

# Sustentabilidad energética: hidrógeno como combustible limpio en la generación de electricidad

## *Energy sustainability: hydrogen as a clean fuel in electricity generation*

*Luis Humberto Díaz Saldierna y Jesús Leyva Ramos*

### Resumen

En este trabajo, se realiza una discusión sobre la generación de energía eléctrica a través de fuentes alternas que utilizan hidrógeno como combustible. Las celdas de combustible más populares son las de membrana de intercambio protónico, las cuales generan energía eléctrica a través de un proceso electroquímico, en el que las moléculas de hidrógeno son subdivididas en protones y electrones. Los electrones circulan a través de conductores, lo que genera una corriente eléctrica. Este proceso es amigable con el medio ambiente debido a que los únicos residuos que se generan son agua y vapor de agua. Estas celdas de combustible se pueden clasificar dentro de las fuentes de energía limpias; además, dependiendo de la técnica utilizada en la producción de hidrógeno, las celdas de combustible podrían clasificarse también como fuentes renovables de energía. Como consecuencia, se logra una sustentabilidad energética, ya que se garantiza un equilibrio entre el medio ambiente y el uso de los recursos naturales.

**Palabras clave:** energía renovable, generación de energía eléctrica, celdas de combustible, hidrógeno.

### Abstract

In this work, a discussion is carried out about the generation of electrical energy through alternative sources that use hydrogen as fuel. The proton exchange membrane fuel cells are the most popular, which generate electrical power through an electrochemical process, where hydrogen molecules are subdivided into protons and electrons. Electrons circulate through conductors; thus, an electric current is generated. Furthermore, this process is friendly to the environment because the only waste generated is water and water vapor. Therefore, the fuel cells can be classified among clean energy sources; furthermore, depending on the technique used in hydrogen production, fuel cells could also be classified as renewable energy sources. Consequently, energy sustainability is achieved since a balance between the environment and the use of natural resources is guaranteed.

**Keywords:** renewable energy, electric power generation, fuel cells, hydrogen.

### CÓMO CITAR ESTE TEXTO

Díaz Saldierna, Luis Humberto y Leyva Ramos, Jesús. (2022, mayo-junio). Sustentabilidad energética: hidrógeno como combustible limpio. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 23(3). <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.3.2>



### Luis Humberto Díaz Saldierna

*Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológico*

Obtuvo la Licenciatura en Ingeniería Electrónica, y la Maestría y el Doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en 2001, 2004 y en 2019, respectivamente. Actualmente es nivel 1 en el SNI y está adscrito a la División de Control y Sistemas Dinámicos del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. Sus líneas de investigación son los sistemas electrónicos de potencia y el procesamiento de energía de fuentes renovables. Sus áreas de interés son convertidores de potencia, control de sistemas electrónicos de potencia y generación de energía de fuentes renovables.

 [ldiaz@ipicyt.edu.mx](mailto:ldiaz@ipicyt.edu.mx)

 [orcid.org/0000-0002-0940-6440](https://orcid.org/0000-0002-0940-6440)

### Jesús Leyva Ramos

*Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica*

Obtuvo la Licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en 1975, Maestría en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de California en 1978 y el Doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Houston en 1982. Actualmente es nivel 3 en el SNI y está adscrito a la División de Control y Sistemas Dinámicos del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. Sus líneas de investigación son los sistemas electrónicos de potencia y el procesamiento de energía de fuentes renovables. Sus áreas de interés son el modelado, control, y diseño de convertidores de potencia.

 [jleyva@ipicyt.edu.mx](mailto:jleyva@ipicyt.edu.mx)

## Introducción

En los últimos años, el consumo de energía eléctrica se ha incrementado de manera considerable, de tal manera que la generación eléctrica a través de combustibles fósiles es insuficiente. A su vez, la concientización en la sociedad sobre el cuidado del medio ambiente y en la preservación de los recursos naturales ha provocado el creciente interés por reducir la dependencia de los combustibles fósiles, los cuales provienen de recursos no renovables. Por lo tanto, la investigación y desarrollo de fuentes alternas de energía que utilicen procesos renovables, eficientes y no contaminantes ha crecido de manera significativa. Como resultado, en los últimos años la generación eléctrica por fuentes alternas que utilizan procesos renovables se ha incrementado de manera exponencial (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2021b).

