

## Estimation of Energy Payback Time Applied In Hydrogen Production For Electricity Generation Purposes

### Estimación Del Tiempo De Recuperación De Energía Aplicado En Producción De Hidrogeno Con Fines De Generación Eléctrica

D. E. Polanco<sup>1</sup>C.C. Cuji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politecnica Salesiana, Quito, Ecuador  
E-mail: dpolanco@est.ups.edu.ec; ccuji@ups.edu.ec

#### Abstract

Next, the results obtained when estimating the cost of electrical energy and its time of considering hydrogen generation as a base are presented, as well as the feasibility in the economic sphere within the domestic consumption of electrical energy. To begin with, the energy analysis of hydrogen was carried out in the market, using the recovery factor (EPBT) which gives us as a result that it must take 1.62 years for a hydrogen cell to compensate for the energy I use. From the results obtained in the laboratory and the mathematical model in which a PEM-type fuel cell with 46% efficiency was obtained to generate 24V. Finally, with the information obtained, the amount of initial energy and hydrogen that is needed to produce electricity and the cost according to its production are evaluated, which is analyzed from the energy, technical and economic point of view, thus obtaining the strengths to be a clean and pollution-free source of energy, since its only residue is water vapor. But with the great disadvantage that in the electrical field there are greater energy losses due to the low efficiency of fuel cells.

**Index terms**— Power, Electricity generation, Hydrogen.

#### Resumen

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al estimar el costo de energía eléctrica y su tiempo de recuperación considerando como base la generación de hidrógeno, así mismo se evalúa la factibilidad en el ámbito económico dentro del consumo doméstico de energía eléctrica. Para empezar, se realizó el análisis energético del hidrógeno en el mercado, mediante el factor de recuperación (EPBT) el cual nos da como resultado que debe pasar 1.62 años para que una celda de hidrogeno compense la energía que utilizo. De los resultados obtenidos en laboratorio y del modelo matemático en el cual se utilizó una celda de combustible tipo PEM con 46% de eficiencia para que genere 24V. Finalmente, con la información obtenida se evalua la cantidad de energía inicial y el hidrogeno que se necesita para producir electricidad y el costo de acuerdo a su producción, la cual es analizada desde el punto de vista energético, técnico y económico, obteniendo así las fortalezas de ser una fuente de energía limpia y libre de contaminación, ya que su único residuo es vapor de agua. Pero con la gran desventaja que en el ámbito eléctrico se producen mayores pérdidas de energía debido a la baja eficiencia de las celdas de combustible.

**Palabras clave**— Potencia, Generación eléctrica, Hidrógeno.

Recibido: 30-10-2021 Aprobado tras revisión: 18-01-2022

Forma sugerida de citación: Polanco D.; Cuji C. (2022). "Estimación Del Tiempo De Recuperación De Energía Aplicado En Producción De Hidrogeno Con Fines De Generación Eléctrica". Revista Técnica "energía". No. 18, Issue II, Pp. 74-84

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2022 Operador Nacional de Electricidad, CENACE

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad contamos con un régimen energético que depende en su mayoría de energía no renovable con posibilidad de llegar a su límite dentro de poco tiempo, por lo que en el mundo y en nuestro país se cuantifican las opciones para la producción de energía con recursos renovables, y así mantener como mínimo el estilo de vida actual [1][2]. El sistema sostenible que se proyecta a futuro enfatiza el uso de fuentes de energía renovables con principios de eficiencia y, sobre todo, ahorro energético. Es por ello que una de las soluciones que se expone es el uso del hidrógeno y las celdas de combustible, la cual se plantea como una alternativa atractiva y eficaz por su gran variedad de aplicaciones, entre las que tenemos el hogar, varias áreas del sector industrial, como misiones espaciales, entre otros. [1][3]. Conforme la sociedad va evolucionando, el consumo de energía acrecienta y, en la mayoría de casos, no se lo hace de manera eficiente. Esta eficiencia energética ayuda al aumento y mejora de la calidad de vida, y a la correcta administración de los recursos. [3][4].

En este documento se estimarán los costos de producción de la energía necesaria para crear hidrógeno, puesto que uno de los retos más grandes que enfrenta nuestro país es desistir o renunciar gradualmente al uso de las fuentes de energía no renovables, especialmente los combustibles derivados del petróleo y, a la vez, proponer alternativas de un sistema energético razonable para una población cuya demanda energética se mantiene en crecimiento[5][6]. Solo así se conseguirá evitar las consecuencias de un incremento significativo de precios, lo que podría causar un gran impacto en la economía. Hoy en día existen varias herramientas para el proceso de generación eléctrica, entre ellas tenemos a las celdas de combustible, cuyo rendimiento asegura un futuro prometedor, por lo que se busca infundir y promover la utilización de estas y despertar un interés dentro de la sociedad hacia el uso de energías renovables. [5][6]. En el futuro se espera que, por cada fuente de energía no renovable, por ejemplo, gas o derivados de petróleo que causan contaminación, se encuentre una pila de combustible capaz de producir electricidad mediante hidrógeno, el cual se trasladará por hidroductos comerciales y simplemente bastará con inyectar oxígeno proveniente de calles para producir la electricidad necesaria que demanda un edificio, obteniendo un rendimiento superior. Para ello, usaremos el factor de recuperación de energía (EPBT), donde se analizará qué tan viable es el uso de esta nueva fuente energética en comparación a la quema de combustibles tradicionales, y, lo más importante, sin la emisión de gases contaminantes, ya que el único residuo de este combustible a base de hidrógeno es el vapor de agua. Adicionalmente, este vapor se podrá aprovechar en el invierno para la calefacción y, si se añade una máquina

de absorción, es posible convertir el calor en frío, lo que se puede ocupar como aire acondicionado durante el verano [4][7].

