

**EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA
NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y SU UTILIDAD EN
GENERACIÓN ELÉCTRICA.**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA
NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y SU UTILIDAD EN
GENERACIÓN ELÉCTRICA.**

**AUTOR:
DIEGO ENRIQUE POLANCO CALVACHI**

**TUTOR:
ING. CRISTIAN CRISTÓBAL CUJI CUJI**

Quito D.M., septiembre 2020

Diego Enrique Polanco Calvachi

**EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA
NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y SU UTILIDAD
EN GENERACIÓN ELÉCTRICA.**

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto:



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. dpolancoc@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



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. Actualmente es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador. ccuji@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2020 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Cristian Cristóbal Cuji Cuji declaro que, bajo mi dirección y asesoría, fue desarrollado el trabajo de titulación “*EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y SU UTILIDAD EN GENERACIÓN ELÉCTRICA*”, realizado por Diego Enrique Polanco Calvachi, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M, septiembre de 2020



.....
Cristian Cristóbal Cuji Cuji
C.C.:1718002221

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Diego Enrique Polanco Calvachi, con documento de identificación N° 1720749892, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “*EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y SU UTILIDAD EN GENERACIÓN ELÉCTRICA*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor, me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito D.M, septiembre de 2020



.....
Diego Enrique Polanco Calvachi
C.C.:1720749892

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	2
2. Marco teórico	3
2.1 Hidrógeno como fuente energética	3
2.2 Celdas de combustible.....	4
2.3 Clasificación de las celdas de combustible	5
2.4 Ventajas y desventajas en celdas de combustible	5
2.4.1 Ventajas.....	5
2.4.2 Desventajas	6
2.5 Aplicaciones.....	6
2.6 Eficiencia en celdas de combustible	7
2.7 Energy Pay Back Time.....	7
2.8 La Economía del hidrógeno en Ecuador	8
3. Análisis de resultados.....	9
3.1 Resultados en laboratorio.....	10
3.2 Modelamiento de pila de hidrógeno tipo PEM	11
3.3 Estimación de eficiencia en la celda de combustible	12
3.4. Estimación del tiempo de recuperación de la energía y sus costos.....	13
3.5. Análisis FODA del hidrógeno como fuente de combustible.	14
4. Conclusiones	15
5. Trabajos futuros	15
6. Referencias.....	15
7. Matriz de Estado del Arte	18
8. Resumen e Indicadores	25

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de generación eléctrica basada en Hidrógeno	3
Figura 2. Principio Celda de combustible [16]	4
Figura 3. Esquema Celda de combustible	4
Figura 4. Esquema Sistema Eólico-Hidrógeno	6
Figura 5. Proceso de generación de hidrógeno	9
Figura 6. Potencia eléctrica necesaria para generar hidrógeno.	9
Figura 7. Celda de combustible Horizon.....	9
Figura 8. Electrolizador- Horizon	9
Figura 9. Proceso de electrólisis.....	9
Figura 10. Conexión carga a celda de combustible.....	10
Figura 11. Tensión producida por celda de hidrógeno.....	10
Figura 12. Curva de polarización de la pila PEM.	10
Figura 13. Energía eléctrica almacenada.	10
Figura 14. Corriente producida por celda de hidrógeno.	11
Figura 15. Tensión producida por modelo de celda de hidrógeno	11
Figura 16. Densidad de corriente producida por modelo de celda de hidrógeno.....	11
Figura 17. Voltaje bus DC para modelo de celda de hidrógeno.	12
Figura 18. Corriente bus DC para modelo de celda de hidrógeno.	12
Figura 19. Suministro de combustible para pila tipo PEM.	12
Figura 20. Consumo de reactantes dentro de la pila tipo PEM.....	12
Figura 21. Eficiencia pila tipo PEM.....	12
Figura 22. Comparativa de tensión y carga eléctrica	13
Figura 23. Comparación entre E_{in} y E_{out}	14
Figura 24. Potencia requerida para el proceso de electrólisis.	14
Figura 25. Voltaje en función de hidrógeno (modelo).....	14

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Eficiencia de celdas de combustible	5
Tabla 2. Ventajas celdas de combustible	5
Tabla 3. Desventajas celdas de combustible	6
Tabla 4. Aplicaciones celdas de combustible	7
Tabla 5. Costo de producción de hidrógeno.....	8
Tabla 6. Cálculo de EPBT y costos de energía.	14

EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y SU UTILIDAD EN GENERACIÓN ELÉCTRICA.