Esta cifra representa una participación récord de 29% de la capacidad total instalada, incluyendo la generación a través de combustibles fósiles. Desde 2012, existe una tendencia en la que la mayor parte de la capacidad de energía recién instalada es renovable. Una comparación por año de la capacidad a través de fuentes renovables a nivel global se presenta en la figura 1. Se puede notar que la capacidad instalada se ha incrementado cada año, con una cifra récord entre 2019 y 2020 (58 GW). La participación en la capacidad agregada de las energías renovables en 2010 fue de 41%, mientras que para el año 2020 fue 83% de la capacidad total instalada, lo cual refleja el creciente interés en las fuentes renovables.

México tiene un área de oportunidad en la transición energética a fuentes limpias de energía. Según IRENA (2021a), en México sólo se ha tenido un incremento de 15.22 GW en la capacidad instalada desde 2011



**Figura 1.** Capacidad agregada por año de energía renovable a nivel global. Datos obtenidos de REN21, 2021.

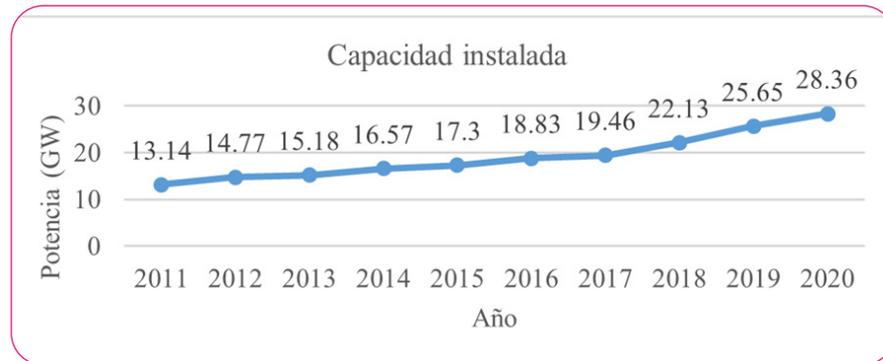
En este orden de ideas, para finales de 2020, la capacidad total instalada de generación eléctrica a través de fuentes renovables a nivel global fue de 2,838 GW (REN21, 2021).

hasta finales de 2020. Para el período de 2017 a 2020, se logró un incremento considerable de 8.9 GW en la capacidad instalada de fuentes renovables; sin embargo, existe una alta dependencia en las fuentes que utilizan combustibles

fósiles. En la figura 2 se muestra la gráfica que describe el incremento en la capacidad instalada durante el período 2011 a 2020.

través de gas y petróleo.

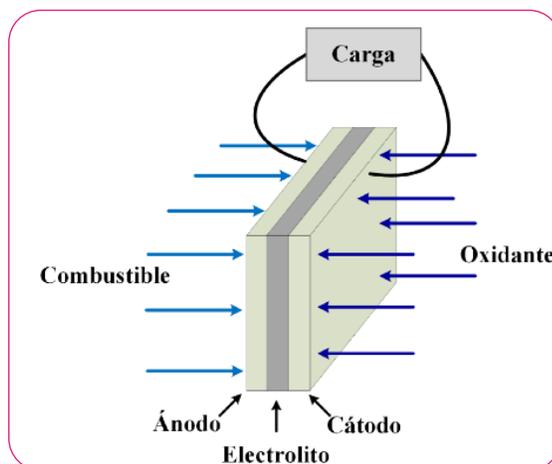
## Celdas de combustible



**Figura 2.** Capacidad instalada de fuentes renovables en México. Datos obtenidos de IRENA, 2021a.

La generación eléctrica en México a partir del carbón tuvo una reducción de 48% en el año 2020, la cual fue la mayor reducción de los países que conforman el grupo G20. Así, desde 2015 se ha logrado reducir en 60% la generación eléctrica a partir del carbón; sin embargo, 75% de la generación eléctrica en nuestro país proviene de combustibles fósiles (Fulghum, 2021). Así, en el *Global Electricity Review, Perfil G20* se documenta un incremento de 5% en la generación a través de fuentes renovables en el período de 2015 a 2020; mientras que se tuvo un incremento de 2% en la generación a

