

Experimentación con Hidrógeno Verde en la Generación de Energía Eléctrica

Ruth García Vallejo¹, Xiomara González Ramírez¹, Iván Abel Hernández Robles¹

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato

r.garciavallejo@ugto.mx, x.gonzalez@ugto.mx

Resumen

En la generación de electricidad, las fuentes renovables de energía tienen un gran impacto en el medio ambiente y en la calidad de vida de las personas. El consumo de energía mediante los combustibles fósiles es una de las principales causas de los gases contaminantes emitidos hacia la atmósfera, por esta razón hoy en día se busca desarrollar e investigar todo tipo de fuentes renovables que nos ayuden a disminuir la contaminación.

Actualmente, el Hidrógeno Verde es visto como una importante fuente de energía limpia, ya que resulta crucial en los esfuerzos mundiales de descarbonización dado que no libera emisiones de carbono. Para producir Hidrógeno Verde es necesario un procedimiento químico, y este se logra a través de un proceso de electrólisis que emplea la electricidad producida por fuentes renovables. De esta manera, se puede iniciar con la descomposición de las moléculas de agua (H_2O) en óxidos, (O_2) e hidrógeno (H_2).

El Hidrógeno Verde es crucial para disminuir los gases de efecto invernadero, dado que se propone como un impulsor energético en la batalla contra el cambio climático. Además, se proyecta que el hidrógeno y los combustibles basados en hidrógeno alcancen el 10% de la demanda total de energía a escala global para el año 2050 (IEA, 2021).

El objetivo principal de este proyecto, a través de diferentes fuentes de consulta, es examinar las distintas tecnologías renovables a escala global en las que se emplea el Hidrógeno Verde, además de conocer las variables en la producción de Hidrógeno Verde con el objetivo de producir energía eléctrica, a partir de experimentación básica.

Palabras clave: Hidrógeno Verde, energías renovables, electrólisis, vector energético, generación eléctrica.

Marco Teórico

El Hidrógeno es el primer elemento de la Tabla Periódica; es químicamente el más simple, el más abundante del Universo, y uno de gran interés en los últimos tiempos debido a su potencial como vector energético. El hidrógeno no se encuentra en un estado libre en la Tierra, en el aire o en las minas, es una sustancia que debe obtenerse separándola de compuestos como hidrocarburos o agua. En la Figura 1 se ilustra una representación simbólica de algunas de sus propiedades químicas.

Las principales propiedades químicas del hidrógeno son las siguientes (Rodríguez, 2024):

- Su átomo está formado por un protón y un electrón.
- Su configuración electrónica es $1s^1$.
- Su masa atómica es de 1.00797 g/mol.
- Su densidad en estado gaseoso es de 0.08988 kg/m^3 .
- Su densidad en estado líquido es de 70.8 kg/m^3 .
- Su punto de ebullición se encuentra en los -252.7°C .
- Su punto de fusión se encuentra en los -259.2°C .
- Su estado de oxidación es: +1.
- Su densidad energética es: 120 kJ/g.
- Límite de inflamabilidad en aire es: 4-75%

Número atómico	1	1.00797	Peso atómico
Punto de ebullición °C	-252.7	1	Valencia
Punto de fusión °C	-259.7	H	Símbolo
Densidad	0.017	1s ¹	Estructura atómica
		Hidrógeno	Nombre

Figura 1. Propiedades químicas del Hidrógeno (Merlan M., 2022).

En los últimos años, el hidrógeno ha generado un gran interés como una fuente de energía alternativa y limpia, ya que al combinarse con oxígeno en una celda de combustible produce energía eléctrica y vapor de agua como únicos subproductos.

El hidrógeno es el elemento más liviano y abundante en el universo, y tiene un enorme potencial para transformar la industria energética. Países como Alemania, Chile, China y Estados Unidos están explorando su uso como alternativa a los combustibles fósiles. En México, aunque existen posibilidades para su aprovechamiento, el desarrollo en esta área avanza de manera lenta (Rodríguez, 2024).

El Hidrógeno Verde además se ha emergido como una de las soluciones más prometedoras para la descarbonización de la matriz energética global. A diferencia del hidrógeno gris y azul, el hidrógeno verde se produce mediante electrólisis del agua, utilizando electricidad generada exclusivamente a partir de fuentes renovables como la energía solar y eólica. Este proceso no genera emisiones de dióxido de carbono, lo que lo convierte en una alternativa sostenible para la generación de energía eléctrica y un elemento clave en la transición hacia economías bajas en carbono.

Tipos de Hidrógeno

En la actualidad, contamos con diversos métodos para producir hidrógeno empleando las diversas fuentes de energía primaria. De acuerdo con el proceso y las emisiones que se generen el hidrógeno se puede clasificar por colores (Asociación Española del Hidrógeno [AEH], 2022):

- ✓ **Hidrógeno Negro/Marrón:** El más contaminante de todos es el Hidrógeno Negro o Marrón, aquel que se produce con carbón bituminoso o lignito, respectivamente, a través de un proceso conocido como gasificación donde se quema el carbón a temperaturas muy elevadas y la combustión libera por un lado dihidrógeno y por otro monóxido de carbono.
- ✓ **Hidrógeno Gris:** Normalmente es el que se produce mediante fuentes de energía de origen fósil (gas natural, petróleo, carbón, etc.) con emisiones contaminantes asociadas. El método de producción es el reformado con vapor del gas natural y la gasificación de carbón.
- ✓ **Hidrógeno Azul:** Se produce a partir de fuentes de energía fósil, sin embargo, este tipo de hidrógeno emite una menor cantidad de contaminantes.
- ✓ **Hidrógeno Turquesa:** Este tipo de hidrógeno es producido a partir de fuentes de energía fósil, sin emisiones contaminantes asociadas. Sería el caso de la pirólisis del gas natural que produce hidrógeno y carbono sólido y de esta manera evitar emisiones de CO₂.
- ✓ **Hidrógeno Rosa:** se produce mediante la electrólisis de agua, pero la electricidad utilizada para generarlo proviene de energía nuclear.

