

Análisis del desempeño de una celda combustible tipo membrana de intercambio protónico escala banco

Performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell bench scale

Leidy Lorena Méndez Álvarez* y Lyzed A. Toloza Blanco**

Cómo citar:

Méndez Álvarez, L. L., & Toloza Blanco, L. A. (2020). Análisis del desempeño de una celda combustible tipo membrana de intercambio protónico escala banco. *Ingeciencia*, 5, 143-158.

* Grupo de investigación Agua y Desarrollo Sostenible, línea de investigación en Tecnologías Ambientales. Universidad Central.

** Grupo de investigación Agua y Desarrollo Sostenible, línea de investigación en Tecnologías Ambientales. Universidad Central. Correo: ltolozab@ucentral.edu.co

Resumen

A pesar de la alta demanda global de energía, se recurre poco a opciones alternativas o renovables para satisfacerla, en comparación con el empleo de combustibles fósiles. Este trabajo analiza la operación y desempeño de una celda de hidrógeno tipo membrana polimérica de intercambio protónico (PEM), que en este caso consiste además en un módulo solar y un electrolizador. La celda de intercambio protónico tipo PEM conduce los protones de hidrógeno (H^+) para generar potencia, de manera que funciona como una tecnología híbrida que aprovecha la radiación solar. Aunque este prototipo de celda de hidrógeno escala banco demostró buen desempeño en las operaciones para su uso experimental, no podría suplir altas demandas energéticas con su configuración actual, pues aún se debe estudiar con mayor profundidad los mecanismos de conducción y aprovechamiento de la energía renovable en estas tecnologías. Con base en los resultados del estudio, se recomienda que Colombia aproveche los incentivos de leyes como la 1715 de 2014 para promover el uso del hidrógeno en dispositivos tecnológicos que exploten su potencial energético en el futuro.

Palabras clave: eficiencia, electrólisis, energía alternativa, hidrógeno, PEM.

Abstract

There is a high demand for energy worldwide, however, to satisfy the need to access the alternative energy sources is low in comparison with fossil fuels. This work covers the understanding of the operation and performance of a hydrogen cell type proton exchange polymer membrane (PEM), which for this case consists of a team formed by a solar module, an electrolyser and a proton exchange cell type PEM, which drives the hydrogen protons (H^+) to generate the required power. Which works as a hybrid technology since it also takes advantage of solar radiation. This bench sized hydrogen cell, is a prototype that showed good performance thanks to the operation and achieved results according to different practices and opening the opportunity to study the mechanisms of conduction and use of a renewable energy resource in these technologies. In Colombia, the promotion of laws such 1715/2014 promotes incentives to implementation alternative energy sources in power systems, providing opportunities to look to the hydrogen energy source's future to be exploited by technological devices which take advantage of all their energetic potential.

Keywords: alternative energy sources, efficiency, electrolysis, hydrogen, PEM.

1. Introducción

Una de las preocupaciones globales actuales es satisfacer la creciente demanda de energía de la agenda del siglo XXI. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2013), a pesar de la alta demanda de energía que hay en el mundo, se recurre poco a opciones alternativas o renovables para satisfacerla, en comparación con el empleo de combustibles fósiles. La interrupción del equilibrio ecológico por los combustibles fósiles y su inminente agotamiento hacen que la demanda de energía sea un problema de urgente resolución para toda la humanidad, de modo que los países necesitan encontrar fuentes de energía nuevas, limpias y renovables. Por consiguiente, se deben desarrollar tecnologías nuevas y eficientes para estas fuentes (Apak *et al.*, 2017).

En contraste, la generación de energía a partir de combustibles fósiles, carbón y gas natural ocupan el 82% de la producción energética actual del mundo, mientras que solo el 14% lo proveen las fuentes de energía renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa, entre otras (Moreno & Vargas, 2013). Las celdas de combustible son otro ejemplo de energía respetuosa con el medio ambiente, debido a su funcionamiento libre de ruido y alta eficiencia, además de que como subproducto generan solo H₂O (Potosí-Guerrero *et al.*, 2016).

El objetivo de este estudio fue descifrar el funcionamiento y mecanismo de operación de una celda de combustible de hidrógeno tipo membrana polimérica de intercambio protónico (PEM) escala banco modelo (ECO H₂/O₂) para analizar su eficacia en la generación de energía eléctrica a partir de una fuente renovable, entender sus principios de uso aplicando las leyes de Faraday. Así mismo, analizar la situación del hidrógeno como posible combustible para la generación de energía en Colombia.

Reconociendo la importancia de encontrar nuevas fuentes de energía alternativa y renovables, este trabajo aprovecha una tecnología híbrida de celda combustible, la cual se alimenta de energía solar para generar energía a partir de la electrólisis del agua, lo cual ocurre en el electrolizador. Así se supera esta etapa restrictiva en el costo de la energía a partir de hidrógeno aprovechado en la celda PEM.

En este sentido, la fusión de dos fuentes renovables, la energía solar y la del hidrógeno, en un solo dispositivo hacen de este trabajo un referente de este tipo de aplicaciones en la ingeniería, pues en la actualidad se busca el uso de tecnologías híbridas que permitan aumentar las eficiencias de operación de estas celdas de combustible. A escala, se podría pensar que el abastecimiento de agua para producir hidrógeno también provenga de un proceso no convencional, como la desalinización de agua de mar, de manera que se podría usar fuentes de agua fresca o desalinizarla para realizar la electrólisis. En este sentido, si se usa el agua de mar y se diseñan electrodos y electro-catalizadores a bajo costo que puedan resistir la corrosión implícita, se puede proveer una solución a escala para superar las barreras actuales (Lara, 2020).