Las *celdas de combustible* son equipos en los que se llevan a cabo reacciones químicas para generar electricidad con muy baja o nula tasa de emisión de gases de efecto invernadero. Además de generar energía eléctrica de manera directa, las eficiencias son mayores a las obtenidas con los motores de combustión interna. Dependiendo del combustible, las emisiones de gases contaminantes son mínimas o nulas. Para realizar el proceso electroquímico, se utiliza un oxidante (oxígeno) y un combustible basado en hidrógeno, como metanol, alcohol, gas natural o hidrógeno puro. La celda de combustible consiste en una placa de electrolito unido a un cátodo y un ánodo localizados en ambos lados del electrolito, como se muestra en la figura 3. El combustible alimenta al ánodo, mientras que el oxidante abastece al cátodo. Las reacciones electroquímicas se producen en los electrodos, lo que genera un flujo continuo de protones a través del electrolito, mientras que una corriente eléctrica circula por los conductores externos hacia una carga. Ambos electrodos son porosos para que el electrolito y el gas puedan penetrarlos



**Figura 3.** Principio de operación de una celda de combustible.

y lograr el máximo contacto posible entre el gas, el electrodo y el electrolito.

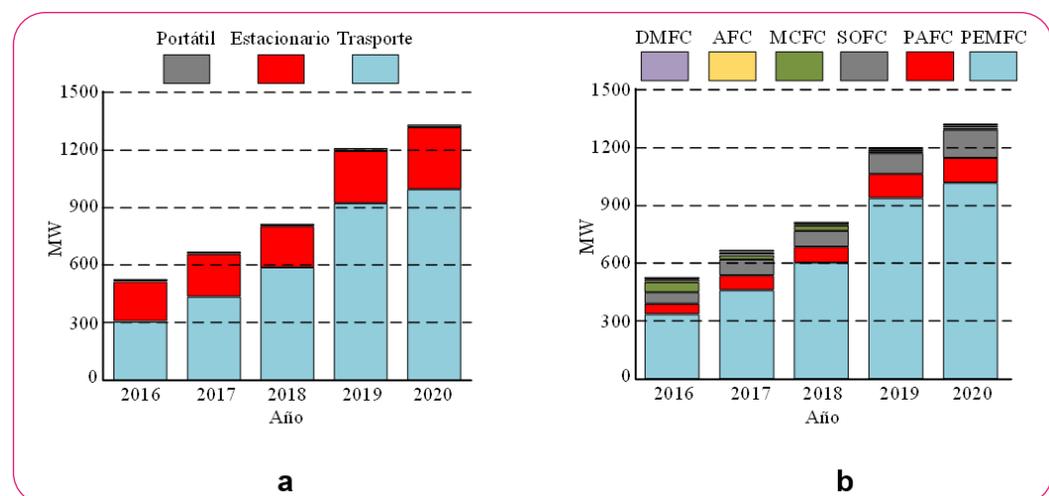
Las celdas de combustible se clasifican por el tipo de electrolito y combustible que utilizan. Las más utilizadas son: 1) celda de combustible de electrolito alcalino (AFC), 2) celda de combustible de metanol directo (DMFC), 3) celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC), 4) celda de combustible de carbonato fundido (MCFC), 5) celda de combustible de óxido sólido (SOFC), y 6) celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC).

En la actualidad, existen una diversidad de aplicaciones que utilizan celdas de combustible, la capacidad instalada a nivel global separada por tipo de aplicación se muestra en la figura 4a (E4tech, 2020). La potencia instalada se calcula en base al número de módulos de celdas de combustible vendidas por año. Las celdas de combustible son principalmente utilizadas para aplicaciones en transporte, con una capacidad total instalada en el período 2016-2020 de alrededor de 4,620 MW. Por otra parte, la capacidad instalada por tipo de celda de combustible se muestra