Actualmente, podemos percatarnos que la disponibilidad de fuentes de energía cada vez es menor. El principal argumento a favor del desarrollo de celdas de combustible es que se convertiría en una manera de reducir el agotamiento de petróleo y, por ende, de emisiones contaminantes [8][6]. Lo que se busca en esta investigación es proponer al hidrógeno como vector de energía limpia y analizar, con el mayor rigor científico posible, las fortalezas, debilidades, oportunidades y problemas que conlleva la aplicación de estas nuevas tecnologías asociadas al hidrógeno.



Figura 1: Ciclo de generación eléctrica basada en Hidrógeno

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Hidrógeno

Se comenta que el hidrógeno es un elemento infinito, ya que se encuentra de forma abundante en el universo y nuestro planeta no es la excepción. Se encuentra ligado a otros elementos, formando nuevos compuestos, por ejemplo: agua, material orgánico, gas natural y, principalmente, contiene una gran cantidad de energía por unidad de peso, ya que el combustible no pesa mucho al no tener átomos de carbono[9][10]. Por ejemplo, durante una reacción de hidrógeno se generará energía equivalente a 2.5 veces el poder de combustión de los hidrocarburos [11][12]. En este caso, el método utilizado para la generación de hidrógeno fue la electrólisis, que consiste en agregar energía a un ánodo y cátodo, para luego sumergirlos en agua y, de esta forma, separar el oxígeno y el hidrógeno [8][10].

### 2.2 Celdas de combustible

La celda de combustibles es un módulo electroquímico, cuya función de transformación de energía es muy parecida a una batería, pero con la discrepancia de que esta celda permite el reabastecimiento constante de los reactivos utilizados; en otras palabras, genera energía de una fuente distinta de combustible como una contramedida a la limitada capacidad que tiene la batería [12][13]. Por otro lado, la batería reacciona y cambia según cómo se encuentre la carga, mientras que en la celda de combustible se utilizan

electrodos catalíticos y relativamente invariables [14]. Una celda de combustible utiliza hidrógeno en el lado positivo y oxígeno en el lado negativo [12] [15].



Figura 2: Principio Celda de combustible

La celda de combustible produce electricidad, mezclando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente (no necesita ningún tipo de combustión). A diferencia de las baterías, la celda de combustible no termina y no requiere de una recarga, ya que la celda producirá energía eléctrica tipo DC y calor mientras tenga combustible. El único producto secundario que se produce es agua 100% pura [15][16].

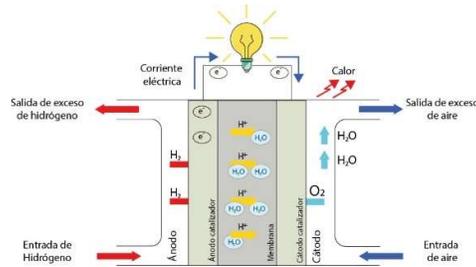
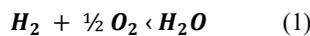


Figura 3: Esquema Celda de combustible

El hidrógeno ingresa hacia el electrodo a través del electrolito y, consecutivamente, el electrón lo hace por medio de un conductor. Este procedimiento sub generará agua, corriente eléctrica y desprendimiento de calor, para poder inducir corriente a las celdas de combustible que están formadas una después de otra con varias capas [7][17]. En la Fig. 3, existe un creciente número de iones negativos en el electrolito y el transporte de cargas positivas. En comparación con los combustibles actualmente utilizados, las celdas de combustible reducen las emisiones de gases nocivos y producen vapor de agua como residuo [17][4]. Es importante mencionar que la reacción total, añadiendo los efectos que se tendrán en el polo positivo y negativo, es igual para todos los tipos de celda:



### 2.2.1 Clasificación

Hoy por hoy contamos con varios tipos de celdas de combustible, que se clasifican según el tipo de electrolito. Dentro de esta clasificación se tomarán en cuenta las diferentes temperaturas a las que operan las celdas, así como los requerimientos de pureza de hidrógeno suministrado [14] [12] [18].

En la Tabla 1 se expone la eficiencia de cada tipo de celda de combustible antes mencionadas.

Tabla 1. Eficiencia de celdas de combustible

Tipo Celda De Combustible	Tipo De Electrolito	%
Celdas De Membrana Polimérica (Pem)	Polímero Sólido	60%
Celdas De Combustible Alcalinas (Afc)	Recurso Acuoso De Hidróxido De Potasio	60%
Celdas De Ácido Fosfórico (Pafc)	Ácido Fosfórico Líquido	50% 80%
Celdas De Carbonato Fundido (Mfcf)	Recurso Líquido De Litio, Sodio Y Potasio	60% 90%
Celdas De Óxido Sólido	Óxido De Zirconio Sólido Con Adiciones De Itrio Sólido	60% 90%
Conversión Directa Metanol (Dmfc)	Nafion	40%

### 2.2.2 Ventajas

La principal ventaja de esta nueva fuente energética es que genera una cantidad nula de contaminación y a esto podemos aportar las siguientes ventajas:

- Alta eficiencia en la transformación del combustible a electricidad.
- Capaces de manejar varios combustibles.
- Sigilosas en su operación.
- Su facilidad para operar con otros sistemas de generación de electricidad aumentando la eficiencia del sistema.

En la siguiente Tabla 2 se exhiben las ventajas por cada tipo de celda:

Tabla 2. Ventajas celdas de combustible

Tipo celda de combustible	Ventajas
Celdas de membrana polimérica (pem)	Disminución en corrosión del electrolito y fácil mantenimiento de la pila. Velocidad en arranque y poca temperatura de operación.
Celdas de combustible alcalinas (afc)	Resistencia catódica rápida con eficiencia.
Celdas de ácido fosfórico (pafc)	Gran eficiencia en cogeneración. Acepta hidrógeno impuro.
Celdas de carbonato fundido (mfcf)	Gran eficiencia debido a la alta temperatura y relativamente baratos.
Celdas de óxido sólido	gran eficiencia y catalizadores relativamente baratos.
Conversión directa metanol (dmfc)	Transporte, equipos portátiles, electricidad.