Por consiguiente, se busca aprovechar la luz solar para generar energía eléctrica en el electrolizador de la celda y, a partir de la electrólisis del agua, cuyas reacciones se muestran en las tabla 1 y 2, promover la producción de energía química que es aprovechable en la celda de intercambio protónico y de esta forma producir la potencia necesaria para aplicar la energía requerida en la hélice.

Tabla 1. Reacciones de electrólisis en el electrolizador

Reacciones	Lugar de reacción
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2$	Ánodo
$4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$	Cátodo
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	Reacción total

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Reacciones de electrólisis en la celda

Reacciones	Lugar de reacción
$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	Ánodo
$4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Cátodo
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Reacción total

Fuente: elaboración propia.

2. Metodología

El equipo con el cual se realizó el proyecto es una celda de combustible $\text{ECO H}_2/\text{O}_2$ de la empresa H-Tec, adquirido por el programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central, el cual consiste en un sistema compacto que está formado por un panel solar, un electrolizador, dos tanques de almacenamiento de gas oxígeno (O_2) e hidrógeno (H_2), una celda de combustible de electrolito tipo membrana de intercambio protónico (PEM) y una hélice (figura 1).

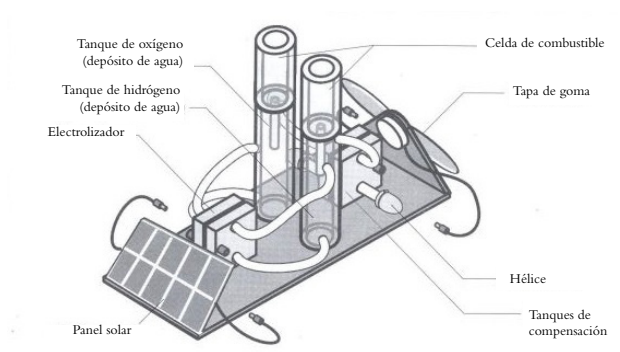


Figura 1. Esquema de la celda y sus respectivas partes.

Fuente: Hoeller *et al.* (2005).

El trabajo consistió en interpretar los fenómenos fisicoquímicos y eléctricos que ocurren cuando opera la celda de hidrógeno. Para esto se siguieron las medidas de seguridad indicadas en el manual, sin exceder el voltaje máximo de operación de 2 voltios. En concreto, se realizaron ensayos con la celda de hidrógeno en condiciones ambiente, utilizando agua desionizada con una conductividad promedio de $74 \mu\text{S}/\text{cm}$, una temperatura ambiente de 20°C y presión atmosférica de 560 mmHg , correspondiente a la ciudad de Bogotá. Como fuente de energía se usó la luz solar natural, que en la ciudad de Bogotá se encuentra en un rango de $3,8\text{--}4,5 \text{ KWh}/\text{m}^2$ de irradiación media diaria anual, según datos reportados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2015).

2.1 Prácticas realizadas con la celda de hidrógeno

En el equipo se pueden hacer diversas prácticas, pero se eligieron cuatro descritas en los manuales y se adaptaron a los recursos y equipos de medición que tiene el Laboratorio de Aguas de la Universidad Central. En todas las pruebas se inició con el procedimiento de arranque de la celda en la forma como se describe en la figura 2. Las prácticas realizadas se describen en los siguientes apartados.

2.1.1 Estimación de la curva de potencia característica y eficiencia del panel solar

Se realizó una prueba solo conectando el módulo solar con la fuente de energía para medir cuánto voltaje (V) y corriente (I) generó el panel en el tiempo mientras se encontró expuesto a la fuente de radiación. Para esto se usó un multímetro y un luxómetro para estimar la iluminancia emitida. En este ensayo se calculó la potencia entregada por el panel y su eficiencia (η), según las ecuaciones 1 y 2.

$$P [\text{W}] = I \cdot V \quad \text{Ecuación 1, Potencia generada (P).}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad \text{Ecuación 2, Eficiencia.}$$

2.1.2 Voltaje-corriente característicos del electrolizador

Para tomar los datos se realizó el montaje y arranque de la celda. Luego, en el momento en que se encendió la lámpara o se expuso a la luz solar, se empezaron a registrar los datos de corriente y voltaje por medio de los multímetros con circuito cerrado para voltaje y circuito abierto para la corriente. A través de esta curva se esperó observar el momento en el que el voltaje superó cierto valor teórico de hidrólisis de agua de 1,23 voltios.

2.1.3 Voltaje-corriente característicos y curva de potencia de la celda PEM

Para registrar los datos se conectaron los multímetros de igual forma que se hizo en el electrolizador, una vez se inició el arranque de la celda, es decir, cuando se expuso el panel solar a una fuente de luz. Esto permitió tomar los datos de volumen de gas producido y la corriente generada en la celda, los cuales confirmaron la producción y conducción de iones de hidrógeno a través de la celda.