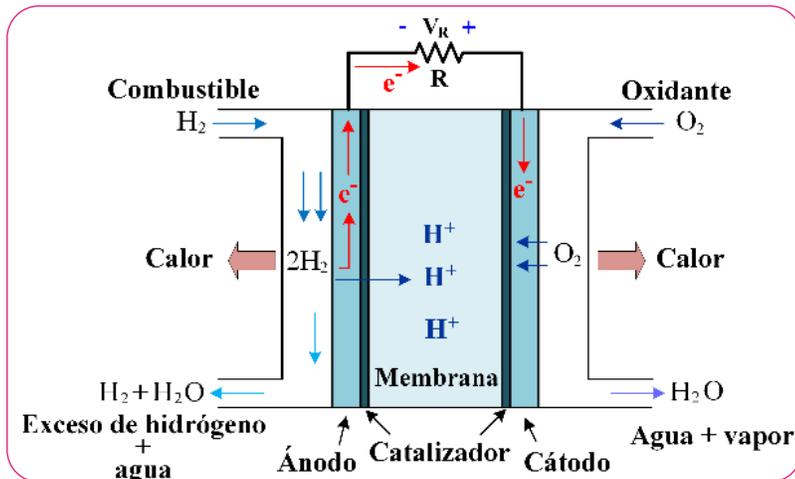
en la figura 4b. Se puede notar que la celda de combustible PEMFC es la más utilizada para generar electricidad, con aproximadamente 3,370 MW (73 % de la capacidad total). Por tanto, la celda de combustible de membrana de intercambio protónico es la más popular debido a sus características y flexibilidad en el mantenimiento.

## Celda de combustible de membrana de intercambio protónico

La celda de combustible de intercambio protónico, también llamada celda de combustible de electrolito de polímero fue desarrollada en los Estados Unidos por la compañía General Electric durante los años sesenta para vehículos espaciales de la NASA. Años más tarde, fue reconfigurada para aplicaciones comerciales por la compañía Ballard Power Sources. Este tipo de celda utiliza hidrógeno como combustible y un polímero de conducción iónica como electrolito. La estructura interna de la celda de combustible de intercambio protónico se presenta en la figura 5.



**Figura 4.** Capacidad instalada a nivel mundial por celdas de combustible. a. Capacidad instalada por tipo de aplicación. b. Capacidad instalada por tipo de celda de combustible. Datos obtenidos de E4tech, 2020.



**Figura 5.** Celda de combustible de membrana de intercambio protónico. Crédito: elaboración propia.

El combustible (hidrógeno) se inyecta a través del ánodo, mientras que el catalizador separa los átomos de hidrógeno en protones ( $H^+$ ) y electrones ( $e^-$ ). Los protones circulan a través del electrolito, mientras que los electrones son recolectados por un circuito externo para generar una corriente eléctrica. Los protones y electrones se combinan con el oxígeno que se suministra en el lado del cátodo para formar agua y vapor, debido a la liberación de energía en forma de calor. Los excedentes de combustible que no se utilizan en el proceso son expulsados a través de las compuertas de salida del ánodo y cátodo (Bei et al., 2010).

Según E4tech (2020), el interés en la utilización de esta tecnología se ha incrementado de manera considerable, de tal manera que en la actualidad es la tecnología con la que se genera la mayor cantidad de energía eléctrica a nivel global (ver figura 4B). La popularidad de la celda PEMFC es debido a sus ventajas, las cuales son: a) tamaño relativamente pequeño, b) diseño simple, c) operación a

bajas temperaturas, d) alta eficiencia en la conversión de energía, e) alta densidad de corriente generada por unidad de área, f) bajos costos de mantenimiento, y g) durabilidad.

## Aplicaciones de la celda de combustible PEMFC

Hoy en día, la celda de combustible PEMFC está siendo utilizada en aplicaciones portátiles, de transporte y estacionarias (E4tech, 2020). Los sistemas de celdas de combustible portátiles pueden ser utilizados como cargadores de celulares, alimentación de torres de iluminación, sistemas de supervivencia, equipos para gasoductos, señalización ferroviaria, aviones y barcos, entre otros.

El primer cargador USB de mano que utiliza esta tecnología (modelo MINIPAK) fue desarrollado por la compañía Horizon (Horizon, 2021). Este dispositivo utiliza celdas de combustible con un cartucho de hidrógeno y es capaz de realizar cuatro cargas de celular con un solo cartucho. Genera una energía de 14 Wh, lo que equivale a catorce baterías de 1.5 V. En aplicaciones de transporte, este tipo de celdas de combustible es utilizada en vehículos livianos, camiones pesados, autobuses, trenes, vehículos de manejo de cargas, aviones, vehículos espaciales, etcétera. Esto se debe a que la eficiencia de conversión de energía es del doble a la de un motor de combustión interna; además, no genera emisiones de  $CO_2$ .