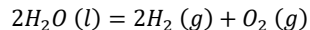
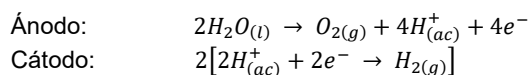
- ✓ **Hidrógeno Verde:** Este tipo de hidrógeno es producido a partir de las fuentes de energía renovables. El método de producción es mediante la electrólisis del agua, sin embargo, existen más métodos de producción de hidrógeno renovable como el reformado con vapor de biogases, bioalcoholes o residuos orgánicos, la foto electrocatálisis, la termólisis del agua, la producción por microorganismos.
- ✓ **Hidrógeno Amarillo:** Es aquel que se obtiene mediante la electrólisis, en este caso se usa energía proveniente de energía solar, aunque también puede hacer referencia al hidrógeno producido a partir de fuentes mixtas.

Métodos de producción de Hidrógeno Verde

✓ **Electrólisis**

La electrólisis del agua es la descomposición del agua (H_2O) en sus componentes básicos, hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2), la cual consiste en hacer circular corriente eléctrica, obtenida por medio de fuentes renovables o bajas en carbono, a través del agua para así separarla en hidrógeno y oxígeno. Este proceso no genera residuos ni emisiones de Dióxido de Carbono. El agua es una fuente completa para producir hidrógeno y el único subproducto liberado durante el proceso es el oxígeno.

A pesar de que la separación de la molécula de agua por medio de la electrólisis se ha utilizado durante décadas, este uso ha sido limitado a unidades pequeñas. La electrólisis no ha sido empleada en grandes plantas debido, principalmente a su baja eficiencia comparada con el reformado de vapor. Las reacciones correspondientes a la electrólisis del agua son (Chang & College, 2002):



✓ **Reformado de vapor de biometano**

El proceso de reformado con vapor es una técnica para adquirir hidrógeno a partir de hidrocarburos, especialmente el gas natural. Este procedimiento demanda una considerable cantidad de energía para llevar a cabo el reformado y, para ciertos combustibles, es necesario eliminar los contenidos de azufre y otras impurezas. Este procedimiento implica la exposición al gas natural, con gran cantidad de metano, con vapor de agua a elevadas temperaturas y presión moderada. Se generan a partir de la reacción química entre hidrógeno y dióxido de carbono, y dependiendo de la mezcla reformada, también monóxido de carbono (Mitner, 2021).

✓ **Gasificación de biomasa**

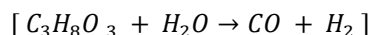
La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico que convierte materiales orgánicos en un gas combustible llamado syngas, el cual puede ser utilizado para la producción de Hidrógeno Verde. Este método se presenta como una alternativa sostenible para la generación de hidrógeno, ya que aprovecha residuos agrícolas, forestales y urbanos, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles (Primo, 1996).

El proceso de gasificación se lleva a cabo en un reactor a altas temperaturas (superiores a 700°C) en presencia de un agente gasificado, como oxígeno o vapor de agua. La biomasa se descompone en sus componentes básicos, generando una mezcla de gases que incluye hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2) (Primo, 1996).

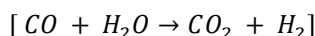
✓ **Piro-reformado de glicerina de origen renovable**

La glicerina es un subproducto de la producción de biodiesel, lo que la convierte en una fuente sostenible para la generación de hidrógeno sin depender de combustibles fósiles.

El proceso se basa en la descomposición térmica de la glicerina en presencia de vapor y un catalizador, generalmente níquel sobre alúmina, a temperaturas superiores a 600°C. La reacción química principal es (Barbelli *et al.*, 2011):



Posteriormente, el monóxido de carbono (CO) se somete a una reacción adicional con vapor de agua para producir más hidrógeno y dióxido de carbono:



Aplicaciones del Hidrógeno Verde

El hidrógeno se utiliza ampliamente hoy en día en la refinación, la industria química (como materia prima), la industria del acero (como agente reductor) y para aplicaciones especiales en otras industrias. La evolución del uso de hidrógeno en estas aplicaciones estará determinada por la dinámica del mercado en estos sectores (IEA, 2023).

✓ Generación de electricidad

Hoy en día, la utilización del hidrógeno como combustible en el sector eléctrico es prácticamente nula, con una contribución de menos del 0.2% en la generación mundial de electricidad (y la mayoría no se deriva de hidrógeno puro, sino de combinaciones de gases con hidrógeno de la fabricación de acero, refinerías o plantas petroquímicas).

Las tecnologías que emplean hidrógeno puro para producir electricidad ya se encuentran en el mercado, incluyendo algunos modelos de baterías de combustible, motores de combustión interna y turbinas de gas que pueden trabajar con gases con alto contenido de hidrógeno o incluso con hidrógeno puro. La utilización de hidrógeno como amoníaco podría representar otra alternativa para producir electricidad. El éxito de pruebas en Japón y China ha evidenciado la co-combustión de amoníaco en las plantas de carbón. Adicionalmente, el amoníaco tiene la capacidad de transformarse en un combustible para las turbinas de gas. La utilización completa de amoníaco se llevó a cabo con éxito en una turbina de gas de 2 MW en Japón en 2022, y actualmente se están desarrollando esfuerzos para crear una turbina de 40 MW que funcione con amoníaco puro (IEA, 2023).