Este ensayo se realizó con el fin de verificar el desempeño del electrolizador durante el tiempo de operación de la celda, iniciando con el arranque de la celda y el contacto con

la fuente de energía. Asimismo, se registraron los valores para las variables de corriente y voltaje, y se evidenció la producción de hidrógeno y oxígeno generados durante la operación. Estos datos permitieron calcular la eficiencia de energía ($\eta_{\text{energía}}$) y la eficiencia de Faraday (η_{Faraday}) para el electrolizador. La ley de Faraday permitió relacionar la corriente y el volumen de gas teórico producido según la ecuación 5, y la eficiencia fue la relación entre el volumen teórico calculado de gas hidrógeno y el real consumido por la celda, el cual fue experimental, según la ecuación 4, donde los términos I: corriente (Amperio), t: tiempo (s), z: altura de columna de gas (cm), F: constante de Faraday (C/mol), p: densidad (g/cm³), T: temperatura (K), R: Constante de los gases (J/mol K).

2.1.4 Eficiencia de energía y eficiencia de Faraday de la celda PEM

Este ensayo se realizó con el fin de seguir el desempeño de la celda tipo PEM durante el tiempo de operación de la celda de hidrógeno tipo banco. Al principio se arrancó la celda expuesta con la fuente de energía, luego se conectaron las mangueras que transportan desde el tanque de almacenamiento de hidrógeno hacia la celda tipo PEM. Se aseguró el drenaje previo de la celda PEM abriendo la válvula de drenado del equipo. Se procedió a medir en simultáneo las variables de corriente y voltaje, así como el volumen de hidrógeno generado durante la operación. Estos datos permitieron calcular la eficiencia de energía mediante la ecuación 3, donde H: altura de la columna de gas, V: voltaje (voltio), I: corriente (Amperio), vol_{H₂}: volumen de hidrogeno(cm³), t: tiempo(s) y la eficiencia de Faraday para la celda tipo PEM.

$$\eta_{\text{energía}} = \frac{V \cdot I \cdot t}{\text{Vol}_{\text{H}_2} \cdot H \cdot I} \quad \text{Ecuación 3, Eficiencia de energía.}$$

$$\text{Vol}(\text{calculado}) = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z} \quad \text{Ecuación 4, Volumen calculado.}$$

$$\eta_{\text{Faraday}} = \frac{\text{Vol H}_2 \text{ (calculado)}}{\text{Vol H}_2 \text{ (consumido)}} \quad \text{Ecuación 5, Eficiencia de Faraday.}$$

De acuerdo con las partes de la celda de hidrógeno (figura 1), el procedimiento para iniciar la operación con la celda de hidrógeno se presenta en la figura 2.

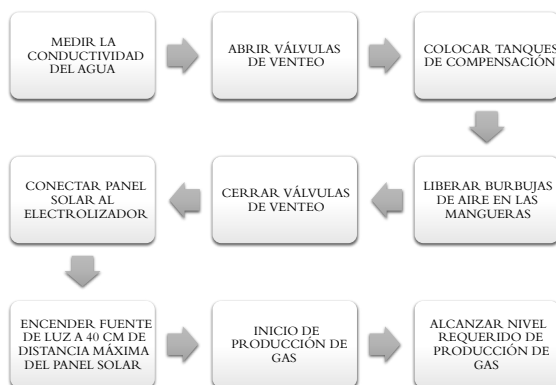


Figura 2. Diagrama de arranque de la celda de combustible.
Fuente: elaboración propia.

La celda empezó a operar y desde el primer minuto se inició la toma de medidas, prestando especial atención al voltaje experimental que se alcanzó cuando se produjo la primera burbuja de gas hidrógeno. Esto se evidenció en el tanque de almacenamiento, en el cual se vio el desplazamiento de aproximadamente un centímetro cúbico del agua almacenada en el tanque (figura 3). Además, la corriente y el voltaje se midieron por aparte para el electrolizador y luego para la celda PEM durante 35 minutos de operación. Estas medidas permitieron calcular la potencia generada en el equipo y posteriormente la eficiencia tanto del electrolizador como de la celda PEM.

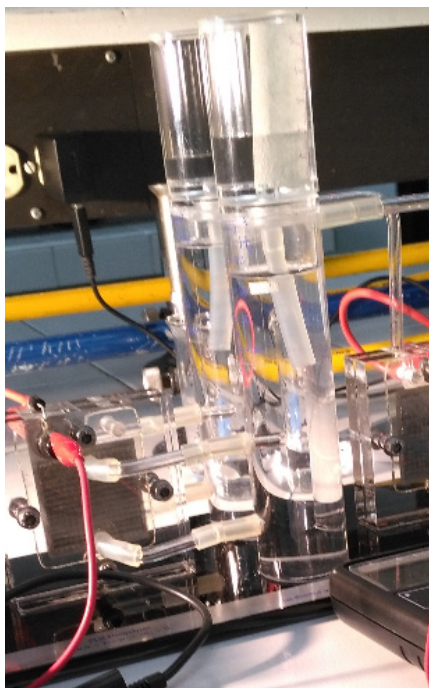


Figura 3. Tanques de almacenamiento de gas hidrógeno y oxígeno de la celda.
Fuente: elaboración propia.

2.2 Registro y tratamiento de datos

Se realizaron por triplicado las cuatro prácticas propuestas con la celda de hidrógeno, para las cuales se registraron las variables de volumen de producción de gases, así como las corrientes y los voltajes generados en el tiempo de operación para cada práctica (tabla 3).