### 2.2.3 Desventajas

Generalmente no presentan desventajas en el ámbito de productividad, pero en la parte económica sí se pueden presentar algunos inconvenientes, puesto que en el mercado aún no son de fácil adquisición. Como se comentó anteriormente, son necesarios algunos procesos



para generar este combustible, los cuales tienen un costo elevado. Además, la contención y almacenaje de este elemento ocasionan que el costo se eleve aún más, al igual que el transporte a diversos sitios, como viviendas, empresas, etc. [19][18]. A continuación, en la Tabla 3 se presentan las desventajas por cada tipo de celda:

Tabla 3. Desventajas celdas de combustible

Tipo celda de combustible	Desventajas
Celdas de membrana polimérica (pem)	Catalizadores costosos y no admite impurezas.
Celdas de combustible alcalinas (afc)	No admite impurezas, únicamente se emplea hidrógeno puro.
Celdas de ácido fosfórico (pafc)	Consta con un gran peso y poca corriente y potencia.
Celdas de carbonato fundido (mcfc)	Poca vida útil ante la corrosión a gran temperatura. Permite el uso de hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre.
Celdas de óxido sólido	Poca vida útil ante la corrosión a gran temperatura. Permite el uso de hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre.
Conversión directa metanol (dmfc)	Combustible líquido, más cercano a la tecnología actual, más las ventajas de las pem.

### 2.2.4 Aplicaciones

Una de las aplicaciones más importantes es que pueden trasladarse a lugares muy remotos, por ejemplo: viajes espaciales, estaciones meteorológicas o hasta en tu propio hogar alejado de las zonas rurales; aparte de tener varios usos, bien sean militares o residenciales [16][20]. Existe un sistema Eólico-Hidrógeno que es el pionero en la implementación a gran escala, es decir, es un sistema eólico conectado a una batería de energía a base de hidrógeno. En la Fig. 4, se evalúa la distribución de este sistema, que planea entregar energía eléctrica a 250 hogares.

En el sistema, los aerogeneradores producen energía para los usuarios y el sobrante es utilizado para formar hidrógeno. Es así que, cuando el aerogenerador tiene una baja actividad, se activa la celda, convirtiendo el hidrógeno almacenado en energía [21] [19].

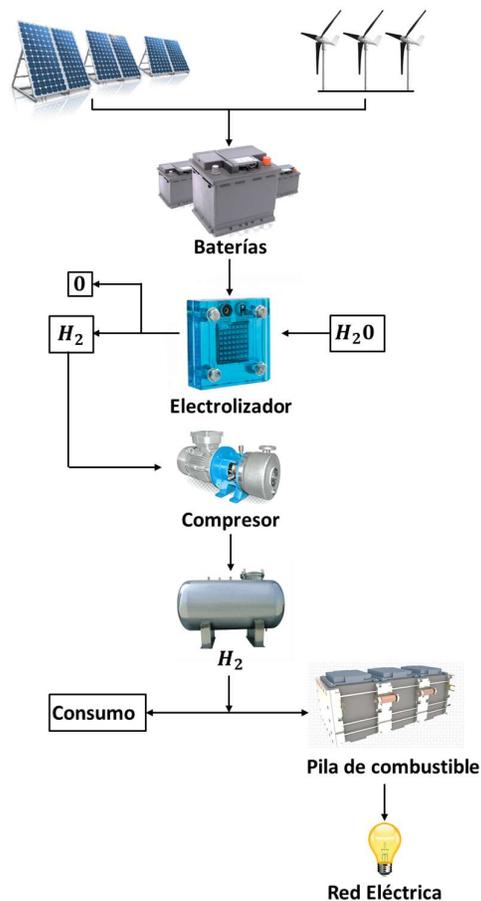


Figura 4: Esquema Sistema Eólico-Hidrógeno

En la Tabla 4 se exponen algunas aplicaciones por cada tipo de celda [21] [15].

Tabla 4. Aplicaciones celdas de combustible

Tipo celda de combustible	Aplicaciones
Celdas de membrana polimérica (pem)	Suministro energético para vehículos y generación Estacionaria
Celdas de combustible alcalinas (afc)	Aplicaciones militares y espaciales
Celdas de ácido fosfórico (pafc)	Aplicaciones de generación estacionaria. Aparatos portátiles.
Celdas de carbonato fundido (mcfc)	Generación estacionaria
Celdas de óxido sólido	Generación estacionaria
Conversión directa metanol (dmfc)	Aún se encuentra en desarrollo

### 2.2.5 Eficiencia

Para calcular la eficiencia de la celda de combustible comparamos la masa de hidrógeno entrante con la masa de hidrógeno saliente [22][17], ocupando las siguientes ecuaciones:

$$m_{H_2.in} = S_{H_2} \frac{m_{H_2}}{2F} I n_{cell} \quad (2)$$

$$m_{H_2.out} = (S_{H_2} - 1) \frac{m_{H_2}}{2F} I n_{cell} \quad (3)$$

Donde:

- $S_{H_2}$  = Razón estequiométrica del hidrógeno.
- $m_{H_2}$  = Peso molecular del hidrógeno (g/mol).
- $F$  = Constante de Faraday (96485.34 C/mol).
- $n_{cell}$  = Número de celdas.
- $I$  = Corriente de las celdas (A).

Una vez estimados el  $H_{2in}$  hidrógeno entrante y el  $H_{2out}$  saliente, procedemos a calcular la eficiencia en la celda de combustible, mediante la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{m_{H_2.in}}{m_{H_2.out}} \quad (4)$$

### 2.3 Energy Pay Back Time

El tiempo de recuperación de energía (EPBT) de un sistema, es el tiempo requerido para generar tanta energía como se consume durante la producción y la operación de por vida del sistema [23]. El tiempo de recuperación de la energía está influenciado por tres factores:

- Los materiales utilizados en el sistema.
- Tipo de celda de combustible.
- La eficiencia de la celda de combustible.