Si bien la utilización de hidrógeno y amoníaco puede disminuir las emisiones de CO₂ en la producción de electricidad, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) continúan siendo un desafío. Respecto a las emisiones de NOx originadas por el amoníaco, hay tecnologías para el tratamiento de gases residuales, como la reducción catalítica selectiva, que ya están en uso en las plantas de minerales.

✓ Transporte

Otro de los ámbitos donde los gases renovables, especialmente el hidrógeno verde, van a tener un papel crucial, es el de la movilidad. Hoy en día, existen numerosos proyectos enfocados en el desarrollo de vehículos de cualquier tipo alimentados por hidrógeno: aviación, vehículos eléctricos de baterías, ferrocarriles y transporte por mar. El uso de gases renovables en la movilidad facilitará la descarbonización de uno de los sectores que más emite emisiones de CO₂ y que tiene un mayor impacto en la calidad del aire de nuestras urbes. Sin embargo, su aplicación trasciende los vehículos de tamaño reducido, puesto que será crucial para la descarbonización del transporte pesado, como el ferroviario y marítimo, sectores donde la electrificación no representa, en la actualidad, una alternativa técnicamente viable.

✓ Refinería

Las refinerías de petróleo emplean hidrógeno para elaborar combustibles con menor contenido de azufre con el fin de disminuir la polución ambiental, sin embargo, la mayoría de los complejos de refinación emplean gas natural para su producción. Este procedimiento genera dióxido de carbono como resultado del gas de efecto invernadero, mientras que el hidrógeno verde, generado a través de electrólisis con tecnología renovable, está exento de emisiones.

Uno de los principales usos del hidrógeno verde en este sector es como sustituto de combustibles e hidrógeno de origen fósil en diversos procesos realizados actualmente en las refinerías y plantas petroquímicas.

✓ Industria

El hidrógeno se utiliza para generar calor y energía en áreas industriales. Su combustión produce temperaturas elevadas, lo que es beneficioso en procesos como la fabricación de acero. Así, la industria metalúrgica puede obtener beneficios de su empleo como un agente reductor en la producción de metales. Este empleo del hidrógeno no solo incrementa la eficacia de los procesos, sino que también ayuda a disminuir las emisiones, fomentando un ambiente industrial más sustentable.

De las 53 Mt de hidrógeno utilizadas en la industria en 2022, aproximadamente el 60% se destinó a la producción de amoníaco, el 30% a la producción de metanol y el 10% a la reducción directa del hierro (DRI) en el subsector del hierro y el acero. Prácticamente todo el hidrógeno utilizado en la industria se produce a partir de combustibles fósiles sin mitigación, en las mismas instalaciones donde se consume. La captura de carbono es una práctica común en algunos subsectores industriales, aunque la mayor parte de las 140 Mt de CO_2 capturadas se utilizan en otras aplicaciones industriales (como la producción de urea) y terminan siendo liberadas, con solo unos pocos proyectos dedicados al almacenamiento subterráneo de CO_2 .

Actualmente el Hidrógeno Verde tiene una amplia variedad de aplicaciones a futuras, reemplazando así los combustibles y de este modo ayudar a mitigar los gases de efecto invernadero. Sin embargo, el costo de producción de Hidrógeno Verde no es muy rentable hoy en día, pero se planea que para 2050 el costo de este sea un costo cercano al producir Hidrógeno Gris.

La Figura 2, representa de forma clara y visual el ciclo completo de la economía del hidrógeno, destacando su papel estratégico en la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible. En ella se ilustran las principales etapas del proceso: la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables como la energía solar y eólica mediante electrólisis del agua; su almacenamiento y distribución a través de infraestructuras especializadas; y sus diversas aplicaciones en sectores como el transporte, la industria y la generación eléctrica. Además, la imagen enfatiza los beneficios ambientales del hidrógeno como vector energético, subrayando su capacidad para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y sustituir progresivamente a los combustibles fósiles en múltiples áreas de la economía.

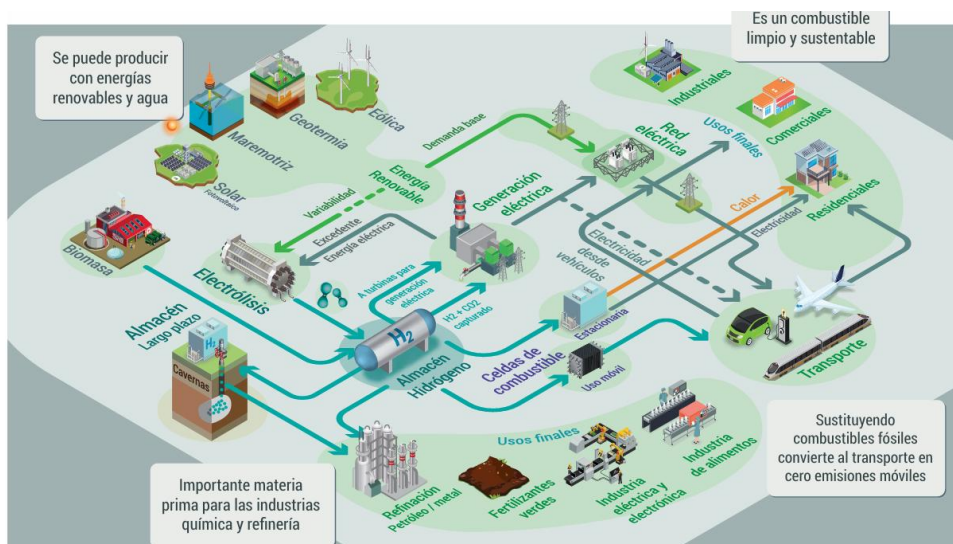


Figura 2. Economía del Hidrógeno y su importancia en el sistema energético del futuro (Orduña, 2024).