Para cada terna de datos se calculó el coeficiente de variación (CV), el cual es la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2008). Así se estableció el criterio de que para bajos CV es correcto realizar los cálculos con los valores promedio de las variables: corriente (I) y voltaje (V).

3. Resultados

La generación de hidrógeno gaseoso se logró por el funcionamiento de la celda combustible, en la cual ocurre la electrólisis. En este proceso se descompone el agua en iones de hidrógeno y oxígeno, lo cual genera un voltaje de disociación, que teóricamente corresponde a 1,23 voltios (Hoeller *et al.*, 2005).

Para el electrolizador se obtuvieron los valores de corriente y voltaje para ensayos por triplicado, con base en los cuales se elaboró la curva característica de corriente-voltaje (figura 4). Todos los ensayos tienden a un valor máximo aproximado a 1,45 voltios, correspondiente al valor experimental del voltaje de disociación del agua según los resultados de la tabla 3. Por consiguiente, el voltaje experimental de disociación del agua fue mayor que el teórico, pues para este tipo de celda estos sobrevoltajes o sobrepotenciales significan pérdidas e ineficiencias en el proceso electrolítico que ocurre en el electrolizador. Estas ineficiencias se pueden deber a que la membrana haya tenido perturbaciones por la cantidad de agua que se transporta en la celda, ya que poca o demasiada agua influye negativamente en su desempeño, lo cual se verifica con los resultados experimentales.

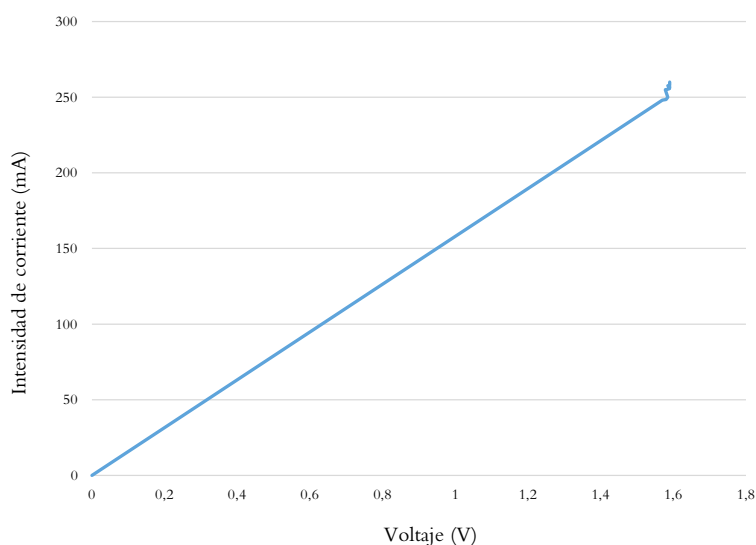


Figura 4. Curva característica de voltaje-corriente en el electrolizador.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resultados de mediciones principales y coeficientes de variación (CV)

	Panel solar		Electrolizador		Celda PEM	
	V	I	V	I	V	I
Promedio	2,12	0,30	1,45	57,62	0,77	39
Desviación estándar	0,27	0,12	0,01	0,97	0,26	7,60
Coefficiente de variación	13%	39%	1%	2%	34%	20%

Fuente: elaboración propia.

Además, debido a que el electrolizador está elaborado con aleaciones de iridio, ocurre una reacción de oxidación de cuatro electrones de agua a oxígeno en el ánodo, según la reacción uno de la tabla 1. Estas aleaciones son actualmente la mejor técnica para llevar a cabo esta oxidación, así el sobrevoltaje se establece por encima del valor teórico necesario para el rompimiento de la molécula de agua equivalente a 1,23 voltios.

Con radiación solar como fuente de energía para la celda de hidrógeno se obtuvo una eficiencia del 85%, lo cual significa que esta energía es almacenada en el gas hidrógeno como potencial para su mecanismo de difusión y promoción de protones a través de la celda combustible. El porcentaje restante se asocia a pérdidas en el electrolizador. Esto es similar al resultado de la eficiencia de Faraday, que fue igual a 84%, la cual relaciona el volumen de gas hidrógeno producido por la operación del electrolizador mediante la electrólisis del agua y el volumen teórico de gas calculado por medio de ecuaciones de estado (ecuación 4).

En el caso de la celda tipo PEM, se realizaron tres réplicas para la operación con luz solar y se calculó un promedio para la curva característica de corriente y voltaje (figura 5); los resultados de la curva voltaje-corriente para la fuente de luz solar presentaron una tendencia creciente con el tiempo.