El parámetro EPBT también indica el tiempo que una pila de hidrógeno, durante su etapa de utilización, tardará en generar una suma de energía semejante a la invertida en su generación. Nos revela la energía eléctrica utilizada en cada uno de los procesos utilizados. En este caso, la generación de energía con celdas de combustible; esto demuestra que el EPBT toma en cuenta los detalles específicos de la construcción y estos cálculos nos ayudan a mejorar la eficiencia de los procesos industriales de fabricación de las pilas de hidrógeno [23][24].

El EPBT es calculado usando la siguiente ecuación

$$EPBT \text{ (year)} = \frac{E_{in}}{E_{out}} \quad (5)$$

Donde:

- $E_{in}$  = Demanda de energía primaria.
- $E_{out}$  = Energía anual generada por los sistemas.

El EPBT es un parámetro clave para evaluar el rendimiento de las fuentes de energía y va de la mano con el EROI, que es la relación entre la energía "devuelta" por un equipo de energía y la energía "invertida" para

proporcionar ese retorno, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$EROI = \frac{\text{Tiempo de vida}}{EPBT} \quad (6)$$

El EROI se determinó para evaluar el rendimiento neto de energía para la sociedad durante la vida útil de los tandems, y se comparó con otros sistemas fotovoltaicos comerciales y fuentes de energía tradicionales [23][21].

### 2.4 La Economía del hidrógeno

Prácticamente, el uso comercial del hidrógeno como medio energético es cuestión de costos. Existe hidrógeno en todos los lugares de la tierra: en el agua, en los combustibles fósiles y en todos los seres vivos; el problema es que no se encuentra directamente en la naturaleza y es necesario extraerlo mediante otro proceso de sus fuentes naturales, significando una gran inversión [25][11].

Para obtener una visión más clara, se calcula el valor monetario de la energía necesaria para generar la disociación del hidrógeno y oxígeno en 1 litro de agua.

Cantidad moles de agua:

$$\frac{1 \text{ Litro} * 1000}{18} = 55.56 \text{ mol} \quad (7)$$

Tomando en cuenta que la constante de electrólisis para el agua es de 285.8 kJ/mol, tenemos que el hidrógeno total producido es:

$$\frac{55.56 \text{ mol} * 2}{1000} = 0.11 \text{ kg} \quad (8)$$

Y la energía total necesaria para separarlo:

$$285.8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} * 55.56 \text{ mol} = 15877.8 \text{ kJ} \quad (9)$$

Que representan 4.41 KWh, la cual es la cantidad de potencia necesaria aplicada en una hora para poder separar el hidrógeno del agua. Conociendo el valor del Kwh en Ecuador, la tarifa mínima es de 0.11 ctvs de dólar por el consumo de hasta 1 Kwh al mes y va hasta los 2.56 dólares por el consumo de hasta 300Kwh [26]; tomando el valor mínimo de 0.11 dólares, el proceso para obtener hidrógeno de un litro de agua, costaría alrededor de 0.49 dólares. A continuación, en la Tabla 5 se explican los costos con cantidades más altas de líquido [4][7].

Tabla 5. Costo de producción de hidrógeno [26]

Agua (Litros)	Potencia Eléctrica (Kwh)	Hidrógeno (kg)	Costo (\$)
100	441,05	11,11	1129
200	882,10	22,22	2258
300	1323,15	33,33	3387
400	1764,20	44,44	4516
500	2205,25	55,56	5645
600	2646,30	66,67	6774



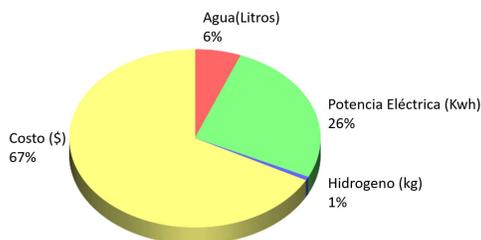


Figura 5: Proceso de generación de hidrógeno

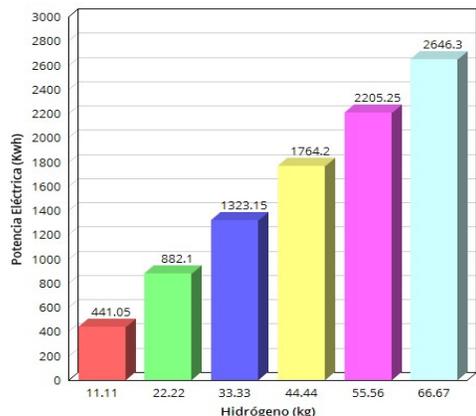


Figura 6: Potencia eléctrica necesaria para generar hidrógeno

Como podemos observar en la Fig. 5 el costo de producción de hidrogeno en comparación a la potencia que genera, el agua que ingresa y el hidrogeno que crea, es muy elevado es decir no justifica en el ámbito económico su producción y para ratificar lo antes dicho en la Fig. 6 observamos la potencia eléctrica necesaria para generar cierta cantidad de hidrogeno.

### 3. MARCO METODOLÓGICO

Para este estudio se utilizó el equipo nombrado FCJJ-16, que es un electrolizador con una membrana de intercambio protonico tipo Nación 112 del fabricante Horizon. Los rasgos de voltaje y corriente se mencionan a continuación:

- Voltaje de entrada: 1.7 V ~ 5 V (DC)
- Corriente de entrada: 0,7A a 2 V
- La tasa de producción de hidrógeno: 5ml/min
- Tasa de producción de oxígeno: 2.5ml/min

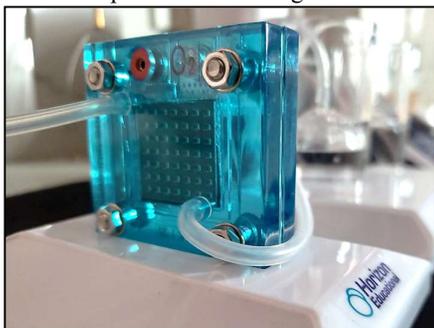


Figura 7: Celda de combustible Horizon



Figura 8: Electrolizador- Horizon

A continuación, podemos observar en las Fig. 7 y 8 los implementos necesarios para iniciar el proceso de electrólisis y así separar el oxígeno e hidrógeno del agua, para poder utilizar el hidrógeno como medio de combustible.