Tabla 1. Comparativa de producción y obtención de Hidrógeno de acuerdo con la eficiencia.

Revista de descontaminación industrial, recursos energéticos y sustentabilidad. (Troncoso, 2021)	La electrólisis tiene una eficiencia de conversión eléctrica (kWh a kg de H ₂) que va entre un 60% y 70%, lo que se traduce en un consumo aproximado de 50 a 60 kWh de energía eléctrica para producir 1 kg de H ₂
Alianza Energética (HINICIO, 2021)	En el sistema eléctrico nacional, el almacenamiento de energía con Hidrógeno Verde podría permitir un aumento en la generación de energía renovable del 2% para 2050, y CFE podría alimentar 670 MW de plantas de energía térmica utilizando Hidrógeno Verde en una cantidad comparable con la demanda total de hidrógeno de PEMEX en 2018. Una mezcla de gas natural con hidrógeno podría inyectarse en la red de gas natural pero limitada a pequeñas cantidades en regiones específicas del país con buenos recursos renovables y un fuerte incentivo de descarbonización dada su baja competitividad económica, representando menos de 460 MW de electrólisis en 2050.
Energía Estratégica (Nieto, 2021)	Para poder convertir en electricidad el hidrógeno, debido a que las celdas de combustible tienen una eficiencia del 60% o menos se necesitan entre 55,5 y 66,6 kWh de hidrógeno, para generar 33,3 kWh de electricidad.
Revista Técnica de Medio Ambiente (Ruiz, 2022).	En un estudio que fue realizado por Gül y Akyüz de la Universidad de Balikesir (Turquía) en 2020, se obtuvieron 4,5 kg de hidrógeno al año utilizando dos placas fotovoltaicas de 0,2 kW de potencia cada una. A lo largo del año la energía eléctrica producida por las placas fue de 557 kWh, bastante menor que la energía posible si las placas hubiesen funcionado con 0,2 kW, 6 horas al día 365 días al año. Los 4,5 kg de H ₂ servirían para producir 150 kWh de energía. El rendimiento en el laboratorio es así del 27 %, más o menos la mitad del rendimiento teórico.
esenergia.es Ruiz (2024)	Un ejemplo de producir Hidrógeno Verde a partir de energía fotovoltaica lo encontramos en la empresa española de ingeniería Anasol. El pasado 2023 ha culminado la construcción de 12 nuevos proyectos enfocados en energía fotovoltaica para producir Hidrógeno Verde. Los proyectos fotovoltaicos, que aportan una capacidad instalada de 114,3 MWp y una producción anual aproximada de 191.570 MWh. Estos proyectos de electrólisis suman una capacidad de 350 MW y generan alrededor de 45.000 toneladas de hidrógeno verde anualmente.
Transición energética (Orduña, 2024).	El proceso completo, que implica generar electricidad renovable, convertirla en hidrógeno mediante electrólisis, y posteriormente reconvertir el hidrógeno en electricidad mediante pilas de combustible, resulta en pérdidas energéticas considerables. De hecho, aproximadamente un 30-40% de la energía inicial se pierde en la electrólisis, y en el proceso de reconversión de hidrógeno a electricidad se pierde otro 40-50%, dejando una eficiencia neta que puede ser tan baja como el 30% del total de energía utilizada.

Aprovechamiento del Hidrógeno Verde en México

Hasta ahora, en México no se ha producido Hidrógeno Verde. Sin embargo, se anticipa que a finales de este año se consigan las primeras moléculas de proyectos de pequeña escala y para este año 2025, se alcancen proyectos de gran magnitud. La GIZ (Agencia Alemana de Cooperación Internacional) ha calculado que gracias a la abundancia de energía renovable tanto solar como eólica en el país, se pueden poner en marcha hasta 22 Tera vatios de electrólisis, generando aproximadamente 1,400 millones de toneladas de hidrógeno verde. La Agencia Alemana ha afirmado que México se situaría como el segundo exportador con mayor competencia a mercados asiáticos y el tercero a mercados europeos, gracias a su coste reducido de producción de hidrógeno verde.

La compañía H2V2 México sostiene que el Hidrógeno Verde también promovería la innovación, generaría más de 3 millones de puestos de trabajo, robustecería la seguridad energética y atraería inversiones de más de 60,000 millones de dólares.

En México todavía no hay una política pública enfocada en el Hidrógeno Verde, sin embargo, hay iniciativas del sector privado. En 2022, la Asociación Mexicana del Hidrógeno presentó un análisis y una Hoja de Ruta para fomentar este sector (Orduña, 2024). En la actualidad, la Asociación Mexicana de Hidrógeno ha registrado 16 iniciativas en distintas fases de desarrollo, todas motivadas por la urgencia de disminuir las emisiones de carbono y progresar hacia una matriz energética más ecológica como se muestra en la Fig. 2.

Estas iniciativas se centran en el uso del Hidrógeno Verde, con la finalidad de establecer instalaciones de producción e implementar tácticas de hidrógeno en diversas industrias y regiones del país. Actualmente, el país está explorando su implementación en diversas industrias, incluyendo la refinación de petróleo, la producción de fertilizantes y la generación de energía eléctrica (Barbelli *et al.*, 2011).