Resumen

A continuación, se presentan los resultados del estudio de estimación de los costos de energía eléctrica, obtenidos mediante resultados de laboratorio y corroborados por la simulación de la energía generada a base de hidrógeno, para revisar la factibilidad en el ámbito económico dentro del consumo doméstico de energía eléctrica. Para ello, se realizó el análisis energético del hidrógeno en el mercado, mediante el factor de recuperación (EPBT) el cual nos indica el tiempo que necesita una celda de hidrógeno para compensar la energía que utiliza. De los resultados obtenidos en laboratorio y del modelo matemático en el cual se utilizó una celda de combustible tipo PEM, se puede observar la cantidad de energía que se necesita para producir electricidad y el costo de la energía que se produce, la cual es analizada desde el punto de vista energético, técnico y económico, obteniendo así las fortalezas de ser una energía limpia libre de contaminación ya que su único residuo es vapor de agua, pero con la desventaja que en el ámbito eléctrico se producen pérdidas de energía debido a la baja eficiencia de las celdas de combustible.

Palabras clave: Fuentes de energía renovable, Economía de combustible, Medida de potencia, Hidrógeno, Almacenamiento de hidrógeno, Economía de la generación de energía.

Abstract

The following document presents the results of the study of estimating the costs of electrical energy, obtained through laboratory results and then check them through a simulation of the energy generated based on hydrogen, to check the feasibility in the economic field within consumption household electric power. From the results, an energetic analysis of hydrogen was carried out in the market, using the recovery factor (EPBT) which indicates the time it takes for a hydrogen cell to compensate for the energy it uses. From the results obtained in the laboratory and the mathematical model in which a PEM-type fuel cell was used, it is possible to see the amount of energy that is needed to produce electricity and the cost of the energy that is produced, which is analyzed from the energy, technical and economic point of view, thus obtaining the strengths of being a clean energy free of contamination since its only residue is water vapor, but with the great disadvantage that in the electrical field greater energy losses due to the low efficiency of fuel cells.

Keywords: Renewable energy sources, Fuel economy, Power measurement, Hydrogen, Hydrogen storage, Power generation economics.

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 y misiones espaciales, entre otros. [1][3] Si bien es cierto es una fuente atractiva de energía y se debe hablar de la gran limitación que posee esta fuente energética, y el por qué no es muy utilizada en la vida residencial. Esa limitación es el almacenamiento, ya que el hidrógeno al ser un gas tiene una gran volatilidad y para mantenerlo almacenado se necesitan tanques y tuberías especiales que tienen un costo elevado en el mercado. 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 la descomposición del hidrógeno mediante el proceso de electrolisis, 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, como se comentaba, uno de los retos más grandes es el medio de almacenamiento y transporte, ya que para almacenar este gas se utiliza depósitos a una alta presión, de hasta 700 bares marcando así esta característica como principal limitación de su uso. Por 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

La energía es el elemento clave que hace funcionar al mundo, sin ella no tendríamos comodidades cotidianas, como la iluminación, la calefacción en nuestras oficinas y hogares, además de los distintos medios de viaje como autobuses, aviones, autos y motocicletas. Su uso está presente en nuestro diario vivir y rige nuestro estilo de vida actual, más del 90 % de la energía mundial, usa como combustible el carbón, el petróleo y el gas natural, por ende, estas tres fuentes de energía están llegando a su punto máximo de escases, es decir que contamos con un régimen energético que depende en su mayoría de recursos no renovables, con posibilidad de llegar al límite en muy poco tiempo, cuando este tipo de fuentes estén en escases provocara un alto costo afectando a la

economía mundial, así que en nuestro país y el resto del mundo se cuantifican y evalúan las alternativas para la generación de energía eléctrica a base de recursos renovables y de ser posible que emitan una baja o nula contaminación para reducir el impacto ambiental llegando así a obtener energía libre de CO₂ de forma limpia, segura y confiable para el medio ambiente evitando el daño a la capa de ozono y reduciendo el calentamiento global.

