

Research Article

# Hydrogen Fuel Cells and Their Potential to Fight Climate Change

## Pilas de Combustible de Hidrógeno y su Potencial para Enfrentar el Cambio Climático

Sonnia Marisol Miranda Sánchez, Noemi Tatiana Quishpi Chasiluisa, Rafael Alexander Córdova Uvidia\*, and Magdy Mileni Echeverría Guadalupe

Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador

### ORCID

Rafael Alexander Córdova Uvidia: <https://orcid.org/0000-0002-5326-3782>

VIII INTERNATIONAL  
CONGRESS OF SCIENCE  
TECHNOLOGY  
ENTREPRENEURSHIP AND  
INNOVATION (SECTEI 2021)

Corresponding Author: Rafael  
Alexander Córdova Uvidia;  
email:  
rafael.cordova@epoch.  
edu.ec

Published: 29 June 2022

Production and Hosting by  
Knowledge E

© Sonnia Marisol Miranda  
Sánchez et al. This article is  
distributed under the terms of  
the [Creative Commons](#)  
[Attribution License](#), which  
permits unrestricted use and  
redistribution provided that  
the original author and  
source are credited.

### Abstract

The use of fossil fuels to meet humanity's energy needs is causing serious environmental damage. According to several scientists, the net greenhouse gas emissions must be zero by 2050 to avoid irreversible effects. Hydrogen fuel cells are devices that directly convert chemical energy into electrical energy; its efficiency is above that of internal combustion engines, steam, and gas turbines. In this article, the research question – What is the potential of hydrogen fuel cells to mitigate climate change consequences? – is addressed with a focus on the circular economy, applications of fuel cells in transportation and in obtaining water for localities that suffer water stress. Finally, it is concluded that to achieve the sustainable development objectives, a combined use of renewable energies is fundamental, with hydrogen being a protagonist of the energy transition at the global level.

**Keywords:** *Electrolysis, Climate change, Renewable energy, Fuel cells, Circular economy.*

### Resumen

El uso de combustibles fósiles para satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad está causando graves daños ambientales; según varios científicos, las emisiones netas de gases de efecto invernadero deben ser cero hasta antes de 2050 para evitar efectos irreversibles. Las pilas de combustible de hidrógeno son dispositivos que permiten convertir la energía química en energía eléctrica de forma directa; su eficiencia está por encima de la de los motores de combustión interna, turbinas de vapor y de gas. Este artículo, responde a la pregunta de investigación ¿cuál es el potencial de las pilas de combustible de hidrógeno para mitigar los efectos del cambio climático?, con un enfoque en la economía circular, aplicaciones de las pilas de combustible en el transporte, y en la obtención de agua para localidades que sufren de estrés hídrico. Finalmente, se concluye que, para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible, el uso combinado de energías renovables es fundamental, siendo el hidrógeno un protagonista de la transición energética a nivel global.

**Palabras Clave:** *Electrólisis, Cambio climático, Energía renovable, Pilas de combustible, Economía circular.*

 OPEN ACCESS



## 1. Introducción

El clima del planeta ha estado cambiando constantemente a lo largo del tiempo, de ahí la importancia de reconstruir la historia del clima de un país o región [1]. Las Naciones Unidas con el afán de prever daños que pueden ocurrir en el futuro por el cambio climático crearon el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el Protocolo de Kioto y se han realizado casi una veintena de Conferencias de las Partes (COP) con el fin de reducir la emisión de gases de efecto invernadero que son la mayor amenaza para el mundo en décadas [2]. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) los indicios del cambio climático se han intensificado, la temperatura media mundial ha aumentado en 1,1 °C desde la era preindustrial y en 0,2 °C con respecto al período 2011-2015 [3].

La quema de combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) es uno de los factores más determinantes en el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera; una alternativa para mitigar el cambio climático es la utilización de energías renovables [4]. El hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) es el primer elemento en la tabla periódica con número atómico igual a uno y un peso atómico igual a 1,0079 (g/mol); es inodoro, incoloro, no tóxico, por lo que se lo considera como inofensivo, en condiciones normales se presenta en forma de gas. El átomo de  $\text{H}_2$  está constituido por un protón y un electrón, al no poseer neutrones en su núcleo, se lo considera como el elemento más ligero y sencillo [5].

El  $\text{H}_2$  es una fuente de energía renovable y al ser el más abundante en la naturaleza su importancia es aún mayor ya que permite obtener energía, electricidad y es un combustible que puede ser usado en motores o en células (pilas) llamadas electroquímicas e impulsar directamente vehículos o generar electricidad a partir de una reacción electroquímica sin ocasionar daños en el medio ambiente [6]. El  $\text{H}_2$  en estado puro no se encuentra en la naturaleza, por lo cual no puede ser explotado como otros recursos naturales como el petróleo y el carbón. Por esta razón, el  $\text{H}_2$  es un portador secundario de energía dado que se utiliza otros compuestos químicos abundantes como el agua y el metano para su producción; se lo utiliza como puente en la transformación de unos tipos de energías en otros, una aplicación muy importante son las pilas de combustible de  $\text{H}_2$  [5].

A nivel global casi el 88% de la economía energética depende de los combustibles fósiles [7]. La pandemia mundial que se está viviendo por la crisis del coronavirus (COVID-19), ha provocado varios bloqueos en la producción dando como resultado el quebranto de varios recursos y la caída del precio del petróleo. La idea de frenar la recesión económica ha llevado a muchos países a enfocarse en sistemas eléctricos



basados en energías renovables como son la instalación de paneles solares, turbinas eólicas, pilas de combustibles de  $H_2$  entre otras opciones; las pilas de combustible muestran un funcionamiento impecable y alta eficiencia [8].

En la actualidad toda la economía se basa en un modelo de economía lineal, la cual consiste en “tomar, hacer y desechar”, este tipo de economía ha dado como resultado el deterioro y quebranto de algunos recursos renovables, este bloqueo en la producción o llevado a crear sistemas sostenibles es allí donde nace la idea de “reutilizar” y se crea la economía circular. La Economía circular es un proceso de desarrollo continuo positivo que procura preservar y aumentar el capital natural, optimizar los rendimientos de los recursos y minimizar la contaminación ambiental [9].

Por lo tanto, es importante conocer los tipos de pilas de combustible de hidrógeno y sus aplicaciones debido a que representan una alternativa energética para la obtención de energía verde y sus aplicaciones que serán fundamentales para alcanzar los objetivos de cero emisiones de contaminación hacia la atmósfera. [10], realizaron una revisión bibliográfica exhaustiva de los tipos de pilas de combustible; en el presente trabajo, se muestra además métodos de producción de  $H_2$  y aplicaciones recientes, que marcan el camino hacia un futuro sin emisiones en base a la economía del hidrógeno.

## 2. Metodología

El presente trabajo pretende responder la pregunta de investigación ¿Cuál es el potencial de las pilas de combustible de hidrógeno para mitigar los efectos del cambio climático? El alcance del trabajo incluye una revisión de los tipos de pilas de combustible disponibles, y las tecnologías para producir energía eléctrica que a su vez impulsan a vehículos acuáticos, terrestres y aéreos; adicionalmente, se analiza un modelo asociado a la economía circular en donde, el agua que resulta como subproducto del proceso electroquímico, es reciclada en el proceso o utilizada como agua potable.

