operativos óptimos [9].



Por otro lado, el catalizador juega un papel importante en el proceso, ya que participa directamente en las reacciones electroquímicas. Este, define la velocidad de separación y recombinación de las moléculas, así como la velocidad de flujo de los electrones, es decir, de la transformación de los reactivos.

Por mucho tiempo y hasta la fecha, el material más empleado como catalizador para las reacciones de oxido-reducción en estos sistemas es el Platino (Pt), ya que ha mostrado una alta actividad catalítica y estabilidad química al ser empleado para este objetivo.



Desafortunadamente, es un metal muy costoso por su escasez y por las excelentes propiedades que posee, por lo tanto, un sistema con catalizador a base de Pt resulta muy caro, principal razón que limita el desarrollo y comercialización de esta tecnología de forma generalizada.



Nuestro desafío

Para ayudar a mitigar los daños causados al medio ambiente, es fundamental producir energía limpia, por lo tanto, es crucial adoptar y promover el uso extendido de las tecnologías que permitan cumplir con esta labor, como los compresores electroquímicos de hidrógeno.

Una alternativa para lograr este objetivo, consiste en reducir el costo de los CEH sin perder su eficiencia. Por lo cual, es necesario mejorar los materiales, particularmente, el catalizador, ya que, con un material más eficiente se reduce la cantidad de metal necesario.

En este sentido, se realizan múltiples esfuerzos en la optimización de los materiales que se emplean para este fin.



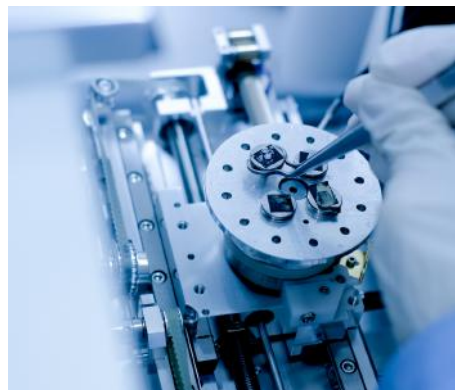


Actualmente, se intenta reemplazar al Pt con materiales de menor costo, sin embargo, todavía queda un largo camino por recorrer en la transición hacia este tipo de catalizadores, e incluso, éste seguirá siendo importante en determinadas aplicaciones. Afortunadamente, contamos con un gran aliado para alcanzar nuestro objetivo: la nanotecnología.

La producción de materiales a escala nanométrica, mejor conocidos como nanomateriales, representan la oportunidad de innovar y desarrollar alternativas más eficientes, entre las que han destacado los aerogeles.

Estos, son nanomateriales de alto potencial en el campo de los catalizadores, por ser muy ligeros y fuertes, además, tienen una gran porosidad y por su escala, otorgan una gran área superficial; características necesarias para un excelente desempeño electrocatalítico.

Es por esto, que, actualmente, es un campo de gran interés y se considera una opción muy prometedora para las tecnologías que contribuyen al mejoramiento de las condiciones del medio ambiente. 



**"Cada Pequeña Cosa Que Haces Realmente Importa Al Mundo,
y Ayuda a Construir El Mundo En El Que Quieres Vivir"**

Wangari Maathai



Agradecimientos

Al Proyecto Cátedras-CONACYT No. 746, y al proyecto Ciencia de Frontera 2023 No. CF-2023-G-567