En la Tabla 2 se presentan diversos proyectos con un gran potencial que actualmente se encuentran en fase de estudio de factibilidad. Además de estos estudios, también se han identificado múltiples iniciativas relacionadas con el desarrollo y aprovechamiento del Hidrógeno Verde en diferentes estados de México. Estas propuestas buscan impulsar la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables y su implementación en distintos sectores estratégicos de la economía.

Tabla 2. *Propuestas en México para la producción de Hidrógeno.*

Estado	Proyecto	Objetivos
Baja California Sur	Power to Power, ELC I	Instalación de capacidad solar de 152 MW. Inversión de US\$330 millones.
Baja California Norte	Hidrógeno la Rumorosa (NH ₃)	Producción de 288 toneladas de Hidrógeno Verde al año. Instalación de capacidad de 3MW con energía solar y eólica. Inversión de US\$35 millones.
Sonora	Amoniaco Verde	Producción de 600.000 toneladas de amoníaco Verde.
Sinaloa	Hidrógeno Verde	Producción de 41.485 toneladas de Hidrógeno Verde al año. Instalación de capacidad solar de 921 MW. Inversión de US\$1.172 millones.
	Metanol (Pacífico Mexinol)	300.000 toneladas de metanol verde y 1800.000 toneladas de metanol azul por año. Inversión de US\$2.2000 millones.
Durango	Amoniaco Verde	Producción de 600.000 toneladas de amoníaco Verde.
Michoacán	Hidrógeno Verde	Producción de Hidrógeno Verde.
Guanajuato	Blending	Producción de 12.600 toneladas de Hidrógeno Verde. Inversión de US\$1.250 millones.
San Luis Potosí	Hidrógeno Verde	Producción 18.263 toneladas de Hidrógeno Verde al año. Instalación de capacidad solar de 165 MW. Inversión de US\$194 millones.
Nuevo León	Hidrógeno Verde	Producción 124.071 toneladas de Hidrógeno Verde al año. Instalación de capacidad solar de 2.863 MW. Inversión de US\$2.572 millones.
	Proyecto Cementera	Utilización de Hidrógeno Verde en plantas cementeras.
Tamaulipas	Tratamiento de aguas residuales (municipio de Reynosa)	Producción de Hidrógeno Verde.
México (Ciudad de México)	Proyecto Cementera	Inyección de Hidrógeno Verde en hornos de plantas de cementero.
	Hidrógeno Verde (PEMEX)	Sustitución de Hidrógeno Gris por Hidrógeno Verde en procesos de refinación.
	Blending (CFE)	Inclusión del H ₂ en el Sistema Eléctrico Nacional.
	Celdas de Combustible (Gerencell y CFE)	Inversión de US\$10.5 millones para celdas de combustible de Hidrógeno.
Yucatán	Peninsular I, II y III	Producción de Hidrógeno Verde.
Oaxaca	Hidrógeno Verde	Inversión de US\$10.000 millones.
Campeche	Amoniaco Verde	Producción de 170.000 toneladas de Amoniaco Verde al año. Inversión de US\$1.100 millones.

Uno de los principales objetivos de estos proyectos es la construcción de plantas especializadas para la generación de Hidrógeno Verde, lo que permitiría reducir la dependencia de combustibles fósiles y avanzar hacia una matriz energética más sostenible. Estas instalaciones estarían diseñadas para aprovechar tecnologías como la electrólisis del agua con energía solar y eólica, lo que contribuiría significativamente a la descarbonización de procesos industriales y la generación de electricidad limpia.

Asimismo, se está explorando la incorporación del Hidrógeno Verde en diversas industrias clave, incluyendo el sector manufacturero, la producción de acero, el transporte y la generación de energía. La implementación de estrategias de hidrógeno en estos ámbitos permitiría optimizar los procesos productivos, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecer la transición energética del país.

A medida que avanzan los estudios de viabilidad, también se están analizando aspectos relacionados con el almacenamiento y distribución del Hidrógeno Verde, ya que estos factores representan algunos de los principales desafíos para su adopción masiva. Se están evaluando soluciones innovadoras como la creación de infraestructuras de transporte y almacenamiento a gran escala, así como el uso de tecnologías avanzadas que mejoren la eficiencia en su manejo.

Con estos proyectos e iniciativas, México busca posicionarse como un líder en el desarrollo del Hidrógeno Verde a nivel regional, promoviendo un modelo energético más limpio y sustentable que impulse el crecimiento industrial y económico del país.

Experimentación

La electrólisis es actualmente uno de los métodos más utilizados para producir Hidrógeno Verde, dado que permite separar el hidrógeno del agua de manera eficiente y sin generar contaminantes. Este procedimiento, basado en la aplicación de energía eléctrica para dividir las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno, se ha consolidado como una opción sostenible para obtener este elemento en su forma más pura.

A continuación, se implementó un experimento en el laboratorio de CEMER para realizar la separación de hidrógeno y oxígeno usando como método de producción la electrólisis.

Electrólisis haciendo uso de agua destilada con bicarbonato de sodio

En este experimento, se usaron los siguientes materiales:

- Fuente de CD.
- Celda de Combustible.
- Dispositivo experimental de electrólisis de agua.
- Equipo de prueba de demostrador físico.
- Agua potable.
- Bicarbonato de sodio.
- Tubo de plástico.