La metodología seguida para este trabajo es la de una revisión sistemática. En base a la pregunta de investigación, se ha realizado una búsqueda bibliográfica de literatura científica; luego, se ha categorizado los documentos seleccionados de acuerdo con la información de la Tabla. (1). Los artículos científicos de referencia que se consultaron pertenecen a los cuartiles 1 y 2 de acuerdo con Scimago Journal Ranks. Finalmente, los puntos de vista comunes de los autores, y las líneas de trabajo futuro fueron plasmadas de forma sintetizada en la presente revisión bibliográfica.

De acuerdo con la Tabla. (1) se encontró 32 documentos científicos, en base a ellos, en primera instancia se define el hidrógeno verde junto con las pilas de combustible, luego se muestra el potencial de las pilas de combustible para alcanzar un modelo asociado

**Table 1**

*Categorías de los documentos científicos.*

Categorías de los documentos	Cantidad
Pilas de combustible e hidrógeno verde	8
Cambio climático y pilas de combustible	6
Cambio climático y economía circular	6
Aplicaciones de las pilas de H <sub>2</sub> para recuperar H <sub>2</sub> O	7
Aplicaciones de las pilas de H <sub>2</sub> para vehículos	5

a la economía circular, a continuación, se describe las características principales de diferentes modelos de pilas de combustible, finalmente, se revisa las aplicaciones de las pilas de combustible con fines de movilidad y obtención de agua.

### 3. Desarrollo y Discusión

#### 3.1. El hidrógeno verde

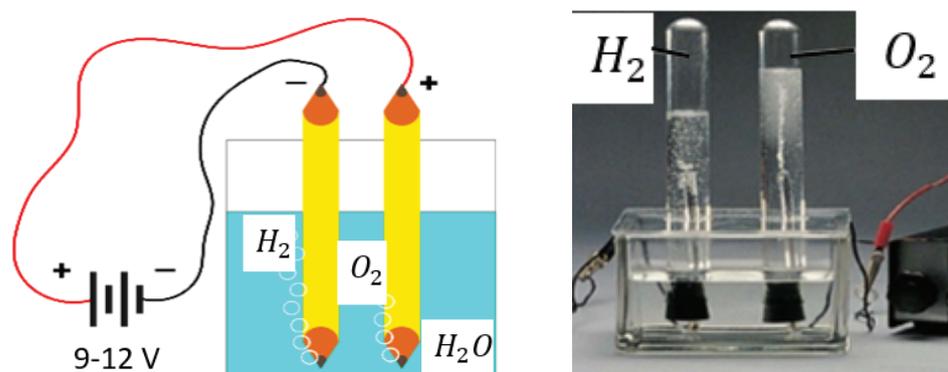
El hidrógeno verde es un combustible limpio 100% sostenible y seguro, que permite generar energía renovable cuando se produce la electrólisis del agua haciendo uso de energía eólica o energía solar, sin emisiones de gases de efecto invernadero. Los investigadores están tratando de desarrollar energía verde anticipándose a un mercado del futuro que será el tema principal de este siglo XXI. El hidrógeno verde es una alternativa energética para prevenir daños en el ecosistema, dado que representa un papel importante en los sistemas energéticos con una baja emisión de carbono [11]. Tiene la potencialidad para ser producido a partir del excedente generado por energías renovables que garantiza el suministro energético con una mayor generación eléctrica que las energías renovables convencionales.

El hidrógeno puede transformarse en varias formas de energía tales como: gas sintético, calor o electricidad, lo que se traduce en aplicaciones industriales y de movilidad. Puede ser utilizado en sectores clave que no tienen opciones obvias de descarbonización, en la industria intensiva en procesos con altas temperaturas y en el transporte de mercancías [12]. Se estima que para el año 2050 el uso de energía renovable, electrólisis y las metas de descarbonizar todos los sectores de la economía, ayudarán a las matrices energéticas y económicas del mundo a ser más sostenibles [13].

### 3.1.1. Métodos de obtención de H<sub>2</sub>

El H<sub>2</sub> se puede obtener mediante procesos industriales y por fuentes renovables entre los métodos de obtención más populares se tiene el reformado del gas natural y la electrólisis del agua. La relación atómica H/C más elevada de la molécula CH<sub>4</sub> con respecto a otros combustibles indica que el gas natural, es el precursor más idóneo para producir hidrógeno; el proceso de reformado se ha utilizado a lo largo de varias décadas y en la actualidad en la producción industrial del hidrógeno debido a que es más económico [14].

La electrólisis es el proceso que permite romper las moléculas ya sean orgánicas e inorgánicas; mediante electricidad; las moléculas se disocian en especies químicas cargadas positiva o negativamente y permiten conducir la corriente eléctrica. Al colocar un par de electrodos en una disolución de un electrolito (compuesto ionizable) conectado a una fuente de corriente continua entre ellos como se muestra en la Fig. (1), los iones con carga positiva que se encuentran en la disolución se mueven hacia el electrodo negativo mientras que los iones con carga negativa hacia el electrodo positivo. Cuando los iones llegan a los electrodos estos pueden ganar o perder electrones y transformarse en átomos neutros o moléculas, las reacciones que se produzcan en el electrodo dependen de la diferencia de potencial o voltaje que se aplica a la pila. Todos los cambios químicos que se producen en el proceso de electrólisis implican una reagrupación o reajuste de los electrones en las sustancias que reaccionan [15].



**Figure 1**

*Esquemas de la electrólisis del agua. Fuente:* [16], [17].

Entre las diversas formas de energía verde, segura y sostenible, el hidrógeno se considera la mejor debido a su bajo costo y baja contaminación para el medio ambiente. Además, la abundancia de la luz solar y los recursos hídricos son grandes activos para

que se pueda generar hidrógeno como combustible, las organizaciones de normalización y los responsables políticos nacionales e internacionales están comenzando a debatir las normas internacionales que fomenten la producción de hidrógeno verde [13].

### 3.2. Pilas de combustible de H<sub>2</sub>

El desarrollo de las pilas de combustible surge con la necesidad de reducir las emisiones globales de los gases de efecto invernadero, esta alternativa energética representa una transición que va desde la obtención de energía a partir de combustibles fósiles hasta la utilización de energía renovable [18]. Son convertidores electroquímicos que permiten transformar directamente la energía química en energía eléctrica mediante una serie de reacciones químicas [19].

La Fig. (2) muestra la capacidad de generar agua y calor además de la electricidad de las pilas de combustible; mientras exista el suministro de los combustibles, un elemento oxidante (O<sub>2</sub>) y un combustible (H<sub>2</sub>), el proceso se realiza en un solo paso sin involucrar partes móviles, evitando así las pérdidas asociadas con los procesos energéticos tradicionales [20].