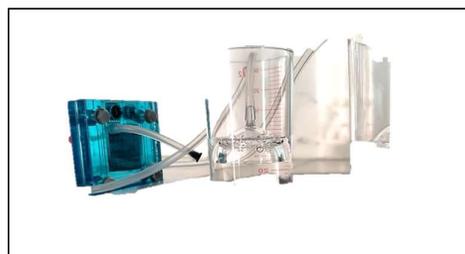


Figura 9: Proceso de electrólisis

Primero, se procede a conectar los tanques de almacenamiento del electrolizador, como podemos observar en la Fig. 9, y llenarlos con aproximadamente 30 mililitros de agua destilada. Luego, conectamos el panel fotovoltaico a la celda de combustible, como la Fig.10, para iniciar el proceso de electrólisis y separar el oxígeno e hidrógeno del agua destilada.



Figura 10: Conexión panel solar

Se debe tomar en cuenta el gasto de la resistencia interna, dada por la química de los materiales empleados y por sugerencias del fabricante de la membrana polimérica. El proceso para alimentar la celda sin carga se lo debe hacer de 5 a 10 segundos. Una vez conseguido el hidrógeno necesario, colocamos una carga reemplazando los pines del panel por un motor de baja potencia, como se muestra en la Fig. 11.

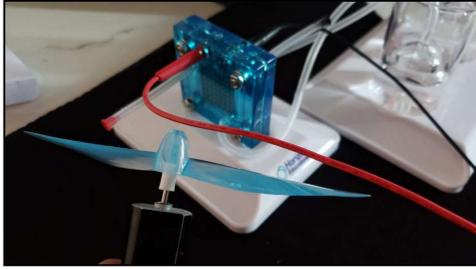


Figura 11: Conexión carga a celda de combustible

### 3.1 Resultados en laboratorio

Mediante la ayuda de un monitor de energía, procedemos a realizar mediciones en tiempo real del comportamiento de la celda de combustible, para luego graficarlos en Matlab.

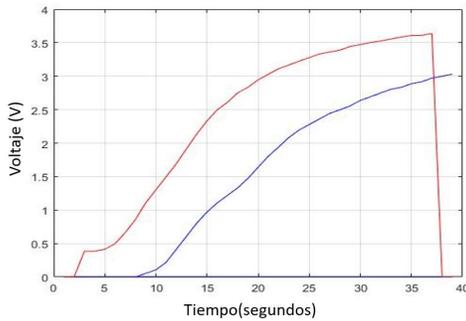


Figura 12: Tensión producida por celda de hidrogeno

En la Fig. 12 podemos observar que la diferencia entre estas dos muestras es el tiempo en el cual comienzan a generar tensión. El fabricante comenta y especifica que este hecho sucede cuando la membrana es nueva; por eso, en la tensión de color rojo podemos notar una producción de tensión mucho más rápida, puesto que ya fue utilizada en varios ensayos, obteniendo como datos los valores de tensión promedio de 2.99 V. En la Fig. 13 tomamos una sección en la cual nos muestra la descarga de la celda de combustible al ser conectada a una carga.

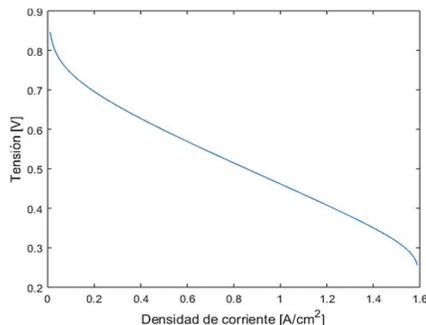


Figura 13: Curva de polarización de la pila PEM.

Como podemos observar, en la Fig. 13, la tensión eléctrica al inicio de la prueba tiene un valor de 0.9 V. No obstante, su nivel va descendiendo de forma gradual hasta agotar la carga; esto se debe a que el suministro de combustible se agota por el consumo del motor a baja

potencia.

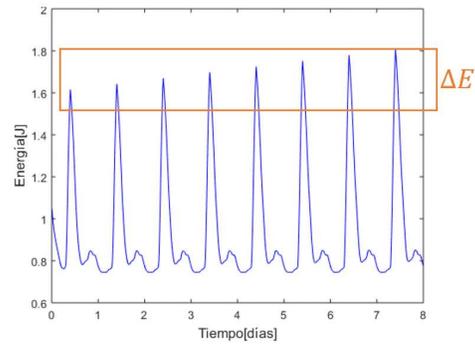


Figura 14: Energía eléctrica almacenada

En la Fig. 14 podemos observar cómo la celda de combustible genera energía, llegando a un pico de 1.6 J en el primer día y, en el séptimo día, alcanza 1.8J. Esta variación de energía se produce por el continuo uso de la celda de combustible, ya que esto aumenta su eficiencia por la humedad que se genera en la membrana polimérica, alcanzando así un punto máximo debido a su continuo uso. También, podemos percatarnos de la disminución de la energía en cada día debido al consumo por la carga en cada prueba.