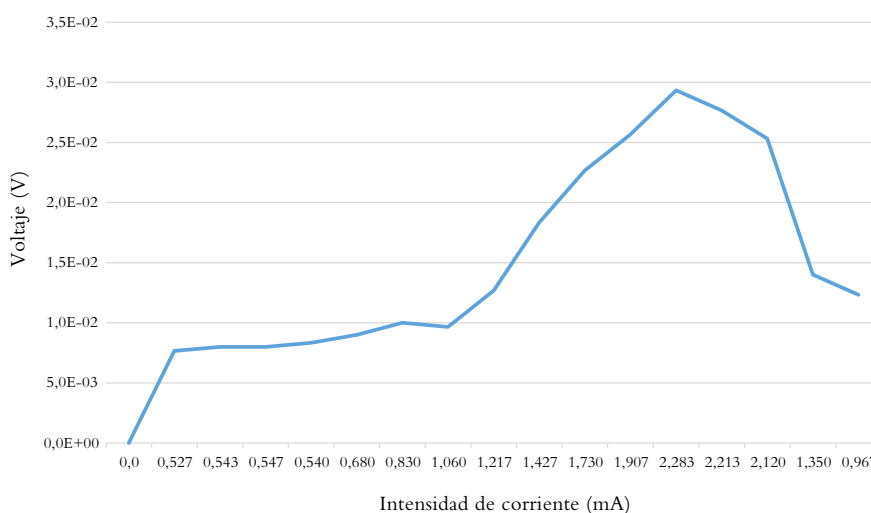


Figura 5. Curva característica de voltaje-corriente de la celda de combustible con fuente de luz solar.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que la eficiencia operativa es de 28,68% y la de Faraday de 58,87% con radiación solar, cuya iluminancia en Bogotá es de 15,7lux, según las mediciones que se hicieron con un luxómetro. Si bien estos ensayos se realizaron en días soleados, cuando hubo nubosidad, la operación de la celda se interrumpió y generó tiempos con falta de producción de gas.

Se obtuvieron valores próximos a las eficiencias de Faraday reportadas en la literatura para estos dispositivos, que son de alrededor de 50%-60%. Estos resultados son muy satisfactorios y revelan una oportunidad real para este tipo de energías no convencionales, por cuanto constituyen una alternativa para responder a la crisis que se vive por

la dependencia a combustibles fósiles, lo cual hace necesario que se implementen otras fuentes de energía renovables como el hidrógeno.

En cuanto al bajo rendimiento operativo que evidenciaron los resultados de la celda, esto se puede deber, entre otros factores, al transporte del agua, que promueve fenómenos de inundación de la membrana, es decir, la acumulación de exceso de agua en el lado del ánodo o en el del cátodo de la membrana, pero sucede sobre todo en este último (Schmittinger & Wolfgang, 2008).

Cuando esto ocurre, el agua bloquea los poros de la capa de difusión de la celda e impide que los reactivos lleguen a los catalizadores, lo cual debilita el gas y produce una caída inmediata del potencial en la celda. Demasiada agua también agrava otros mecanismos de degradación, como la corrosión y la contaminación de los componentes (Schmittinger & Wolfgang, 2008). En este sentido, es importante que haya una buena gestión del agua, pues si la membrana está seca, o no contiene suficiente cantidad de agua, la conductividad decrecerá hasta cero (Mayandía, 2009). En otras palabras, poca o demasiada agua genera complicaciones en el rendimiento de la celda. Ahora bien, es más probable que la deshidratación de la membrana ocurra en el lado del ánodo de la membrana, con la disminución del contenido de agua. Como consecuencia, la conductividad disminuye, lo que produce una mayor resistencia iónica y mayores pérdidas (Schmittinger & Wolfgang, 2008).

El electrolito es muy importante en este tipo de dispositivo —de ahí es donde deriva su nombre—, pues la membrana tipo Nafion es la que permite el intercambio de protones H^+ a través de ella y los electrones que retiene. Por esta razón la conductividad en la membrana es clave en el rendimiento, de modo que comercialmente la más utilizada es Nafion®, de DuPont, que consiste en una resina termoplástica que es relativamente estable, química y térmicamente, debido a su composición perfluorada. Se ha demostrado que las membranas de tipo Nafion son duraderas mientras se usan para el intercambio iónico o la electrólisis, además alcanzan altos promedios de duración en horas y una larga vida útil (Schmittinger & Wolfgang, 2008). El valor de la conductividad de la membrana Nafion comercial es de 8,3 S/m a 20 °C (Liu *et al.*, 2016).

4. Discusión

4.1 Relación entre la conductividad del agua y la difusión del ion hidrógeno

Todos los ensayos se realizaron con agua desionizada para garantizar el potencial de difusión en la celda de intercambio protónico. Si no se cuenta con un agua baja en contenido mineral, la membrana se tornaría un medio altamente resistivo para la conducción de los protones de hidrógeno y se generaría un gradiente de potencial de difusión menor. En este caso se debe trabajar con agua con conductividad iónica muy baja para garantizar que la difusión protónica del hidrógeno sea viable a través de la membrana.

La electrólisis del agua genera los protones de hidrógeno, que son conducidos en el ánodo. La conductividad es atribuida a la movilidad de los protones hidratados (H_3O^+) como portadores de carga. El oxígeno es conducido hacia el cátodo, que se reduce y forma agua (Toloza, 2011). El agua es transportada a través de la membrana desde el ánodo al cátodo

por arrastre electro-osmótico, por ejemplo, por un flujo de agua asociado con la corriente protónica producida por la difusión del ion H^+ (figura 6) (Altamirano, 2003).