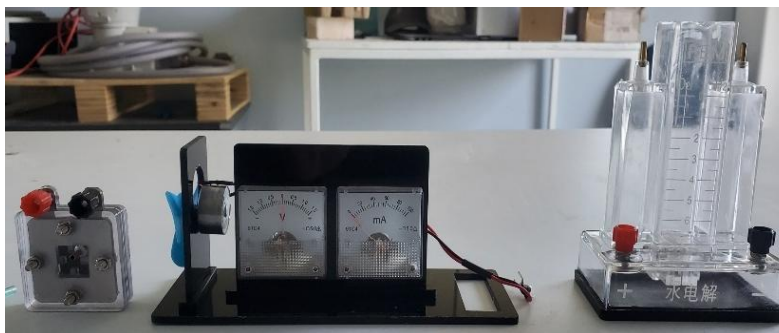


Figura 3. Elementos para el proceso de electrólisis.

El objetivo de este experimento es realizar la separación de hidrógeno y oxígeno, y de este modo captar el hidrógeno en la celda de combustible, la cual nos ayudará a convertir el hidrógeno en energía eléctrica utilizando solamente agua, observando de esta manera cuánta potencia de entrada y salida se obtienen.

Procedimiento

A partir de la fuente de CD con un voltaje de entrada de 2.5 V con una corriente de 0.3 A, se conectó al dispositivo experimental para que comenzara con la reacción de separación de moléculas de hidrógeno y oxígeno al estar inyectándole corriente eléctrica.

Del lado positivo del electrolizador se liberará el oxígeno y del lado negativo se liberará el hidrógeno, en donde en el lado positivo del electrolizador se conectó el tubo de plástico en donde fluirían las moléculas de hidrógeno para llegar a la celda de combustible y que está finalmente la convierte en electricidad para accionar el motor con la potencia obtenida en la salida.

Para realizar la solución de agua destilada con bicarbonato de sodio se agregaron las siguientes cantidades:

Por cada 100 g de bicarbonato de sodio se requieren 100 ml de agua, en este caso, para las soluciones se aplicó la regla de 3 para las cantidades molares.

Por ejemplo, para la cantidad de 0.5 molar, se calculó de la siguiente manera para calcular la cantidad de bicarbonato a 100 ml, ver Ec. (1):

$$\frac{\text{Cantidad molar (1er solución)} * \text{Cantidad de bicarbonato}}{\text{Cantidad molar (2da solución)}} = \frac{0.5 \text{ molar} (0.84 \text{ g})}{0.1 \text{ molar}} = 4.2 \text{ g} \quad (1)$$

Tabla 3. Medida de las cantidades a agregar para las soluciones.

Cantidad molar	Cantidad de bicarbonato	Cantidad de agua
0.1 molar	0.84g	100ml
0.5 molar	4.20g	100ml

Para la correcta implementación y conexión de nuestro dispositivo *electrolizador* se debe conectar primero nuestra *fuentes de CD* con el *electrolizador*, de tal manera que al fluir la corriente se genere el proceso de separación de moléculas, después conectaremos un tubo del lado positivo del *electrolizador* debido a que se estará liberando hidrógeno por el ánodo y este tubo irá conectado directamente a la *celda de combustible* donde se estará almacenando y convirtiendo el hidrógeno en energía. A partir de las terminales de la *celda de combustible* se conectarán al *medidor de voltaje y corriente* y al ver que si se estará generando energía se accionará un motor el cual comenzará a girar.

A continuación, se muestran las imágenes de los materiales y el orden en cómo deben de ir conectados uno del otro.

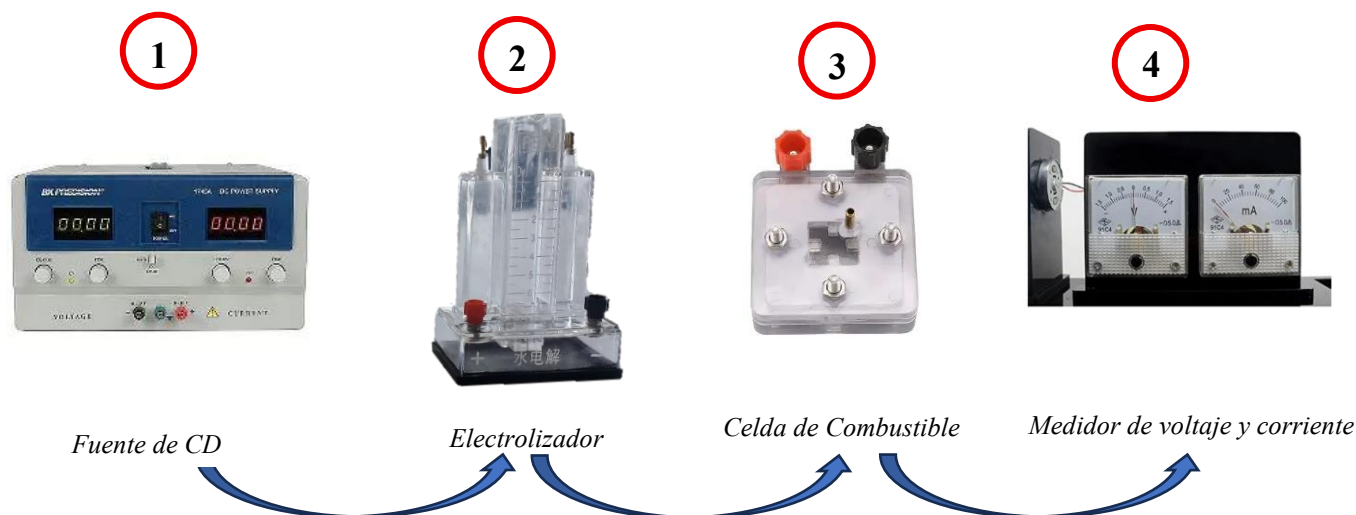


Figura 4. Equipos y materiales para el proceso de electrólisis.