2.1 Hidrógeno como fuente energética

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

Una celda de combustible es un módulo electroquímico, cuya función de transformar el combustible en energía es muy parecida a una batería, pero con la diferencia, que esta permite el reabastecimiento constante de los reactivos utilizados; es decir, 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 utiliza una membrana de intercambio protónico con la cual se separa el oxígeno del hidrógeno mediante un proceso electroquímico llamado electrólisis [14]. Una celda de combustible utiliza hidrógeno en el lado positivo y oxígeno en el lado negativo como podemos observar en la figura 2 [12] [15].

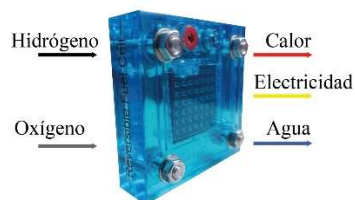


Figura 2. Principio Celda de combustible [16]

El proceso de electrólisis en la membrana polimérica (PEM) ayuda a la disociación del agua en hidrógeno y oxígeno de una forma limpia y segura pero pese a tener grandes ventajas los costos en el mercado no han permitido el uso de esta tecnología para producir hidrógeno de forma generalizada. 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][17].

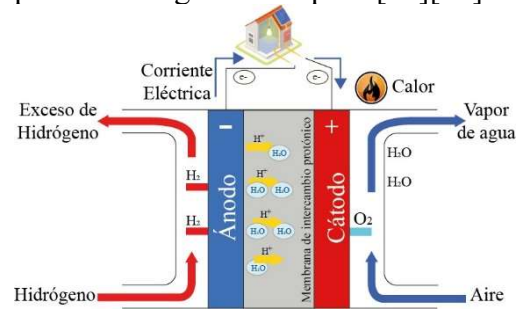
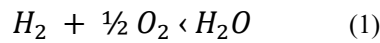


Figura 3. Esquema Celda de combustible

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][18]. En la figura 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 [18][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:



2.3 Clasificación de las celdas de combustible

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] [19].

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 (MCFC)	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%

2.4 Ventajas y desventajas en celdas de combustible

2.4.1 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 (MCFC)	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.

2.4.2 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 [20][19]. 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
CELDA DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEM)	Catalizadores costosos y no admite impurezas.
CELDA DE COMBUSTIBLE ALCALINAS (AFC)	No admite impurezas, únicamente se emplea hidrógeno puro.
CELDA DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)	Consta con un gran peso y poca corriente y potencia.
CELDA DE CARBONATO FUNDIDO (MCFC)	Poca vida útil ante la corrosión a gran temperatura. Permite el uso de hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre.
CELDA 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.

2.5 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 [17][21]. 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 figura 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 enviado por medio de un convertidor DC adecuado para un electrolizador, el cual ayuda a descomponer el agua y así obtener hidrógeno, que posteriormente será llevado a un compresor, para alcanzar los niveles necesarios de presión para el consumo o almacenamiento. Así que, cuando el aerogenerador tiene una baja actividad, se activa la celda, convirtiendo el hidrógeno almacenado en energía [22] [20].