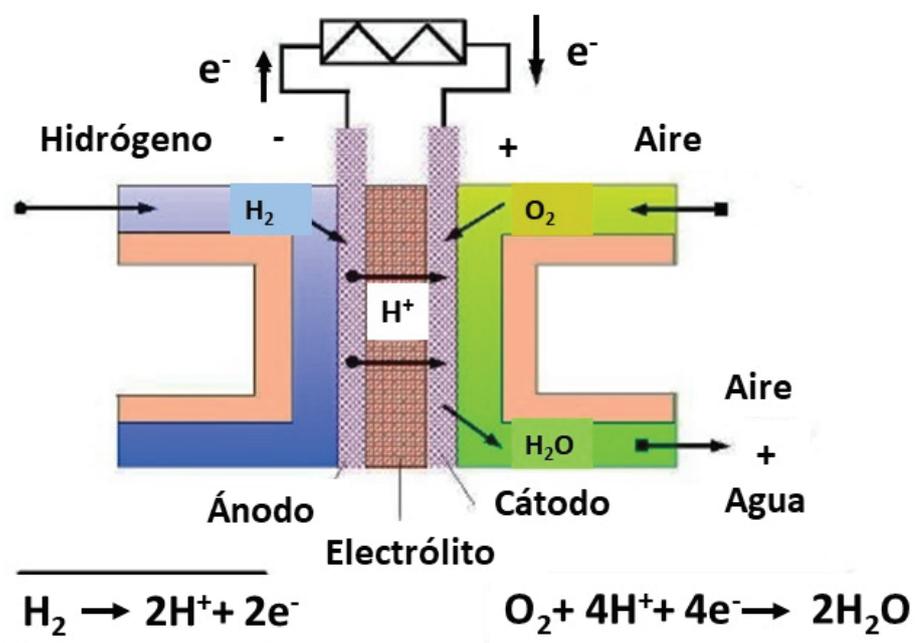
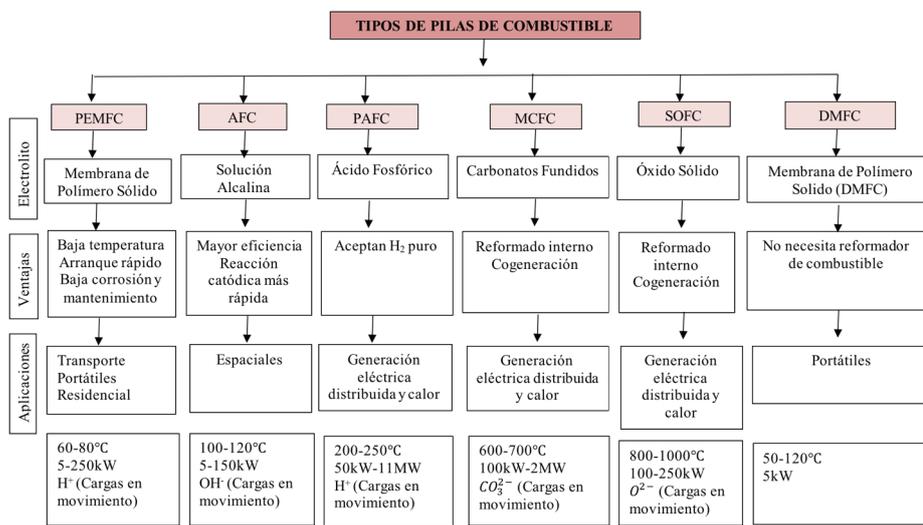


Figure 2

*Pilas de combustible.* Fuente: [28].



Las pilas de combustible se clasifican de acuerdo con el tipo de electrolito que utilizan, la potencia máxima que pueden generar, entre otros tal como se muestra en la Tabla. (2). Las ecuaciones de las reacciones químicas que se producen tanto en el ánodo como el cátodo de las pilas de combustible analizadas se muestran en la Tabla (3)



Fuente: [10].

Figure 3

Tipos de pilas de combustible.

Table 2

Reacciones químicas según el tipo de pila.

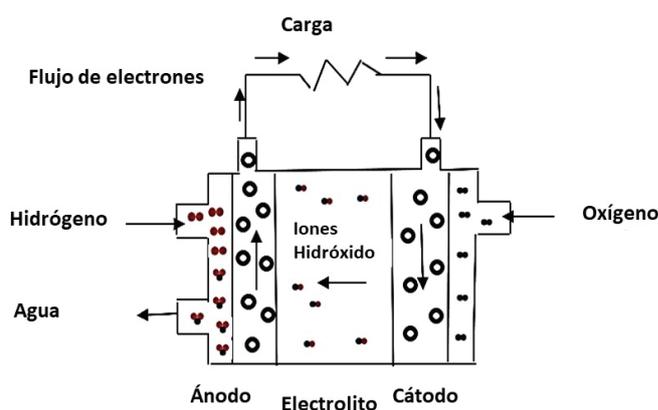
Tipo	Reacción del ánodo	Reacción del cátodo
<b>PEM Y PAFC</b>	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
<b>AFC</b>	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow +2(OH)^-$
<b>MCFC</b>	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
<b>SOFC</b>	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
<b>MDFC</b>	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

CO: monóxido de carbono CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono e<sup>-</sup>: electrón H<sup>+</sup>: ion hidrógeno H<sub>2</sub>: hidrógeno H<sub>2</sub>O: agua O<sub>2</sub>: oxígeno OH<sup>-</sup>: ion hidroxilo

Fuente: Adaptado de [10].

### 3.2.1. Pilas de combustible alcalinas (Alcaline Fuel Cell o AFC)

El electrolito que utilizan este tipo de pilas es el KOH concentrado (85% en peso) para operaciones a alta temperatura (250 °C) y menos concentrado (35 - 50% en peso) para funcionamiento a temperaturas más bajas (≈ 120 °C). En la Fig. (3) se observa que el electrolito de KOH se retiene en un matriz y el Ni, Ag óxidos metálicos y metales nobles pueden ser utilizados como electrolizadores [19]. Una de las ventajas de las pilas AFC es su temperatura de funcionamiento generalmente entre 23 y 70 °C mientras que la desventaja que presenta es su líquido electrolito que reacciona con los bicarbonatos formados de dióxido de carbono y sales de carbonato [21].



**Figure 4**

*Pilas de combustible alcalinas (AFC). Fuente:* Adaptado de [22].

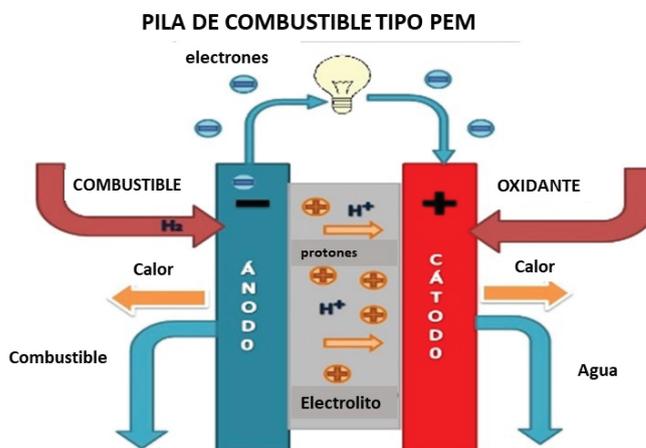
### 3.2.2. Pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (Proton Exchange Membrane o PEM)

Las celdas de combustible de intercambio protónico ("Proton Exchange Membrane" PEM) se muestra en la Fig. (4), permiten la obtención directa de electricidad en donde el combustible es el H<sub>2</sub> o una mezcla rica en gases en H<sub>2</sub>. En el ánodo las moléculas de H<sub>2</sub> pierden sus electrones y forman iones, los electrones pasan al cátodo por un circuito externo mientras que los iones del H<sub>2</sub> pasan por la membrana de intercambio protónico para unirse con las moléculas de O<sub>2</sub> produciendo agua y calor como subproductos [23].

Las ventajas de utilizar celdas de combustible de intercambio protónico (PEM) para obtener H<sub>2</sub>, es que no producen contaminación ni consumen recursos naturales; además, el agua producida tiene suficiente pureza para ser utilizada como agua potable. Una de las desventajas que presenta las PEM es que están económicamente



fuera del alcance de los consumidores y la velocidad de reacción es lenta lo que conlleva a tener corrientes y potencias pequeñas [23].