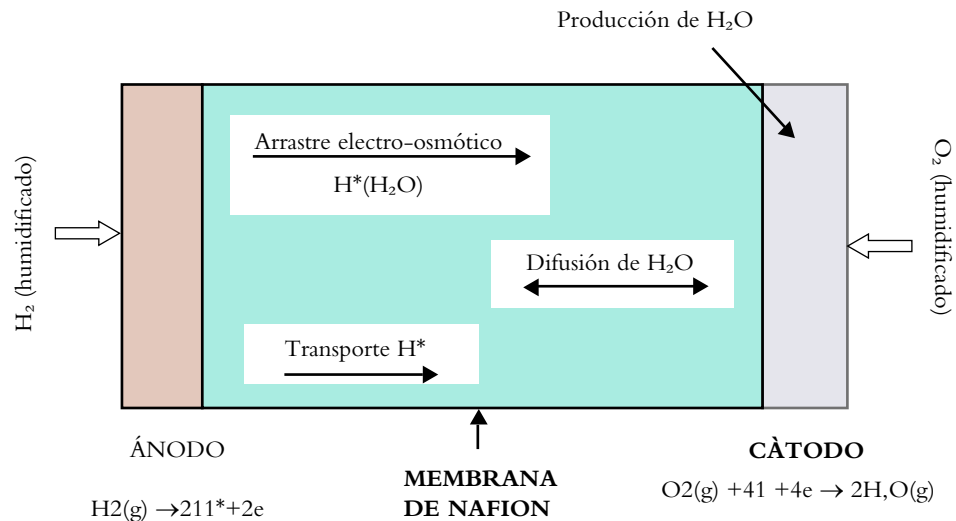


Figura 6. Distribución de flujo de agua en la celda PEM.

Fuente: Altamirano (2003).

Cabe resaltar que la hélice tiene unos parámetros de operación específicos que fueron diseñados y adaptados a esta celda de hidrógeno tipo banco (tabla 4). Cuando se operó la celda con la radiación solar, se alcanzaron estos parámetros de diseño y la hélice realizó el trabajo deseado girando durante 10 minutos, que corresponden a 35 minutos de operación de la celda y 20 cm^3 de gas hidrógeno producido.

Tabla 4. Especificaciones de la hélice

Potencia	Valor
Teórica mínima	10 mW
Práctica (luz solar)	63,63 mW

Fuente: elaboración propia.

Durante el proceso se pueden presentar diferentes pérdidas en la celda que influyen en su rendimiento, como las pérdidas resistivas, que suceden por el paso de iones de hidrógeno y electrones. Esto se puede minimizar utilizando una membrana electrolítica lo más fina posible, así como materiales de elevada conductividad y conexiones de baja resistencia (Mayandía, 2009).

Parte importante de este equipo es el análisis del panel solar policristalino, en el cual inciden las ondas de radiación. Al respecto, se estimó la eficiencia del panel solar a partir de la relación entre la potencia de entrada y la de salida. Específicamente, la construcción gráfica de las variables medidas (figura 7) evidencia una eficiencia de 8,6% para este módulo solar. Es importante tener en cuenta que las eficiencias de este tipo de paneles comerciales están entre el 13% y el 15%, aunque en el mercado ya se cuenta con paneles más eficientes que alcanzan máximos de 18%. En este sentido, nuestro valor experimental

se encuentra cercano a estos valores comerciales, y la diferencia se puede asociar a que no todos los rayos de radiación inciden con la misma intensidad y dirección de flujo en el panel (Hoeller *et al.*, 2005).

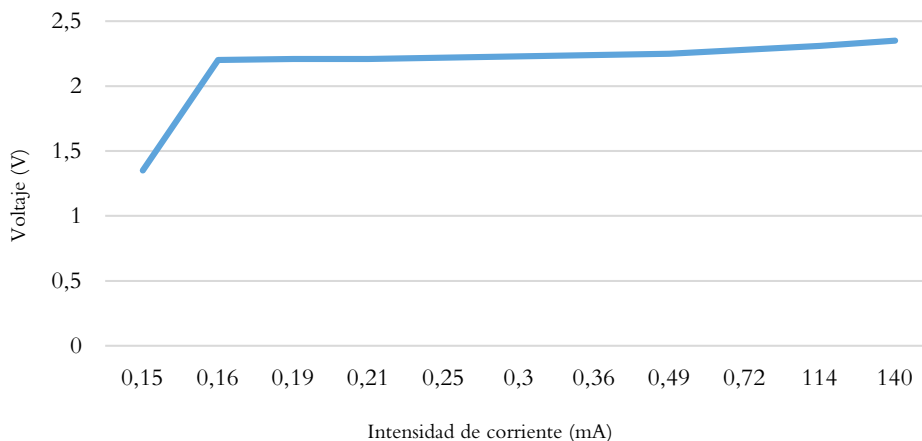


Figura 7. Curva característica de corriente-voltaje en el panel solar.
Fuente: elaboración propia.

Si bien existen diferentes métodos para obtener el H₂, el mayor porcentaje proviene de combustibles fósiles (figura 8), los cuales no son renovables. Por su parte, la electrólisis sigue aportando un porcentaje muy bajo en comparación con estos procesos a escala. Sin embargo, siendo nuestro país rico en recursos hídricos, se puede generar hidrógeno, por ejemplo, en una asociación en el uso de energía solar para la producción de hidrógeno por electrólisis del agua, lo cual representa el uso de un recurso de energía renovable para la generación de un portador de energía versátil y eficiente (Bhattacharyya *et al.*, 2017).