Por otra parte, los vehículos eléctricos que utilizan celdas de combustible tienen la ventaja de un

alto rendimiento: la recarga de hidrógeno se realiza en minutos, produce una alta potencia (toque y aceleración) y no necesita conectarse a un cargador de baterías. Compañías como Honda, Toyota, Hyundai, BMW ofrecen una diversidad de modelos eléctricos con esta tecnología. También en 2018 entró en funcionamiento en Alemania el [Coradia iLint](#), el primer tren ligero de pasajeros eléctrico que utiliza celdas de combustible (ver figura 6).

de respaldo, y 4) alimentación remota. También se utilizan en combinación con otras fuentes de energía para equipos de respaldo y emergencia en telecomunicaciones, hospitales, comercios e industrias.

## Producción de hidrógeno

En la actualidad, la mayor parte de la producción de hidrógeno se realiza con base en combustibles fósiles (96%), cuyo proceso emite cantidades considerables de emisiones de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) a la atmósfera. Esto es porque los costos de producción son considerablemente bajos respecto a los costos del hidrógeno producido a partir de fuentes renovables (*hidrógeno verde*).

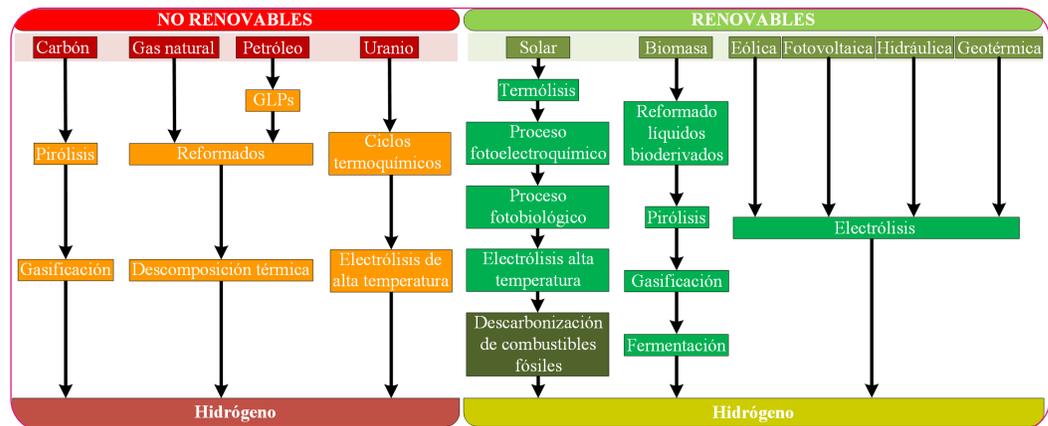
El tipo de hidrógeno que más se produce es el llamado *hidrógeno azul*, el cual se extrae a partir del gas natural, petróleo o carbón. Durante el proceso de producción se genera hidrógeno y CO<sub>2</sub>; sin embargo, para evitar altas emisiones contaminantes, aproximadamente 90% del dióxido de carbono producido es capturado y almacenado para su uso en otros procesos. En la producción de hidrógeno verde no se emiten emisiones contaminantes, pero el costo de generación es de entre dos a tres veces mayor a la del hidrógeno azul. El mayor componente de costo individual en la producción *in situ* del hidrógeno verde es la energía eléctrica renovable; no obstante, en la actualidad, los costos de generación han caído considerablemente (IRENA, 2020). Distintos procesos de producción de hidrógeno a través de fuentes no renovables y renovables se



Figura 6. Tren ligero de pasajeros Coradia iLint, que utiliza celdas de combustible (— Felix M —., 2016).

Este tren eléctrico fue desarrollado por la empresa ALSTOM, y alcanza una velocidad de 140 km/h y tiene una autonomía de 1,000 km. En la actualidad, existen varios trenes de pasajeros que utilizan celdas de combustible, que operan en varias partes del mundo. Los sistemas de potencia estacionaria con celdas de combustible son utilizados en aplicaciones de alimentación primaria y secundaria, cogeneración, unidades de respaldo y de emergencia. Estos sistemas se dividen en cuatro tipos: 1) pequeña escala (hasta 200 kW), 2) gran escala (mayor a 200 kW), 3) unidades

**Figura 7.** Clasificación de métodos para la producción de hidrógeno según la fuente primaria que se utiliza. Crédito: elaboración propia.