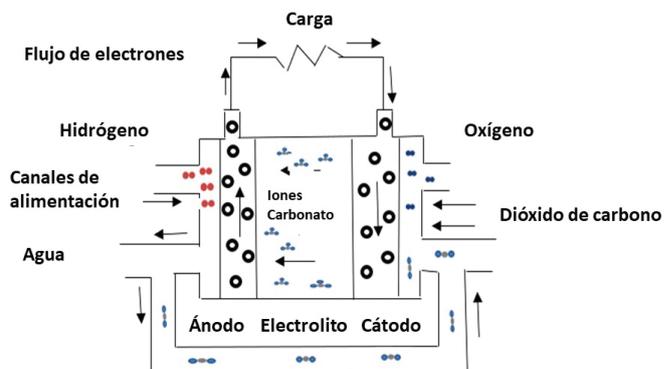


**Figure 5**

Membrana de electrolito de polímero o celdas combustible de membrana de intercambio de protones (PEM). Fuente: [24].

### 3.2.3. Pilas de combustible de ácido fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell o PAFC)

El electrolito que utilizan este tipo de pilas es de ácido fosfórico concentrado (~ 100%). El SiC se utiliza como matriz para retener el ácido es y el platino se utiliza como electrocatalizador tanto en el ánodo como en el cátodo [19]. Las pilas PAFC poseen aplicaciones estacionarias [21]; su geometría se muestra en la Fig. (7).

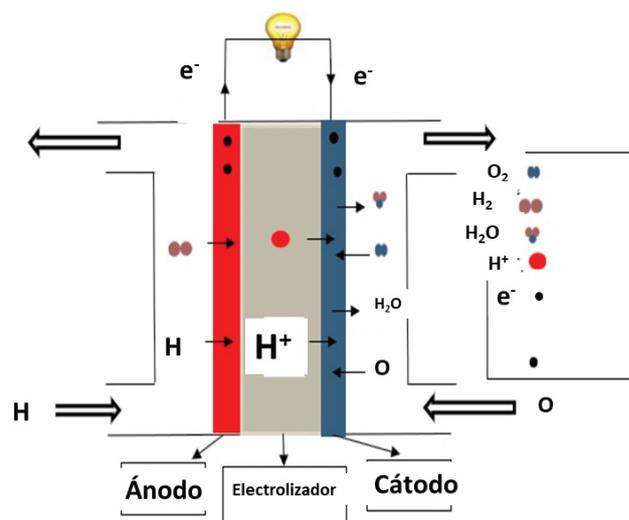


**Figure 6**

Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC). Fuente: Adaptado de [25].

### 3.2.4. Pilas de combustible de carbonato fundido (Molten Carbonate Fuel Cell o MCFC)

El electrolito está compuesto por una combinación de carbonatos alcalinos (Li, Na, K), que se retiene en una matriz cerámica de  $\text{LiAlO}_2$ , donde los carbonatos forman una sal fundida altamente conductora, con iones carbonato que proporcionan conducción iónica. Estas celdas de combustible que se muestran en la Fig. (6), iniciaron su etapa pre comercial para la generación de energía estacionaria en 2013 [19], y en la actualidad se utilizan en aplicaciones industriales [21].



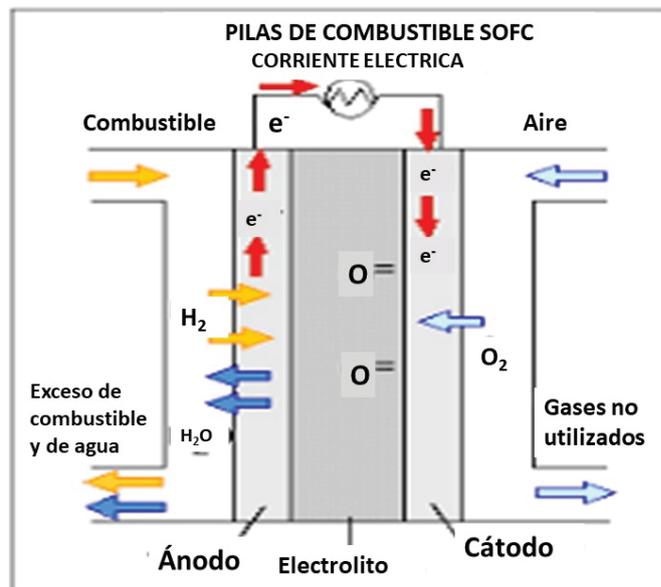
**Figure 7**

*Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC). Fuente:* Adaptado de [25] por [10].

### 3.2.5. Pilas de combustible de óxidos sólidos (Solid oxide fuel cell o SOFC)

El electrolito que usan estas celdas es un óxido metálico no poroso (buen conductor iónico) como el óxido de zirconio estabilizado con óxido de itrio. Las celdas SOFC operan entre  $900 - 1000^\circ\text{C}$ , temperatura a la que tiene lugar la conducción iónica de iones oxígeno. El ánodo es una mezcla de cerámico y metal,  $\text{Ni-ZrO}_2$ , el cátodo es una manganita de lantano dopada con estroncio o selenio; la geometría completa se muestra en la Fig. (7).

De acuerdo con la Asociación Española de Pilas de Combustible, (s.f), las SOFC presentan la posibilidad de trabajar a mayor densidad de corriente que las MCFC y sin problemas de corrosión, mientras que [21] indica que las pilas SOFC tienen la ventaja de



**Figure 8**

*Pilas de combustible de Óxidos Sólidos (SOFC). Fuente: [26].*

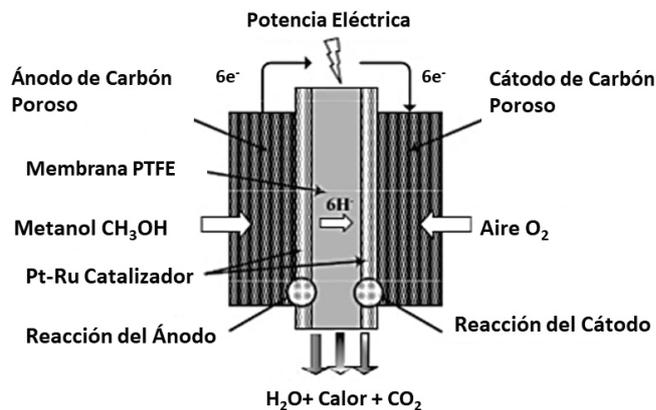
pertenecer a los combustibles flexibles adecuados para cualquier sistema combinado para la generación de hidrógeno, energía y refrigeración o calefacción pero considera que su alta temperatura de funcionamiento y mayor tiempo de arranque provoca la degradación de los componentes.

### 3.2.6. Pilas de combustible de Metanol Directo (Direct Methanol Fuel Cell o DMFC)

Las DMFC usan la misma membrana del polímero que las PEMFC como se muestra en la Fig. (8), pero en lugar del hidrógeno reformado como en el caso de los otros tipos de pilas, utiliza el metanol líquido como combustible. Las pilas DMFC son un tipo de celdas relativamente nuevas con los otros tipos de celdas de combustible por lo cual poseen una eficiencia del 40%, una menor densidad de potencia y eficiencia respecto a una PEMFC y su temperatura de operación es de 60 – 100 °C [27], [21].