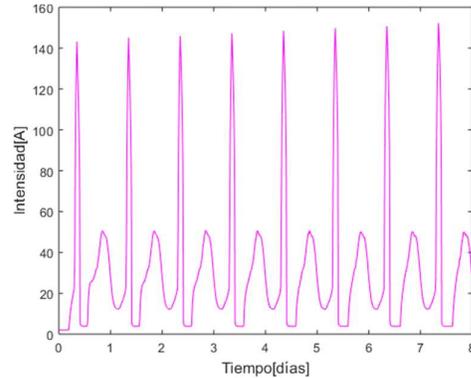


Figura 15: Corriente producida por celda de hidrogeno

En la Fig. 15 observamos el comportamiento de la intensidad de corriente al ser almacenada durante varias pruebas, llegando a picos muy altos de hasta 150 A, debido al proceso electroquímico de generación eléctrica. Este hecho sucede cuando la molécula de hidrógeno interactúa con la membrana, creando un flujo de corriente intensa en un corto periodo de tiempo.

### 3.2 Modelamiento

Para corroborar este comportamiento, procedemos a modelar una pila de hidrogeno tipo PEM para que genere 1.26 Kw a 24 V, conformado con 42 celdas de combustible y una eficiencia del 46% en Simulink, obteniendo las siguientes figuras:



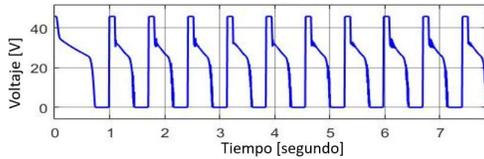


Figura 16: Tensión producida por modelo de celda de hidrógeno

Como podemos observar en la Fig. 16, esta curva es característica de las celdas de combustible tipo PEM. Igualmente, se observa que la tensión alcanza picos de voltaje para lograr obtener un valor promedio y suministrar el voltaje requerido. Así mismo, podemos notar los picos de densidad de corriente elevada en la Fig. 17, esto se debe al proceso electroquímico de generación eléctrica y es una característica de las celdas de combustible tipo PEM en las cuales suele llegar hasta 2000 mA/cm<sup>2</sup> [13].

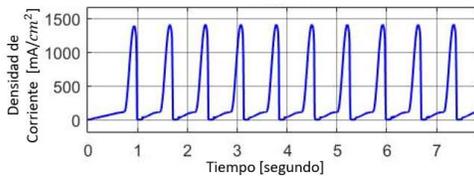


Figura 17: Densidad de corriente producida por modelo de celda de hidrógeno

Para optimizar este modelo matemático, procedemos a conectar un bus DC y atenuar los picos de corriente y voltaje, promediando el valor que genera la celda de combustible con 100Vdc obteniendo como resultado las Fig. 18 en la cual se observa que se obtiene valores de -200V a 350V, dando como resultado de su promedio un valor cercano a los 100V, este valor se obtiene tomando el valor positivo y negativo de la celda de hidrógeno, donde se consigue una señal más estable y sin muchas fluctuaciones, en la Fig. 19 podemos observar que obtenemos una corriente eléctrica de hasta 30A esta corriente se logra gracias al aumento de 100Vdc que se realizó en el modelo para estabilizar la señal del voltaje dado que la celda posee únicamente la resistibilidad de sus materiales y al tener una resistencia pequeña con un voltaje alto se obtiene una cantidad de corriente superior.

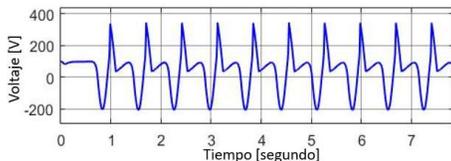


Figura 18: Voltaje bus DC para modelo de celda de hidrógeno

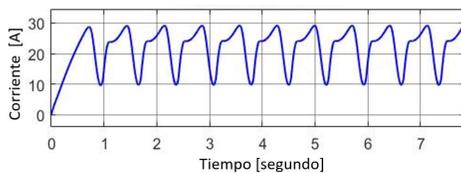


Figura 19: Corriente bus DC para modelo de celda de hidrógeno

Gracias al modelo realizado, es posible observar la producción y suministro de combustible, los cuales se

encuentran detallados en la Fig. 20; así como el consumo de los mismos, en la Fig. 21.

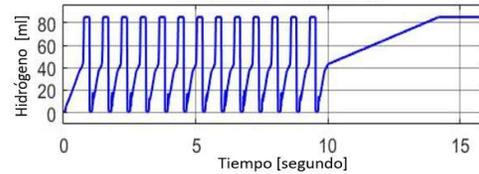


Figura 20: Suministro de combustible para pila tipo PEM

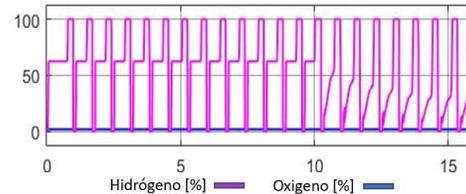


Figura 21: Consumo de reactivos dentro de la pila tipo PEM

Como se muestra en las figuras, el suministro de hidrógeno no es constante; hay pequeños intervalos en los cuales se produce la reacción electroquímica para separar el oxígeno y el hidrógeno, dando como resultado las características gráficas de las celdas tipo PEM.

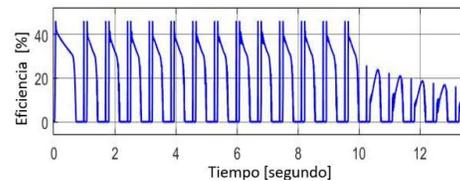


Figura 22: Eficiencia pila tipo PEM

Por último, en la Fig. 22 podemos observar que la eficiencia de la pila supera los 40% y reiterar que el porcentaje de eficiencia de las celdas tipo PEM rondan alrededor del 40% al 60% pero este porcentaje puede variar debido a pérdidas electroquímicas.