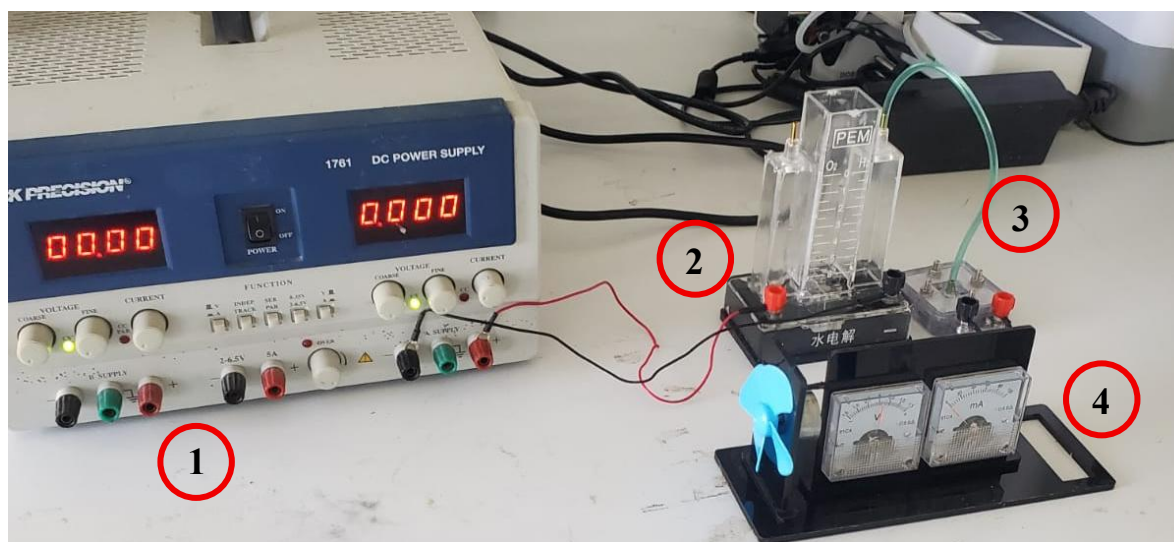


Figura 5. Conexión del equipo para el proceso de electrólisis.

Resultados

El proceso de electrólisis, en teoría, permite la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de una corriente eléctrica. Sin embargo, en la práctica, este proceso conlleva diversas pérdidas energéticas, tanto térmicas como electroquímicas, que afectan directamente la eficiencia global del sistema. En el caso del modelo utilizado, estas pérdidas parecen ser más pronunciadas, lo que sugiere que el diseño del electrolizador no es óptimo para maximizar la conversión energética. En la Tabla 3 se muestra la comparación de la potencia de entrada con la potencia de salida.

Tabla 3. Comparación de la potencia de entrada con la potencia de salida.

		Voltaje	Corriente	Potencia
1era Solución (0.1 molar)	Entrada	2.5 V	0.3 A	0.75 W
	Salida	0.5 V	10mA	5mW
2da Solución (0.5 molar)	Entrada	2.5V	0.6A	1.5W
	Salida	0.5V	20mA	10mW

$$Eficiencia (\%) = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} (100) \quad (2)$$

$$Eficiencia (\%) = \frac{0.005 W}{0.75W} (100) = 0.6666\%$$

$$Eficiencia (\%) = \frac{0.001 W}{1.5W} (100) = 0.6666\%$$

De acuerdo con el cálculo de la eficiencia utilizando la Ec. (2), se puede observar que el valor obtenido fue relativamente bajo. Esta baja eficiencia se debe principalmente a las limitaciones del modelo de electrolizador empleado durante la práctica. En particular, se identificó que el electrolizador no puede operar eficientemente por encima de un voltaje de entrada de 2.5 V. Este límite impone una restricción significativa en la cantidad de energía eléctrica que puede ser convertida en energía química útil, lo que a su vez se traduce en una potencia de salida considerablemente reducida.

Para mejorar la eficiencia del sistema, sería recomendable considerar el uso de un electrolizador de mayor calidad o con un diseño más avanzado, que minimice las pérdidas internas y permita operar a voltajes más altos sin comprometer la estabilidad del proceso. Asimismo, otra alternativa viable sería emplear una celda de combustible más eficiente, que permita una conversión más directa de energía eléctrica, reduciendo así las pérdidas asociadas a la separación y posterior utilización del hidrógeno.

Durante el experimento, se observó la formación de burbujas en ambos electrodos, lo que confirmó la separación de hidrógeno y oxígeno mediante la electrólisis del agua. En el cátodo (electrodo negativo), las burbujas fueron más abundantes debido a la liberación de hidrógeno, mientras que en el ánodo (electrodo positivo) se generaron burbujas de oxígeno en menor cantidad, como es esperado según la ecuación química del proceso.

Se registró que el tiempo de reacción y la cantidad de gas producido dependían de la intensidad de la corriente aplicada. A mayor voltaje, se observó una mayor cantidad de burbujas y una separación más rápida de los gases. Este comportamiento es consistente con la teoría de electrólisis, donde la eficiencia del proceso se relaciona directamente con la energía suministrada al sistema.