## 3.3. Cambio climático, pilas de combustible y economía circular

Los artículos relacionados a este tema, tienen que ver con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS); se puede observar que las investigaciones se alinean a tres objetivos muy importantes: objetivo siete (energía asequible y no contaminante), once (ciudades y comunidades sostenibles), y trece (acción por el clima). [6, 8, 28, 7, 3, 29].



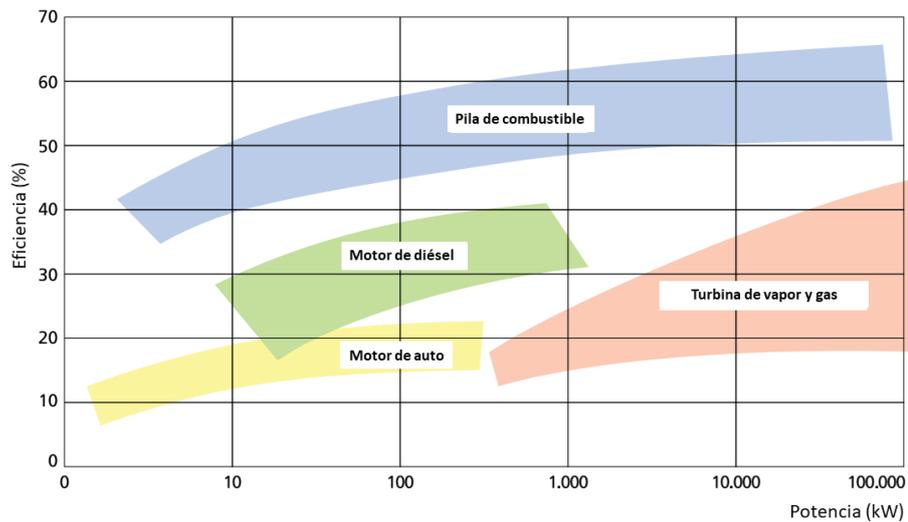
**Figure 9**

*Pilas de combustible de Metanol Directo (DMFC). Fuente: [27].*

La energía generada por los combustibles fósiles es muy fugaz, difícil de contener e ineficaz, por otro lado, los combustibles fósiles producen  $\text{CO}_2$  que provoca daños ambientales graves debido a la emisión incontrolada que no puede ser aprovechada en el proceso y es emitida al medio ambiente [30]. Un motor de combustión tan solo puede aprovechar entre el 30 al 40% de la energía de los combustibles fósiles y transformarla en electricidad. Los motores de un automóvil poseen una eficiencia entre el 15 al 20%, todo lo restante se disipa en calor y en ruido que produce un automóvil. Una alternativa muy eficiente que resuelva a todos estos problemas son las pilas de combustible de hidrógeno tal como se muestra en la Fig. (9) debido a que poseen una eficiencia entre el 40 al 65% y al tratarse de un proceso circular, es la mejor propuesta para generar energía limpia [31].

Las pilas de combustible presentan un modelo de uso de energía sostenible cuando utilizan hidrógeno verde. El ciclo inicia con la producción de hidrógeno mediante el proceso de electrolización con el exceso de energía proveniente de fuentes solares, eólicas, u otras renovables. Cuando es necesario, el hidrógeno se usa para la producción de energía, sin generar emisiones contaminantes; el vapor de agua resultante puede ser condensado y circulado nuevamente en el sistema creando un modelo alineado a la economía circular.

Para evitar la instalación de un electrolizador y un sistema de pilas de combustible dentro del mismo sistema, se ha desarrollado las pilas de hidrógeno reversibles. Este tipo de pilas son del tipo PEMFC, si se hace fluir corriente a través de ellas funcionan como un electrolizador, y si se hace fluir hidrógeno y oxígeno a través de las tuberías correspondientes generan electricidad; no pueden realizar el proceso simultáneamente sino uno a la vez.



**Figure 10**

*Eficiencia de las pilas de combustible. Fuente:* [31].

### 3.4. Aplicaciones de las pilas de H<sub>2</sub> para recuperar H<sub>2</sub>O

La recuperación y el reciclaje de agua como una iniciativa muy importante para los sistemas de energía de pilas de combustible. Hoy en día existe un gran avance tecnológico para recuperar y reciclar agua; no es suficiente con obtener energía, también ha nacido la necesidad de recircular el agua utilizada en el proceso. Para lograr recuperar y reciclar agua en una pila de combustible de H<sub>2</sub>, se puede utilizar algunos métodos: condensadores, sistemas de enfriamiento, y atrapanieblas [32]. Si bien es cierto, el agua es un recurso renovable, debido al mal uso del ser humano este recurso es cada vez más escaso y vulnerable.

El acceso a reservas de agua dulce y limpia es un problema muy importante al que se enfrenta la humanidad [33]. Según las Naciones Unidas, el agua insalubre mata a más personas en todo el mundo que la misma guerra. La Tierra, que comprende un sinnúmero de formas de vida, en pleno siglo veintiuno sufre una grave crisis del agua [34]. La necesidad de abastecer a todos los seres vivos de este recurso vital ha llevado al ser humano a lograr varios proyectos de recuperación y obtención de agua, consiguiendo soluciones creativas y a un costo asequible [35].

Para una pila de combustible de H<sub>2</sub> con alta eficiencia, la idea de recuperar vapor de agua y emplearla nuevamente en el proceso presenta varias ventajas; el uso de un intercambiador de calor y de unidades condensadoras, a menudo tienen que ser desarrolladas exclusivamente para esta aplicación [36]. Las pilas de combustible tienen trampas de vapor, tanques y un conjunto de enfriamiento adaptadas que permiten



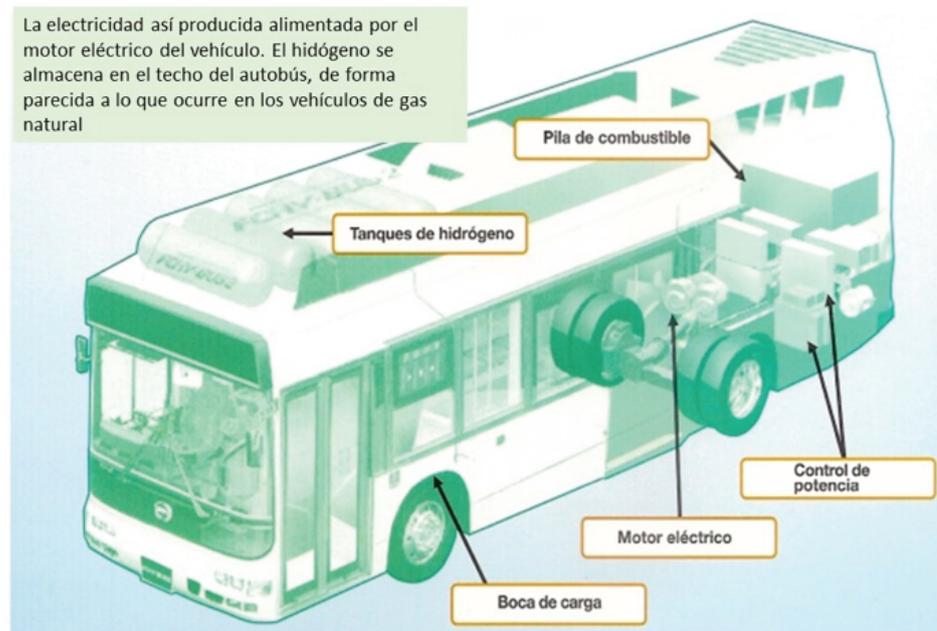
recibir el escape y recuperar porciones de agua. Al hablar de contaminantes que pueden alterar el funcionamiento de la pila se debe tener más cuidado con los inorgánicos de otra forma sería necesario la implementación de un sistema de purificación en la pila de combustible [32, 36]. Entre los sistemas que permiten recuperar agua en las pilas de combustible se tiene:

1. En 2014 se presentó un prototipo para recuperar agua de una pila de combustible, el cual consistía en adaptar un sistema de enfriamiento en el escape del cátodo: en primera instancia se inyecta agua de pulverización, la cual condensa el vapor de agua, con la ayuda de un elemento de separación, se separa una primera porción de agua y gracias a una purga se eliminan los contaminantes no volátiles de dicho escape de cátodo, esta primera porción de agua es reciclada y es utilizada como agua de pulverización. En un segundo sistema de enfriamiento que recibe el escape del cátodo limpio, se condensa la segunda porción de agua. Debido a que el agua recuperada posee una alta pureza es utilizada en el proceso electroquímico [32].
2. En 2018 se elaboró un prototipo para la obtención de  $H_2$  mediante la electrólisis del agua utilizando energía renovable como alternativa energética, la construcción del prototipo constaba de cuatro componentes: un generador eléctrico alimentado por una fuente renovable en este caso energía eólica y energía solar fotovoltaica, un electrolizador, un panel de control y un medidor de producción de  $H_2$  [37]. En el mismo año por motivos económicos se desarrolló un prototipo que reemplazó el agua desmineralizada por agua potable a temperatura y presión ambiente; este prototipo a diferencia del anterior constaba de un desagüe que era un cilindro de acrílico que se encargaba de condensar el vapor de agua [20, 38].
3. Actualmente, la Estación Espacial de la NASA, utiliza pilas de combustible para producir agua potable y electricidad para la tripulación [39, 40].

### 3.5. Aplicaciones de las pilas de $H_2$ para vehículos

Los vehículos eléctricos que funcionan en base a pilas de combustible de hidrógeno han recibido una gran atención en todos los sectores del transporte [41]. En 2010, un primer prototipo de bus con 29 asientos que funciona en base a la energía del hidrógeno fue presentado en Brasil; la potencia de la pila de combustible utilizada fue 77,2 kWe [10, 39].

Grandes empresas tales como Hyundai han iniciado la producción en masa de vehículos tales como el Tucson ix35 y Nexo (2018) con eficiencias que alcanzan hasta



**Figure 11**

Prototipo de bus. Fuente: [30].

el 60%, un rango de conducción de 415 km a 609 km y una durabilidad de hasta 10 años [41].



**Figure 12**

Hyundai Nexo. Fuente: [42].

En octubre de 2020, la empresa ZeroAvia completó el primer vuelo en un avión de pasajeros utilizando pilas de combustible; el vuelo duró ocho minutos, y se alcanzó una altitud de 300 metros con una velocidad de 185 km/h [43].

Aplicaciones adicionales que incluyen la fabricación de pilas de combustible portátiles y trenes han sido desarrollados por Toyota y la Universidad de Birmingham. [43] Existen también submarinos que funcionan con pilas de combustible con una potencia eléctrica total de 300kW. El  $H_2$  se almacena como sólido en un compuesto



**Figure 13**

*Avión utilizando pilas de combustible. Fuente: [44].*

de hidruro metálico; el agua que se produce a partir del combustible se puede utilizar como agua cruda a bordo del submarino [45].



**Figure 14**

*Submarino utilizando pilas de combustible. Fuente: [46, 47].*

Los scooters y las bicicletas pueden ser un mercado importante para las tecnologías de pilas de combustible, particularmente en los países en desarrollo. A pesar de los estrictos requisitos en relación con el peso, el tamaño y el bajo costo, las celdas de combustible se han empleado en varios scooters y bicicletas. El requisito de potencia es considerablemente menor que el de los automóviles: hasta 3 kW para los scooters y unos cuantos vatios para bicicletas [48].



**Figure 15**

*Bicicleta con pilas de combustible tipo PEM. Fuente: [46].*

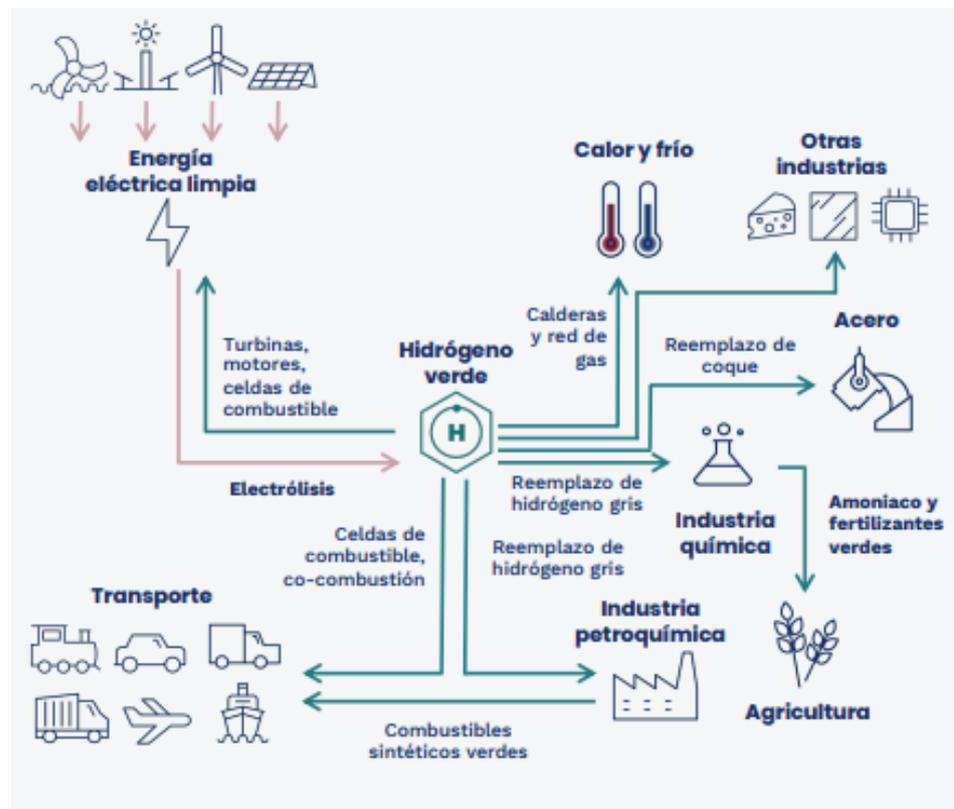
### 3.6. Potencial de descarbonización del H<sub>2</sub> verde

Debido a la velocidad del cambio climático y los impactos que este provoca, es necesario que se disminuya la cantidad de gases de efecto invernadero que proceden del transporte, ciudades y de la obtención de energía.

Las características fundamentales del hidrógeno verde es la capacidad para almacenar el excedente generado por energías renovables que garantiza el suministro energético con una mayor generación eléctrica que las energías renovables convencionales, el hidrógeno puede brindar la posibilidad de ser transformado en varias formas de energía como: gas sintético o calor, electricidad lo que se traduce para aplicaciones industriales y movilidad, finalmente otra de las características es que puede ser utilizado en sectores clave que no tienen opciones obvias de descarbonización en la industria intensiva en procesos con altas temperaturas y el transporte de mercancías [12].