### 3.3 Estimación de eficiencia en la celda

Tomando los valores de diseño de 1 A y de 5 celdas formando el stock de la pila, además de los valores obtenidos en las pruebas calculamos el consumo del Hidrogeno al interior de la celda, sabiendo que la relación estequiométrica es de 1.2:

$$m_{H_2.in} = S_{H_2} \frac{m_{H_2}}{2F} I n_{cell} \quad (10)$$

$$m_{H_2.in} = 1.2 \frac{2.016 \text{ g/mol}}{2(96485.34 \text{ C/mol})} 1 * (5) \quad (11)$$

$$m_{H_2.in} = 6.268 \times 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (12)$$

Este es el valor mínimo de hidrogeno entrante a la celda de combustible para obtener los valores de potencia y corriente propuestos. El siguiente calculo nos ayuda a encontrar el flujo de hidrogeno saliente de la celda de combustible usando la siguiente ecuación:

$$m_{H_2.out} = (S_{H_2} - 1) \frac{m_{H_2}}{2F} I n_{cell} \quad (13)$$





$$m_{H_2out} = (1.2 - 1) \frac{2.016 \text{ g/mol}}{2(96485.34 \text{ C/mol})} 1 * (5) \quad (14)$$

$$m_{H_2out} = 10.447 * 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (15)$$

El rendimiento de la celda de combustible se calcula comparando la cantidad de hidrógeno consumido en la reacción y la cantidad de hidrógeno no consumido, estos valores son promedios, obtenidos en las pruebas de laboratorio y presentes en la Fig. 12.

$$n = \frac{m_{H_2in}}{m_{H_2out}} \quad (16)$$

$$n = \frac{6.268 \times 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{s}}}{10.447 \times 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{s}}} = 0.599 \quad (17)$$

$$n = 59.9\% \quad (18)$$

Lo cual demuestra la eficiencia típica de la celda de combustible tipo PEM cuyos valores estándar en el mercado se encuentran entre 40% y 60% según el desarrollo e investigación que se lleve a cabo en un futuro podemos utilizar este mecanismo como fuente renovable en el uso residencial, industrial, etc.

### 3.4. Estimación de EPBT y costos de energía

El parámetro EPBT nos indica el tiempo que la pila de hidrogeno tarda en generar una cantidad de energía equivalente a la invertida en su producción para encontrar este valor tomamos los datos de laboratorio.

$$EPBT(\text{years}) = \frac{E_{in}}{E_{out}} \quad (19)$$

$$EPBT(\text{years}) = \frac{5 \text{ Kwh}}{2.995 \text{ Kwh}} \quad (20)$$

$$EPBT(\text{years}) = 1.67 \text{ años} \quad (21)$$

En base a estos resultados podemos observar que el EPBT es de 1.67 años, este es el tiempo requerido durante la etapa de uso de la celda de hidrogeno para compensar la energía invertida en su ciclo de vida [21]. Para encontrar el costo de la energía multiplicamos la potencia que se ocupó para generar el combustible por el valor kWh en Ecuador, para eso tomamos el valor del modelo en el que se ocupó 2.74 kWh para generar 1.26 kWh es decir:

$$2.74 \text{kw} * 0.11 = 0.30 \text{ dólares} \quad (22)$$

$$1.26 \text{kw} * 0.11 = 0.14 \text{ dólares} \quad (23)$$

Es decir que en este proceso se perdió 0.16 dólares esto es debido a la baja eficiencia que tiene la celda de combustible, a medida que se tenga más estudios e investigaciones a futuro se podría aumentar la eficiencia de la celda de combustible para lograr abastecer un nuevo sistema de energía basado en hidrogeno sin causar daño al medio ambiente. Tras realizar este análisis procedemos a corroborar los resultados mediante el modelo realizando con varios niveles de hidrógeno obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6. Cálculo de EPBT y costos de energía

Ein (Kwh)	Eout (Kwh)	Ein \$	Eout \$	Perdida \$	EPBT (Años)
0,39	0,23	0,04	0,03	0,02	1,67
1,11	0,55	0,12	0,06	0,06	2,00
1,64	0,74	0,18	0,08	0,10	2,22
2,50	1,00	0,27	0,11	0,16	2,50
3,03	1,67	0,33	0,18	0,15	1,82

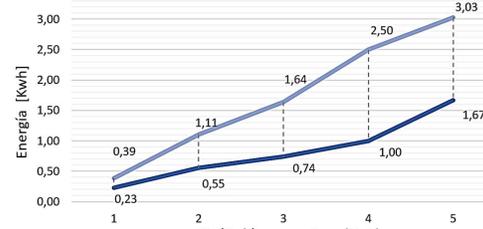


Figura 23: Comparación entre Ein y Eout

Como podemos observar en la Fig. 23 tras varios experimentos, la energía necesaria para producir electricidad siempre es mayor a la energía que produce, este fenómeno se da gracias a la eficiencia que tiene las celdas de combustible reiterando los resultados antes mencionados.

### 4. CONCLUSIONES

Durante los ensayos de laboratorio se demuestra que las celdas de combustible tienen una curva característica de tensión con valores máximos de 3.6V y valores mínimos de 2.99V, los cuales demuestran que el uso continuo de la celda de combustible nos ayuda a elevar la eficiencia de la misma hasta un 16.94%, puesto que el uso humedece la membrana polimérica ayudando al proceso electroquímico.

Gracias al EPBT se pudo comprender que el uso de esta nueva tecnología aún está en desarrollo y los tiempos para justificar la energía que proporciona es de 1.67 años dando como resultado que el hidrogeno representa una pérdida económica del 53.3%, ya que al pasar de un proceso a otro obtiene un desgaste en el cual la energía varía disminuyendo así su cantidad considerablemente.