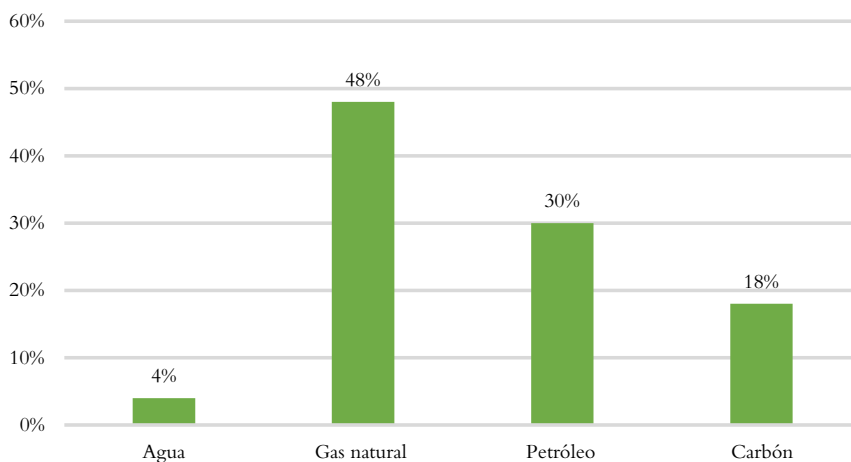


Figura 8. Origen del hidrógeno producido en la actualidad.
Fuente: Herraiz (2012).

Hoy en día la fuente principal de producción de hidrógeno industrial es el gas natural, que tiene un contenido muy alto de metano (figura 8), y el método más económico es el reformado con vapor de agua (Aguilar, 2017), que consiste en la reacción catalítica de una mezcla de vapor de agua e hidrocarburos a alta temperatura para formar hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Esta oxidación parcial en presencia de oxígeno y vapor de agua también se puede producir a partir de biomasa.

No obstante la electrólisis es el método más adecuado para generar hidrógeno en términos medioambientales, es necesario definir el tipo de fuente de la cual se parte para obtener la energía indispensable para aplicar en el proceso (Herraiz, 2012). La electrólisis consiste básicamente en hacer pasar electricidad por unos electrodos metálicos, de manera que se desprende hidrógeno de agua. A continuación, en la tabla 5 se presentan las ventajas y desventajas de los principales métodos de producción de hidrógeno.

Tabla 5. Comparación de procesos para la producción de hidrógeno

Proceso	Ventajas	Desventajas
Reformado con vapor	Tiene elevada eficiencia. Perfectamente desarrollado a gran escala.	Genera emisiones de CO ₂ . Se necesita gran infraestructura.
	Produce hidrógeno a bajo costo.	Las unidades a pequeña escala no son comerciales.
Oxidación parcial	La tecnología utilizada es muy avanzada.	Genera emisiones de CO ₂ . Es necesario contar con gran infraestructura.
		Tiene elevados costos de inversión.
Gasificación	Tecnología muy desarrollada.	Produce grandes emisiones de CO ₂ . Se necesita gran infraestructura.
	Abundancia y bajo costo de materia prima.	Tiene baja eficiencia.
Electrólisis del agua	No genera emisiones de CO ₂ .	
	Tecnología testada. Hidrógeno de gran pureza	Tiene elevados costos energéticos.

Fuente: Herraiz (2012).

Se resalta la importancia de conocer el estado del hidrógeno como vector energético en el país, siendo Colombia un país que goza de una matriz energética relativamente rica, tanto en combustibles fósiles como en recursos renovables. Actualmente, a grandes rasgos, el 93% de la explotación y producción energética del país está constituida por recursos primarios de origen fósil, aproximadamente el 4% de hidroenergía y el 3% de biomasa y residuos (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME] *et al.*, 2015). Dado este potencial, es primordial conocer acerca de las regulaciones que permiten incentivar la implementación de estas energías en el país.

En el año 2014 se aprobó la Ley 1715, la cual promueve la integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, tiene el objetivo de lograr un

desarrollo económico sostenible y promueve estímulos económicos para las empresas que implementan energías renovables no convencionales (Potosí-Guerrero *et al.*, 2016). Este tipo de incentivos permiten que haya inversión y se pueda incrementar el suministro de energía en zonas no interconectadas, que son extensas en el país. Sin embargo, en Colombia los proyectos de fuentes no convencionales priorizan la energía solar y poco o nada se relacionan con el hidrógeno, lo cual muestra que el país no se ha volcado hacia esta fuente de energía.

Finalmente, según las proyecciones de la International Energy Agency (2013), la demanda de fuentes energéticas como el hidrógeno apenas aumentaría el 4% en todo el mundo (figura 9), un aumento pequeño si se consideran los problemas que podríamos tener en el futuro con las fuentes de suministro de energía convencional.

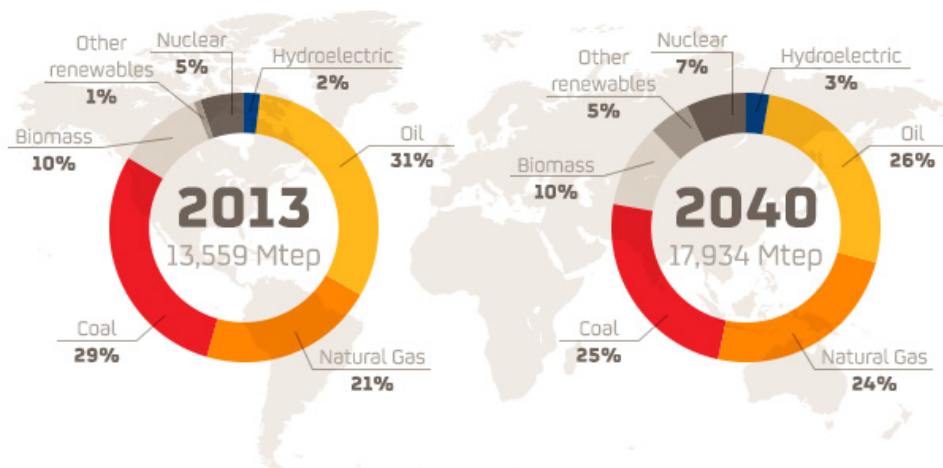


Figura 9. Perspectivas para el crecimiento de la demanda global de energía primaria. Fuente: International Energy Agency (2013).