Se estima que para el año 2050 el uso de energía renovable, electrólisis y la necesidad de descarbonizar todos los sectores de las economías ayuden a las matrices energéticas y económicas del mundo a lucir más verdes [13].

El cambio climático en conjunto con una economía basada en pilas de hidrógeno sería la respuesta perfecta para hablar de sostenibilidad en el sector energético, ya que existiera una reducción muy significativa del 70% al 80% de emisiones CO<sub>2</sub> y un 20 % gases de efecto invernadero, esta iniciativa se ve reflejada en la posibilidad de regeneración de la atmósfera para mejorar la calidad del aire, todas estas características se pueden lograr gracias a la ausencia de carbono en un combustible a base de H<sub>2</sub>, sin



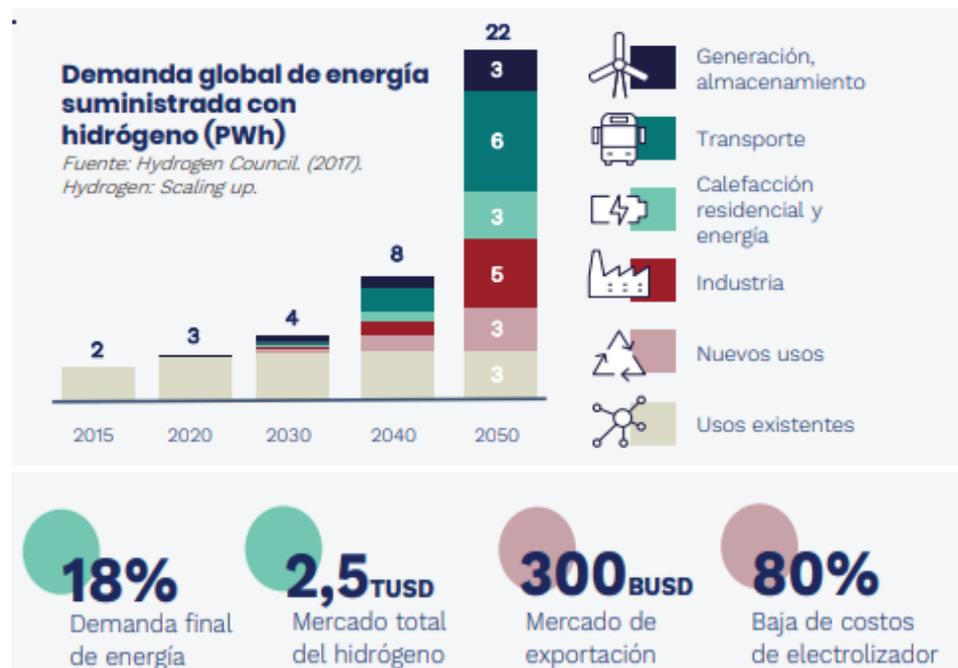
**Figure 16**

*Potencial de descarbonización de H<sub>2</sub> verde. Fuente:* [13].

embargo para que las pilas de combustible de H<sub>2</sub> se convierta en un vector energético de sostenibilidad se debe implementar condiciones apropiadas para su: obtención, almacenamiento, distribución y producción. Si nos enfocamos en el ámbito social los sistemas energéticos deben poseer un costo asequible cumpliendo necesidades específicas para poder salir al mercado, como son: atenuar los efectos del cambio climático, frenar la producción de contaminantes tóxicos, y por último hacer frente a la escasez de reservas de petróleo [49].

## 4. Conclusiones

A través del uso de pilas de combustible se puede obtener hidrógeno verde de forma eficiente, el hidrógeno es un excelente portador de energía, al no ser un elemento tóxico se puede renovar con gran facilidad, el hidrógeno verde satisface las necesidades de electrificación y descarbonización en áreas como: la industria, el transporte pesado, aeronáutica; por lo que su uso no implica la liberación de gases de efecto invernadero.



**Figure 17**

*Demanda global de energía suministrada con hidrógeno. Fuente:* [13].

La quema de combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) es uno de los factores más determinantes en el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera; una alternativa para mitigar el cambio climático es la utilización de energía renovable como por ejemplo la energía proveniente del  $\text{H}_2$ , ya que se lo utiliza como puente en la transformación de unos tipos de energías en otros, con el objetivo de crear una economía circular que se base en tres principios: eliminar residuos; conservar artículos y materiales en uso, y restablecer sistemas naturales.

La idea de frenar el cambio climático y crear un ambiente sostenible, ha llevado al ser humano a innovar sistemas de energía limpia y asequible como lo son las pilas de combustible, las cuales son llamativas para usos avanzados por su alta eficiencia y respuesta rápida, como subproducto se obtiene vapor de agua por lo tanto se habla de cero emisiones al medio ambiente, de esta forma se puede aportar a la descarbonización del mundo.

El reciclaje de agua en una pila de combustible presenta una alternativa muy importante, ya que se puede reutilizar el agua recuperada en el mismo proceso electroquímico; si se habla a nivel industrial, la energía obtenida a partir del  $\text{H}_2$  no solo puede abastecer de este recurso a una localidad, sino que también puede generar agua potable, de esta forma se satisface las dos necesidades más importantes del ser



humano, convirtiéndose en una opción factible y aplicable en zonas donde existe escasez hídrica.

La aplicación de pilas de H<sub>2</sub> para vehículos tiene un gran potencial en descarbonizar el sector del transporte, ya que contribuye a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, existen varias alternativas funcionales como son vehículos terrestres, aéreos, submarinos y naves espaciales; que han mejorado la calidad de vida del ser humano y del entorno que lo rodea.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, y al Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC) por permitir la realización del presente trabajo de investigación.

## References

- [1] Caicedo JDP. El clima de Colombia durante los siglos XVI-XIX a partir de material histórico. Parte I: Inventario de fuentes de información. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía. 2006;(15):75–92.
- [2] Postigo JC, Chacón P, Geary M et al. Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas: Una vinculación necesaria. ICAL, Santiago de Chile, 2013.
- [3] Nullis Clare. El clima mundial: Entre 2015 y 2019 se ha acelerado el cambio climático. Organización Meteorológica Mundial; Ginebra, 2019.
- [4] Gómez GK, Bernal JR, Escobar DBR. Clean and sustainable production: An analysis to the renewable energy sources. Repositorio Institucional Universidad del Sur de California; Wind Energy, California, 2019.
- [5] Moratilla B, Linares J. El hidrógeno y la energía. Revista Dialnet, España, 2007.
- [6] Martins Alejandra. Cambio climático – Desarrollo sostenible. BBC News Mundo; 13 agosto 2018 agosto 13. Available from: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-58191363>
- [7] Peng L, Wei Z. Catalyst engineering for electrochemical energy conversion from water to water: Water electrolysis and the hydrogen. Fuel Cell. Revista Elsevier - Engineering. 2020;6(6):653–679. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.028>