Durante el modelamiento de la celda de combustible nos pudimos percatar que la eficiencia no supera al 60% en la mayoría de casos de las de tipo PEM pero existen otro tipo de celdas que llegan hasta un 90% de eficiencia, como pudimos observar en los resultados de laboratorio y el análisis económico, la energía que ingresa es de 2.52 kWh pero luego de todo el proceso electroquímico la celda nos estregó 1 kWh esto quiere decir que la eficiencia fue de 39.6% aproximadamente, así que este proceso por el momento no es factible para el uso como principal combustible de fuente.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Valero Matas and J. Romay Coca, "Políticas científicas en materia de renovables: el caso del hidrógeno como fuente básica energética," RIPS: Revista de investigaciones políticas y sociológicas, vol. 8, no. 1, pp. 23–35, 2009.
- [2] J. A. V. Matas, "El Espejismo De Una Energía Social: La Economía Del Hidrógeno," Revista Internacional de Sociología, vol. 68, no. 2, pp. 429–452, 2010, doi: 10.3989/ris.2008.08.13.
- [3] J. Solano, "Hacia una economía basada en el hidrógeno," Anales de la Universidad Metropolitana, vol. 4, no. 1, pp. 165–180, 2004.
- [4] D. Gene and M. Salvador, "La Economía del Hidrógeno como Solución al Problema de la Estabilización del Clima Mundial La Economía del Hidrógeno como Solución al Problema de la Estabilización del Clima Mundial," Acta Universitaria, vol. 16, no. 1, pp. 5–14, 2012, doi: 10.15174/au.2006.192.
- [5] D. Eerr, "El Negocio De Las Energías Renovables En Los Balcanes ;," Greenpeace, pp. 38–54, 2014.
- [6] F. Cortez, J. Cercado Mancero, A. Vera Lorenti, and E. Valle Flores, "Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia," Espacios, vol. 39, p. 10, 2018.
- [7] H. Untuk and S. Smp, "Uso del hidrogeno como fuente alternativa para alimentar pilas de combustible," Fundación universidad américa, 2018.
- [8] H. Américo and A. Visintin, "Hidrógeno, Combustible Del Futuro: ¿Por Qué, Cómo Y Dónde?," Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas, pp. 1–9, 2010.
- [9] F. M. Orr, U. De Stanford, T. S. Ramakrishnan, C. Roulet, and E. Stout, "El hidrógeno : ¿ Un futuro portador energético? Para muchos , el hidrógeno es el combustible limpio del futuro porque su único," Oilfield Review, pp. 34–47, 2005.
- [10] R. Sánchez-dirzo, R. Silva-casarín, G. Edgar, and M. R. D. G. González-huerta, "Hidrógeno Del Mar," TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, vol. 15, no. 1, pp. 49–61, 2012.
- [11] P. F. De Carrera, "Estudio sobre la aplicación de hidrógeno como combustible alternativo a bordo de buques," Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [12] L. Alzate-Gaviria, C. Fuentes-Albarrán, A. Álvarez-Gallegos, and P. J. Sebastian, "Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM," Interciencia, vol. 33, no. 7, pp. 503–509, 2008.
- [13] F. Barreras and A. Lozano, "Hidrógeno. Pilas de combustibles de tipo PEM," Año internacional de la energía sostenible para todos, p. 19, 2012.
- [14] J. A. Asensio et al., "Membrana polimérica," Afinidad LXVIII, vol. 554, pp. 246–258, 2011.
- [15] J. Mónica and A. Carlos, "Análisis del ciclo de vida para la producción de hidrógeno como combustible del futuro," Revista Cubana de Química, vol. XXV, no. 2, pp. 165–179, 2013.
- [16] C. Clemente Jul, M. Sánchez Delgado, and M. Rodríguez Mayor, "Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables," Anales de la Real Academia de Doctores de España, vol. 3, no. 1, pp. 183–186, 2018.
- [17] V. M. Orera, "Hidrógeno y Pilas de combustible Hidrógeno y Pilas de Combustible," Fundación OPTI, no. April, 2007.
- [18] M. Gatti, F. Quiñones, and R. Milocco, "Estudio de diferentes celdas de combustible microbianas para la generación de energía a partir de residuos orgánicos de efluentes líquidos," Libro de trabajos completos del III Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología, no. 1, pp. 1–10, 2017.
- [19] I. De Rob and R. C. Castell, "Control de temperatura en pilas de combustible tipo PEM de c ´ atodo abierto .," Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC), pp. 3–5, 2014.
- [20] J. Romero Polanco, "Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción," Universidad De Valladolid Escuela, p. 134, 2018.
- [21] G. Palmer and J. Floyd, "An Exploration of Divergence in EPBT and EROI for Solar Photovoltaics," BioPhysical Economics and Resource Quality, vol. 2, no. 4, 2017, doi: 10.1007/s41247-017-0033-0.
- [22] A. M. Aguirre, "Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico," Universidad Carlos III de Madrid, p. 231, 2009.
- [23] K. P. Bhandari, J. M. Collier, R. J. Ellingson, and D. S. Apul, "Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and

meta-analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 133–141, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.057.

- [24] C. Toledo Arias and V. Campos Guzmán, “Consideraciones en el tiempo de retorno energético de sistemas fotovoltaicos integrados arquitectónicamente en edificios,” *Anuario de Jóvenes Investigadores*, vol. 9, no. 9, pp. 144–147, 2016.
- [25] D. G. Couret, “Las energías renovables al servicio de la humanidad *Renewable Energies in the service of mankind*,” *Arquitectura y Urbanismo*, vol. XXXVI, no. 1, pp. 93–98, 2015.
- [26] Servicio público de energía eléctrica “Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución” Resolución Nro. ARCONEL – 035/19 (23 de diciembre de 2019).



**Cristian Cristóbal Cuji Cuji .-** (1986-03). Se graduó de Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, en 2014. Máster en Energía, Facultad de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid –España en 2015. La mayor experiencia laboral fue como Supervisor de Ingeniería en el sector Industrial Textil y Actualmente es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana, colaborando en asignaturas como Centrales de Generación, Termodinámica y Electrónica.



**Diego Enrique Polanco Calvachi.-** (1992-07). Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito. Actualmente se encuentra trabajando en GESCO, una fundación creada por la SENESCYT como coordinador académico de la misma. Área de interés: Energía renovable, Generación, Hidrógeno, Nueva tecnología.