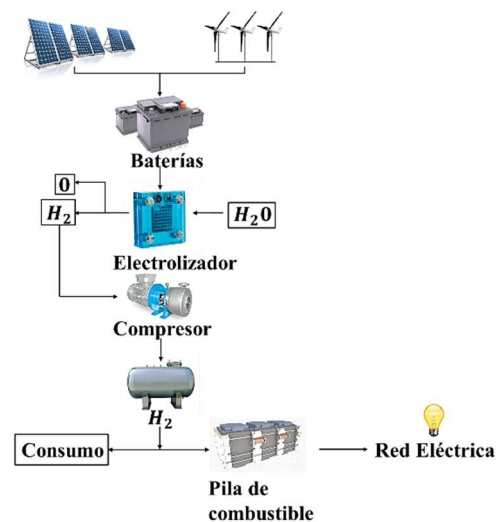


Figura 4. Esquema Sistema Eólico-Hidrógeno

En la Tabla 4 se exponen algunas aplicaciones por cada tipo de celda [22] [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

2.6 Eficiencia en celdas de combustible

Para determinar la eficiencia de la celda de combustible, sin considerar las pérdidas mecánicas y térmicas que son despreciables ya que son mínimas [23], comparamos la masa de hidrógeno entrante con la masa de hidrógeno saliente [24][18], 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:

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

2.7 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 [25]. 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 [25][26].

El EPBT es calculado usando la siguiente ecuación

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

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:

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

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 [25][22].

2.8 La Economía del hidrógeno en Ecuador

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 [27][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:

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

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

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

Y la energía total necesaria para separarlo:

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

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 [28] por el consumo de hasta 1 kWh al mes y va hasta los 2.56 dólares por el consumo de hasta 300kWh; 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

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

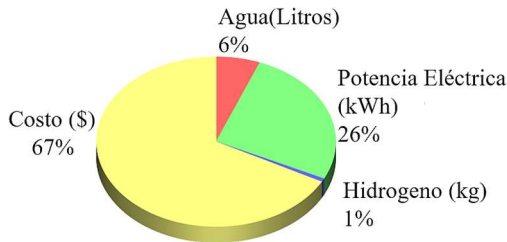


Figura 5. Proceso de generación de hidrógeno

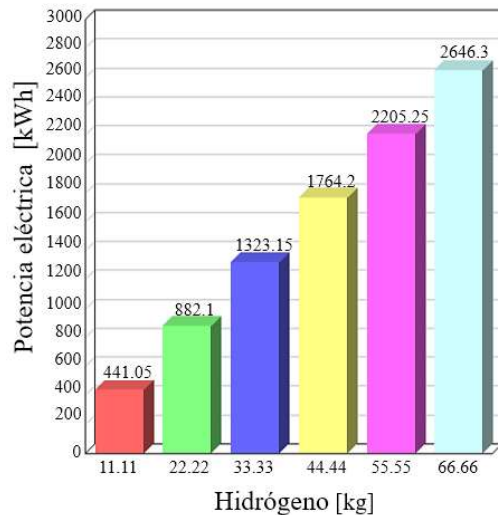


Figura 6. Potencia eléctrica necesaria para generar hidrógeno.

En la figura 5 se muestra al costo de del proceso de electrólisis para obtener hidrógeno comparándolo con la potencia que genera, el agua que ingresa y el hidrógeno que crea, obteniendo como resultado que el costo es muy elevado y no justifica en el ámbito económico su producción, para ratificar lo antes dicho en la figura 6 se muestra la potencia eléctrica necesaria para generar cierta cantidad de hidrógeno.

3. Análisis de resultados

Para este estudio se utilizó el equipo nombrado FCJJ-16, que es un electrolizador con una membrana de intercambio protónico tipo Nafion 112 del fabricante Horizon [16]. 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 A
- La tasa de producción de hidrógeno: 5ml/min
- Tasa de producción de oxígeno: 2.5ml/min