En el año 2020, las políticas, el sector industrial y la sociedad civil han puesto un mayor enfoque al uso de hidrógeno verde, el cual se produce sin generar emisiones contaminantes y utilizando fuentes renovables. Como resultado, 2020 fue el año en que los productores más grandes de hidrógeno verde a nivel global se unieron para formar la iniciativa *Green Hydrogen Catapult*, con el objetivo de reducir en gran medida los costos en la producción de hidrógeno para apoyar una transición energética más rápida de las industrias altamente dependientes del carbón (Casey, 2020).

El hidrógeno verde es producido por electrólisis<sup>1</sup> a través de fuentes renovables. Este tipo de hidrógeno puede ser almacenado en tanques para su utilización en diversas aplicaciones. Una de ellas es la generación de energía eléctrica, que a partir del hidrógeno proporciona una gran ventaja en comparación a fuentes como las celdas fotovoltaicas y generadores eólicos, pues no requiere, como las anteriores, bancos de baterías para ser almacenada, lo

que reduce el costo de producción.

La mayor parte de la producción del hidrógeno verde se realiza con base en la electrólisis del agua, utilizando un *electrolizador* (dispositivo donde se lleva a cabo la electrólisis). En el electrolizador ocurre el proceso inverso al de una celda de combustible; es decir, se inyecta una corriente eléctrica para generar hidrógeno. En algunos casos, el mismo dispositivo puede ser reversible, llevando a cabo la función de electrolizador y celda de combustible, al cambiar la polaridad.

Los sistemas APC, SOFC y PEMFC pueden ser utilizados como electrolizadores, y los sistemas PEMFC son los más usados en esta aplicación debido a que no utilizan un electrolito líquido, lo que, por consecuencia, no implica el manejo de soluciones corrosivas (IRENA, 2018). El gas producido en este proceso es de alta pureza, típicamente de 99 %. Por otra parte, la eficiencia de los electrolizadores utilizados es alta (65% - 70%). Sin embargo, se han reportado estudios en donde se establece que, al modificar los componentes de los

<sup>1</sup>Proceso para la separación de elementos de un compuesto químico utilizando una corriente eléctrica.

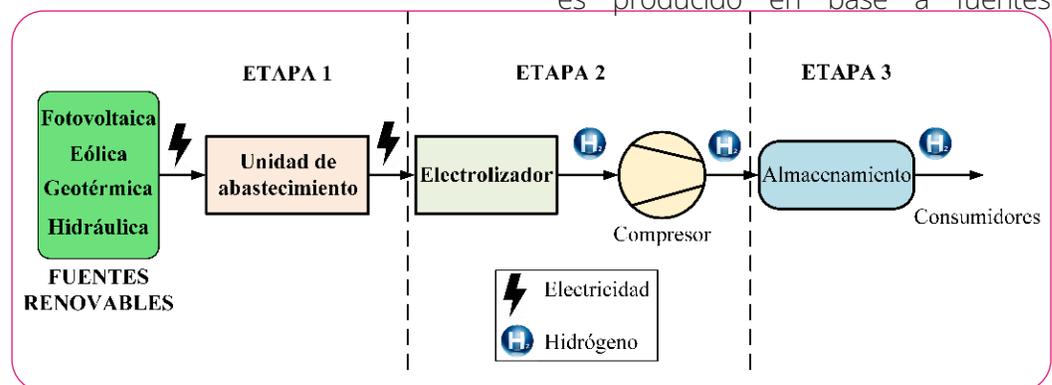
electrodos y la solución electrolítica, se logran eficiencias cercanas a 99%.

El proceso de producción de hidrógeno verde se muestra en la figura 8. En la primera etapa se genera electricidad a través de fuentes renovables para abastecer de energía al electrolizador. La segunda etapa se produce el gas y, finalmente, la tercera etapa consiste en el almacenamiento y distribución.

primaria, y un proceso electroquímico (electrólisis) que no genera emisión alguna de  $\text{CO}_2$ .