Los resultados de este experimento, como se observa en la Tabla 3, se realizaron 2 soluciones distintas con cantidades cada vez mayor de bicarbonato de sodio, esto para que el agua destilada poco a poco contuviera una mayor cantidad de sales y la eficiencia de proceso sea mayor. Sin embargo, como la potencia de entrada sigue siendo muy poca no le da la suficiente energía al módulo para hacer girar el motor.

Conclusiones

El Hidrógeno Verde ha generado un creciente interés a nivel mundial debido a su impacto positivo en la producción de energía eléctrica. A lo largo del tiempo, diversas investigaciones han analizado sus beneficios, permitiendo establecer una base sólida para el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles. Este proyecto no solo contribuye con soluciones científicas y técnicas, sino que también busca impulsar una transición energética global que reduzca la dependencia de los combustibles fósiles y fomente el aprovechamiento de fuentes renovables.

En el desarrollo de este estudio, se llevaron a cabo experimentos basados en principios teóricos previamente establecidos, lo que permitió una mejor comprensión del proceso de producción y aplicación del Hidrógeno Verde en diferentes escenarios energéticos. Actualmente, este elemento es considerado una alternativa viable para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, ofreciendo una opción más ecológica en comparación con los métodos tradicionales de generación de energía. Sin embargo, aún es necesario realizar más investigaciones que profundicen en su producción, almacenamiento y aplicación, además de concientizar sobre la importancia de su implementación en el sector energético.

Uno de los principales desafíos en la adopción masiva del Hidrógeno Verde radica en la rentabilidad de su producción. Se busca que el proceso de obtención mediante energías renovables sea económicamente competitivo frente a los combustibles fósiles, lo que aumentaría el interés de los sectores industriales y gubernamentales en esta fuente energética. A pesar de que el hidrógeno está presente en la mayoría de las sustancias, su extracción requiere procesos específicos.

Una de las críticas más comunes al uso del Hidrógeno Verde como fuente de energía es su baja eficiencia, desde la electrólisis del agua hasta la conversión del hidrógeno nuevamente en electricidad mediante una celda de combustible implica pérdidas significativas de energía.

El verdadero valor del hidrógeno verde no reside únicamente en su eficiencia directa, sino en su capacidad para resolver problemas estructurales del sistema energético actual. En primer lugar, permite almacenar excedentes de energía renovable, como la solar o la eólica, que son intermitentes por la naturaleza. En lugar de desperdiciar esa energía cuando la oferta supera la demanda, puede transformarse en hidrógeno y utilizarse más adelante, cuando sea necesario. Además, el Hidrógeno Verde es una solución viable para descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como la industria pesada, el transporte marítimo o la aviación, donde las baterías no son prácticas ni eficientes. Otro aspecto clave es su versatilidad: el hidrógeno puede utilizarse como combustible, como materia prima industrial o como base para la producción de otros combustibles sintéticos. También contribuye a la seguridad energética, al reducir la dependencia de combustibles fósiles importados y diversificar las fuentes de energía. Aunque hoy su producción es costosa y su eficiencia limitada, se espera que los avances tecnológicos y las economías de escala mejoren significativamente su rendimiento y competitividad en los próximos años. Por ello, es fundamental continuar con investigaciones, perfeccionar los métodos de producción y generar políticas que incentiven su uso a nivel mundial.

Bibliografía

- Asociación Española del Hidrógeno (AEH). (2022). Tipos de Hidrógeno. <https://www.aeh2.org/hidrogeno>.
- Barbelli, M., Buffoni, I., Pompeo, F., Santori, G., & Nichio, N. (2011). HIDRÓGENO A PARTIR DEL REFORMADO DE GLICERINA. PIDCAT, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. CINDECA, Facultad de Cs. Exactas.
- Chang, R., & College, E. (2002). Electrólisis. México: McGraw-Hill (Ed). Química (7ma Ed).
- HINICIO. (2021). Hidrógeno Verde en México: el potencial de la transformación. Tomo VII. Integración de resultados y recomendaciones generales. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Internacional Energy Agency (IEA). (2023). Hydrogen. International Energy. <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen> Agency.
- Merlan, M. (2022). Síntesis y Análisis de Procesos – Parte 4. Scribd, documento cargado en plataforma, 12 Nov 2022. <https://es.scribd.com/document/606949531/SINTESIS-Y-ANALISIS-DE-PROCESOS-PARTE-4>. [Consultado: 25 de julio de 2025].
- Mitner, S. (2021). Hidrógeno Verde a partir del reformado de biometano con vapor de agua. *Revista Industria química*, 93, 118-122.
- Nieto, E. (2021). AES se enfoca en Hidrógeno Verde y comparte información: ¿Cuánta energía genera la tecnología actual? *Energía Estratégica*. www.energiaestrategica.com. Consultado: 29 de junio 2025
- Orduña, E. (2024). Almacenamiento de Energía, enfrentando retos para la integración de fuentes de energías renovables. *Transición energética*, 3(13). www.transicionenergetica.ineel.mx

- Primo, E. (1996). Química orgánica básica y aplicada: de la molécula a la industria. Volumen 1, Pág. 132. Editorial Reverté.
- Rodríguez, H. (2024). Propiedades del Hidrógeno. National Geographic España.
- Ruiz, A. (2022). Hidrógeno Verde, ¿una quimera? RETEMA. www.retema.es/actualidad/hidrogeno-verde-una-quimera. Consultado:05 de julio 2025.
- Ruiz, A. (2024). Renovables para producir Hidrógeno Verde. Renovables para producir Hidrógeno Verde - esenergia
- Troncoso, F. (2021). Claves del Hidrógeno Verde. *Revista INDUAMBIENTE*, 171.