GRACIAS

Para Consulta

-  Durmus GNB, Colpan CO, Devrim Y. 2021. A review on the development of the electrochemical hydrogen compressors. *Journal of Power Sources* 494: 229743. [\[Link\]](#)
-  Aziz M, Aryal UR, Prasad AK. 2022. Optimization of electrochemical hydrogen compression through computational modeling. *International Journal of Hydrogen Energy* 47(78): 33195–33208. [\[Link\]](#)
-  Aykut Y, Yurtcan AB. 2023. The role of the EHC system in the transition to a sustainable energy future: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(60): 23089–23109. [\[Link\]](#)
-  Hassan Q, Algburi S, Sameen AZ, *et al.* 2024. Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Hydrogen Energy* 50: 310–333. [\[Link\]](#)
-  Dawood F, Anda M, Shafiullah, GM. 2020. Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy* 45(7): 3847–3869. [\[Link\]](#)
-  Pineda-Delgado JL, Menchaca-Rivera JA, Pérez-Robles JF, *et al.* 2022. Energetic evaluations of an electrochemical hydrogen compressor. *Journal of Energy Storage* 55: 105675. [\[Link\]](#)
-  Aykut Y, Akay RG, Bayrakçeken YA. 2024. Compression performance of an electrochemical hydrogen compressor at low and high temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy* 75: 222–228. [\[Link\]](#)
-  Vermaak L, Neomagus HWJP, Bessarabov DG. 2021. Recent Advances in Membrane-Based Electrochemical Hydrogen Separation: A Review. *Membranes* 11(2): 127. [\[Link\]](#)
-  Marciuš D, Kovač A, Firak M. 2022. Electrochemical hydrogen compressor: Recent progress and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy* 47(57): 24179–24193. [\[Link\]](#)



Crédito de imágenes en orden de aparición: MF3d (Getty Images Signature, GIS), Oleksandr Zozulinskyi, Just_Super (GIS), Thinking How, Priscila Patrício, Adam88xx (Getty Images, GI), Eucalyp, Mohhative, ismagilov (GI), VanderWolf-Images (GI), deemakdaksina, KHUNKORN, peterschreiber.media (GI), Tanankorn Pilog (GI), audioundwerbung (GI), Vectortradition, liza sigareva (Pexels, P), bronswerk (GIS), Scharfsinn86 (GI), Josfor (GI), lexiclausvectors, OpenClipart-Vectors (Pixabay, Px), irasutoya (いらすとや), ZayamiArt, Marcus Millo (GI), Sharath G. (P), Engin_Akyurt (Px), Juan Roballo, Олександр К (P), INORTON, PenSmasher, Dee Angelo, VectorMine, Scharfsinn86 (GI), Scharfsinn86 (GI), jentevaart, Vectortradition, Scharfsinn86 (GI), vanitjan, Aflo, photobank kiev (GI), Wirestock (GI), Sunny Studio, Salang889, Juan Ramon Roballo's, AnuchaCheechang (GI), vectorwin, otomedream, amethyststudio. Crédito de figuras: Proporcionada por los autores. Los autores declaran que ningún párrafo ha sido generado completamente o con más del 50% de sus palabras con herramientas AI.

Dra. Beatriz Escobar Morales

Editor Asociado Revista CyN

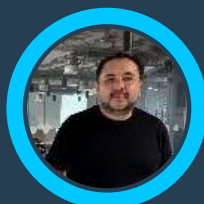
Diseño de publicación: Erika Nejapa



Mayra Polett Gurrola

Doctora en Electroquímica Investigadora por México adscrita al TecNM Campus Chetumal. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel II desde 2025. Líder del Laboratorio Nacional de Micro y Nanofluídica (LABMyN-sede TecNM/ITChetumal).

contacto: mayra.pg@chetumal.tecnm.mx



Luis Gerardo Arriaga Hurtado

Doctor en Ciencias Químicas por la UNAM y posdoctorado en la Universite de Poitiers, Francia (2005). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel III desde 2020. Líder del Laboratorio Nacional de Micro y Nanofluídica (LABMyN).

contacto: lg.arriaga@tec.mx



Janet Ledesma García

Doctora en Electroquímica por CIDETEQ. Actualmente coordina la línea terminal en Nanotecnología de la Maestría en Ciencias de la Facultad de Ingeniería y es responsable del Cuerpo Académico Consolidado de Catálisis. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel II, líder del Laboratorio Nacional de Micro y Nanofluídica sede UAQ.

contacto: janet.ledesma@uaq.mx



Gloria Elena Marín Sansores

Estudiante de Doctorado en Ciencias Ambientales en el Tecnológico Nacional de México, Campus Chetumal. Enfoca su tesis en el desarrollo de electrocatalizadores nanoestructurados a base de Pt para su aplicación en sistemas de Compresión Electroquímica de Hidrógeno.

contacto: D96390061@chetumal.tecnm.mx