No obstante, la generación eléctrica que utiliza como fuente primaria el hidrógeno verde puede ser considerada como energía renovable, ya que no existen emisiones de gases contaminantes ni en la producción de hidrógeno, ni en la generación de energía eléctrica; además, el gas es producido en base a fuentes

**Figura 8.** Diagrama del sistema de producción de hidrógeno verde para almacenamiento de hidrógeno *in situ*. Crédito: elaboración propia.



## Comentarios finales

El hidrógeno es una fuente de energía que, debido a sus características, puede impulsar en gran medida la transición energética y los objetivos propuestos a nivel global para reducir las emisiones de gases contaminantes. No todos los tipos de hidrógeno son compatibles con la sustentabilidad energética, ya que la mayoría utiliza como materia prima los combustibles fósiles. Incluso el hidrógeno azul no puede ser clasificado como hidrógeno limpio debido a que el proceso de producción libera emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. El único tipo de hidrógeno compatible con sustentabilidad es el hidrógeno verde, pues en su proceso de producción se utilizan fuentes renovables para generar la energía

renovables de energía. Por otra parte, la generación de energía eléctrica por medio de este método puede parecer redundante (fuentes renovables — energía renovable— producción de hidrógeno-energía renovable); no obstante, el almacenamiento del hidrógeno es más sencillo y con un costo reducido, en comparación con los voluptuosos y costosos bancos de baterías requeridos para almacenar la energía de fuentes renovables como las celdas fotovoltaicas y los generadores eólicos. Adicionalmente, existe una variedad de procesos que utilizan el hidrógeno como portador de energía.

En la actualidad, aún nos enfrentamos con retos importantes para desplazar los combustibles fósiles y utilizar en su lugar hidrógeno verde, debido a los costos de producción y a los retos tecnológicos. Sin embargo, los

esfuerzos de los gobiernos, la industria y la sociedad civil se encaminan a una transición a mediano plazo, para dejar de depender de los combustibles fósiles. Las nuevas políticas apuntan a lograr reducir las emisiones de gases contaminantes y a la preservación de los recursos naturales, sin dejar de incrementar la generación de energía, ya que la demanda crece en forma exponencial. Cada vez más países se suman a este reto, y crean y/o modifican sus políticas energéticas. No obstante, sin opciones alternativas de combustibles como el hidrógeno verde, el reto sería más difícil de superar.

## Referencias

- ❖ — Felix M —. (2018). [InnoTrans 2016 – Alstom iLint with Fuel Cell Batteries] [Pintura]. Wikimedia Commons. <https://cutt.ly/CGJzQ58>
- ❖ ALSTROM. (2021). *El tren de hidrógeno Coradia iLint, autorizado para entrar en servicio comercial en la red ferroviaria alemana*. <https://cutt.ly/rGJoWc7>
- ❖ Casey, T. (2020). *Hard sails & Green hydrogen for the cargo ships of the future*. CleanTechnica. <https://cutt.ly/DGJo6j9>
- ❖ Fulghum, N. (2021, marzo). *México. México lidera al G20 en la reducción de carbón el año pasado, pero tres cuartos de su electricidad aún provienen de combustibles fósiles*. Ember; Global Electricity Review, Perfil G20. <https://cutt.ly/pGJpilg>
- ❖ E4tech. (2020). *The fuel cell industry review 2020*. <https://fuelcellindustryreview.com/>
- ❖ Gou, B. (2010). *FUEL CELLS – Modeling, control and applications*. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420071627/fuel-cells-gou-bei-ki-na-woon-diong-bill>
- ❖ Bei, G., Woon, K. N., y Bill, D. (2010). *Fuel Cells: Modeling, Control, and Applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420071627>
- ❖ Horizon. (2021). *Horizon fuel Cell Technologies*. <https://www.horizonfuelcell.com/>
- ❖ International Renewable Energy Agency (IRENA). (2018). *Hydrogen for Renewable Power: Technology Outlook for the Energy Transition*. <https://cutt.ly/dGJa1aH>
- ❖ International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolyzers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. <https://cutt.ly/VGJa7k0>
- ❖ International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021a). *Renewable Capacity Statistics 2021*. <https://cutt.ly/YGJs5G>
- ❖ International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021b). *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. <https://cutt.ly/QGJaQth>
- ❖ REN21. (2021). *Renewables 2021 Global Status Report*. <https://cutt.ly/MGjs2xa>