5. Conclusiones

Con base en los análisis realizados se determinó que la celda tiene una eficiencia teórica de 58,8%, de acuerdo con las ecuaciones de Faraday, y la operativa según hidrógeno consumido y corriente generada es del 28,68%. Teniendo en cuenta que esto representa el 60% del valor de eficiencia reportado en la literatura, se concluye que la celda tiene buen desempeño para esta aplicación experimental, pero es necesario implementar nuevos ensambles y configuraciones que usen más de un módulo de membrana en serie para aumentar la eficiencia y poder emplearlo para suplir mayores demandas energéticas o a escala.

La configuración de la celda permitió realizar con éxito la electrólisis del agua, que ocurrió con un voltaje experimental próximo a 1,45 voltios. La rapidez con la que sucedió esto durante el arranque de la celda demuestra que el electrolizador opera de modo eficiente y, precisamente, su buen desempeño permitió que se haya logrado la difusión de protones de hidrógeno en la celda PEM para generar la energía que se proporciona en el elemento de control del circuito, en este caso la hélice.

Por último, dado que la eficiencia operativa de la celda con la luz solar es del 28,68%, es posible afirmar que podría ser mayor la cantidad de radiación aprovechada efectivamente por el área de captación en el módulo solar. En este sentido, si se aumentara el área del panel, con luz natural y los valores de radiación promedio de Bogotá, la celda operaría continuamente y generaría mayor potencia útil.

6. Recomendaciones

Dado que el uso de la luz solar en este dispositivo celda de combustible tipo PEM demostró un buen desempeño, se pueden configurar con más paneles solares y más módulos de celda para crear sistemas en otras ciudades con mayor radiación solar que Bogotá.

Referencias

- Aguilar Aguilar, I. R. (2017). *Evaluación de alternativas para potencializar el uso de hidrógeno como vector energético* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UN. <https://bit.ly/3PbgSAG>
- Altamirano, A. (2003). *Desarrollo de electrocatalizadores para una celda de combustible tipo PEM* [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica]. Repositorio Institucional. <https://bit.ly/3agCn4B>
- Apak, S., Atay, E., & Tuncer, G. (2017). Renewable hydrogen energy and energy efficiency in Turkey in the 21st century. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2446–2452. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.043>
- Bhattacharyya, R., Misra, A., & Sandeep, K. (2017). Photovoltaic solar energy conversion for hydrogen production by alkaline water electrolysis: Conceptual design and analysis. *Energy Conversion and Management*, 113, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.057>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2008). *Estimación e interpretación del coeficiente de variación de la Encuesta General: Censo General 2005 – CGRAL*. DANE. <https://bit.ly/2HHm2BD>
- Herraiz Cardona, I. (2012). *Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua* [Tesis doctoral, Universidad Politècnica de València]. Repositorio UPV. <https://bit.ly/3yjmbri>
- Hoeller, S., Voigt, C., & Kueter, U. (2005). *Fuel cell technology for classroom instruction: Basic principles, experiments, work sheets*. H-tec.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2015). *Atlas de radiación solar interactivo* (vol. 2) [Recurso en línea]. Ideam. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- International Energy Agency [IEA]. (2013, noviembre). *World Energy Outlook*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2013>
- Lara Romero, G. E. (2020). *Generación de prototipo de célula foto-electrolítica para agua de mar* [Tesis de maestría, CETYS Universidad]. Repositorio CETYS. <https://repositorio.cetys.mx/bitstream/60000/1144/1/Estefania.Lara.pdf>

- Liu, L., Chen, W., & Li, Y. (2016). An overview of the proton conductivity of nafion membranes through a statistical analysis. *Journal of Membrane Science*, 504, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.12.065>
- Mayandía Aguirre, A. (2009). *Descripción y modelado de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico* [Tesis de pregrado, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid]. Repositorio UCRM. <https://bit.ly/3bWX3Ph>
- Moreno, L., & Vargas, C. (2013). *La tecnología del hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad de Nuestra Señora del Rosario]. Repositorio URosario. <https://bit.ly/3OPgiZQ>
- Potosí-Guerrero, B. A., Ramos-Paja, C. A., & Serna-Garcés, S. I. (2016). Impact of government incentives in the profitability of green energy production using fuel cells in Colombia. *Tecno Lógicas*, 19(37), 93-106. <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v19n37/v19n37a07.pdf>
- Schmittinger, V., & Wolfgang, A. (2008). A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 180(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.070>
- Toloza Blanco, L. A. (2011). *Síntese e caracterização de polímeros epoxídicos sulfonados para membranas de célula a combustível do tipo PEM* [Tesis de maestría, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. Repositorio Institucional. <https://bit.ly/3usYATC>
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], Banco Interamericano de Desarrollo, & Fondo para el Medio Ambiente Mundial. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. La Imprenta Editores. https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1311_