- [8] Ferroukhi R, Gielen D, Press E. Post-covid. International Renewable Energy Agency; Abril, 2020. Available from: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA\\_Post-COVID\\_Recovery\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Post-COVID_Recovery_2020.pdf)
- [9] Cerdá E. Economía circular, estrategia y competitividad empresarial economía circular. Revista Dialnet, España, 2015.
- [10] Miranda S, Quishpi N. Recuperación de agua del proceso electroquímico en la producción de hidrógeno verde. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; Ecuador, 2021.
- [11] Abad VA, Dodds PE. Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. Energy Policy. 2020;138(Aug): <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>
- [12] Newsletter UFG. Energía renovable. Unionfenosagas; 2020 junio 12. Available from: <https://www.unionfenosagas.com/es/Newsletter/NoticiaNewsletter/gas-renovable-hidrogeno-verde?p=ENERO2020#:~:text=El hidrógeno renovable%2C también conocido, electricidad producida por fuentes renovables.>
- [13] Correa MA, Barría CQ, Maluenda BP. Hidrógeno verde. Energia; 2020 Noviembre. Available from: [https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia\\_nacional\\_de\\_hidrogeno\\_verde\\_-\\_chile.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf)
- [14] Santiago O. Tipos de pilas de combustible y su clasificación. Apilados; 2016 octubre 16. Available from: <http://apilados.com/blog/tipos-de-pilas-de-combustible-su-clasificacion/>
- [15] Cesar N. Electricidad producida por fuentes renovables. 2010 mayo 19. Available from: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/31904>
- [16] Electrolysis. Electrólisis del agua. Wikimedia Commons; 2010 julio. Available from: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrolysis.svg>
- [17] Sánchez J. Electrólisis del agua. Física y Química; 2012 abril 26. Available from: <http://elfisicoloco.blogspot.com/2015/04/electrolisis-del-agua.html>
- [18] Coleman D, Kopp M, Wagner T, Scheppat B. The value chain of green hydrogen for fuel cell buses – A case study for the Rhine-Main area in Germany. International Journal of Hydrogen Energy. 2020;45(8):5122–5133. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.163>
- [19] Barbir F. PEM fuel cells - Theory and practice. Elsevier, 2013 febrero 12. Available from: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPEMFCTP3/pem-fuel-cells-theory/pem-fuel-cells-theory>



- [20] Asensio P, Rodriguez LAC, Sánchez MEG, Universidad Nacional del Nordeste - Argentina. Hidrógeno y pila de combustible. Fundación de La Energía de La Comunidad de Madrid; Milagro, 2011.
- [21] Ruiz A. La pila de combustible y sus tipos. Tecpa; 2020 enero 25. Available from: <https://www.tecpa.es/pila-combustible/>
- [22] Ring D. Pila de combustible alcalina. Wikimedia Commons; 2007 febrero 06. Available from: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alkalinecell.svg>
- [23] Monti PI. Facultad de ciencias químicas y farmacéuticas. Anales de La Universidad de Chile. 2010;(12):1–80. <https://doi.org/10.5354/0365-7779.2000.2522>
- [24] Amalia S. PEM fuel cell. Wikimedia Commons; 2014 julio 05. Available from: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PEM\\_fuel\\_cell\\_diagram.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PEM_fuel_cell_diagram.jpg)
- [25] Hidalgo I. Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC). Slideshare, España, 2013. Available from: <https://es.slideshare.net/InmaHidalgoGarca/mcfc>
- [26] Ingenieros. Pilas de combustible con óxido sólido, una alternativa en estudio. Ingenieros; 2014 julio15. Available from: <https://www.ingenieros.es/noticias/ver/pilas-de-combustible-con-oxido-solido-una-alternativa-en-estudio/4810>
- [27] Gonzales-Longatt F. Celdas de combustible - Sistemas de generacion distribuida. Academia, Buenos Aires, 2016. Available from: <https://www.slideshare.net/fglongatt/capitulo-24-celdas-de-combustible-sistemas-de-generacion-distribuida>
- [28] Fuelcell. Pilas de combustible. Wikimedia Commons; 2004 octubre 07. Available from: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fuelcell.en.JPG>
- [29] Wright VP. World energy outlook. World Energy Outlook, París, 2020.
- [30] Sharma S, Basu S, Shetti NP, Aminabhavi TM. Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy. Science of the Total Environment. 2020; 713: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>
- [31] Thames & Kosmos. Fuel cell X7 hydrogen powered car. LLC, Rhode Island, 2007.
- [32] Jahnke FC, Daly JM. System for capturing CO2 from a fuel cell. United States Patent No.10,608,272. 2020-03-31
- [33] Pascual JA, Naranjo MF, Payano R, Medrano O. Tecnología para la recolección de agua de niebla. Inclusiones, 2016;4(1):64–75.
- [34] UNESCO-WWAP. Agua para todos, agua para la vida. United Nations, Naciones Unidas; 2003. Available from: <http://www.un.org/esa/sustdev/sdissue2s/water/WWDR-spanish-129556s.pdf>



- [35] Cereceda P, Hernández P, Leiva J, Dios J. Editores: Agua de niebla. Dirección General de Aguas; Santiago de Chile, 2014.
- [36] Roychoudhury S, Mastanduno R. Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing - Balance of plant. Available from: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53563-4.10015-X>
- [37] Carlos J, Contreras M. Cambio climático y su impacto en el territorio. Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico, España, 2019.
- [38] Armijo VJI. Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua. Repositorio Académico de la Universidad de Chile, Chile, 2018.
- [39] Miranda PEV, Carreira E. Brazilian hybrid electric fuel cell. *Bus. Energy*. 2010;2(6):1–5.
- [40] Moratilla B, Linares J. El hidrógeno y la energía. Dialnet, España, 2007.
- [41] Li W, Long R, Chen H, Chen F, Zheng X, He Z, Zhang L. Willingness to pay for hydrogen fuel cell electric vehicles in China: A choice experiment analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;40:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.046>
- [42] Hyundai nexo. Marca. 2018 marzo 16. Available from: [https://www.marca.com/motor/modelos-coches/album/2018/03/16/5aabaf0b46163f60578b45cf\\_relacionados.html](https://www.marca.com/motor/modelos-coches/album/2018/03/16/5aabaf0b46163f60578b45cf_relacionados.html)
- [43] Fuel Cells Bulletin. HydroFLEX train in first UK mainline trial. *Fuel Cells Bulletin*. 2020;10: [https://doi.org/10.1016/s1464-2859\(20\)30442-9](https://doi.org/10.1016/s1464-2859(20)30442-9)
- [44] Economía sustentable. Avión de hidrógeno. *EconoSus*; 2020 Septiembre 24. Available from: <https://economiasustentable.com/noticias/asi-sera-el-avion-de-hidrogeno-mas-grande-del-mundo>
- [45] Pichonat T. Cells as promising power electronics. *Micro Fuel Cells. MEMS-Based Micro Fuel Cells as Promising Power Sources for Portable Electronics* 2009:51–97.
- [46] Barreras F, Lozano A. Hidrógeno. Pilas de combustibles de tipo PEM. Año internacional de la energía sostenible para todos. Estimation of Energy Payback Time Applied In Hydrogen Production For
- [47] Electricity Generation Purpose;19; 1-18. Academic Paper, Quito,2012.
- [48] Sevilla S. Submarino utilizando pilas de combustible. *TechnoloSEA*; 2014 marzo 10. Available from: <https://www.infodefensa.com/es/2014/03/10/noticia-sener-presenta-sevilla-innovadora-combustible-submarinos.html>



- [49] Apostolou D. Assessing the operation and different refuelling cost scenarios of a fuel cell electric bicycle under low-pressure hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(43):23587–23602. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.071>
- [50] González QJR. *El hidrógeno como combustible alternativo en la producción de energía y su implementación en el transporte vehicular*. Ustatunja, Colombia, 2013.