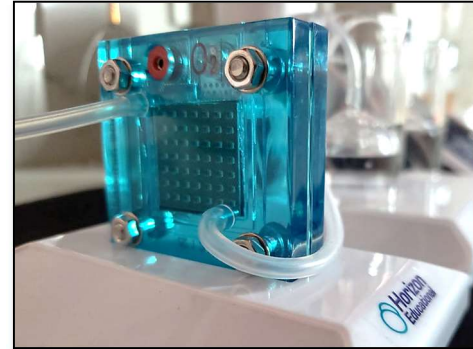


Figura 7. Celda de combustible Horizon

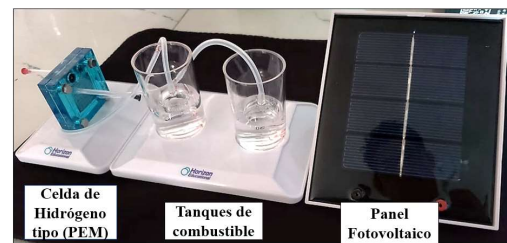


Figura 8. Electrolizador- Horizon

A continuación, en la figura 7 y 8 se visualiza 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 de la figura 9, y llenarlos con aproximadamente 30 mililitros de agua destilada. Luego, se conecta una

fuente de poder a la celda de combustible, para iniciar el proceso de electrólisis y separar el oxígeno e hidrógeno del agua destilada.

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 figura 10.

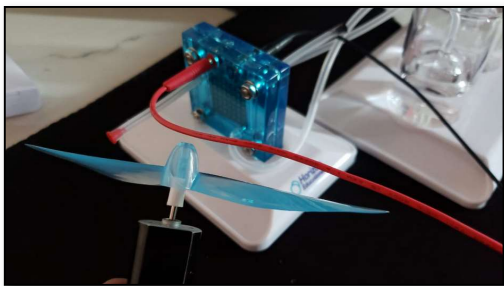


Figura 10. Conexión carga a celda de combustible.

3.1 Resultados en laboratorio

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

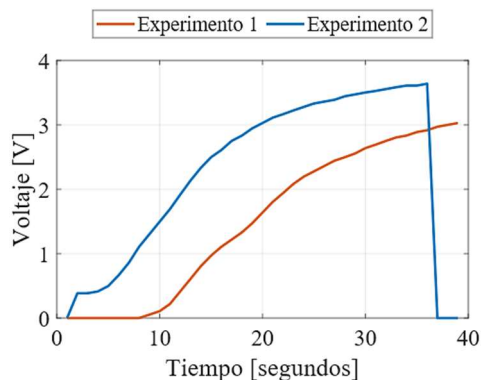


Figura 11. Tensión producida por celda de hidrógeno.

En la figura 11 [23] se observa 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 se nota 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 figura 12 se toma una sección en la cual indica la descarga de la celda de combustible al ser conectada a una carga.

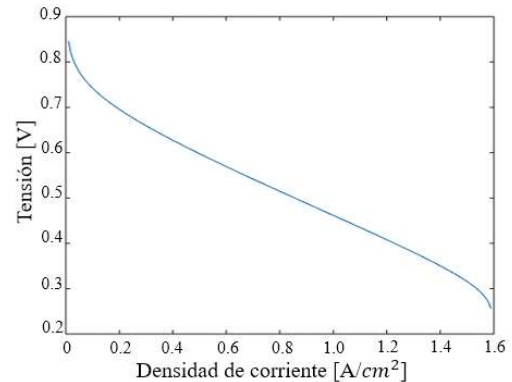


Figura 12. Curva de polarización de la pila PEM.

En la figura 12 se puede apreciar que 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.

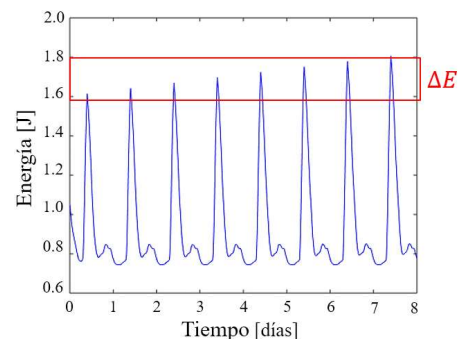


Figura 13. Energía eléctrica almacenada.

En la figura 13 se visualiza cómo la celda de combustible genera energía, llega 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, se pone atención en la disminución de la energía en cada día debido al consumo por la carga en cada prueba.

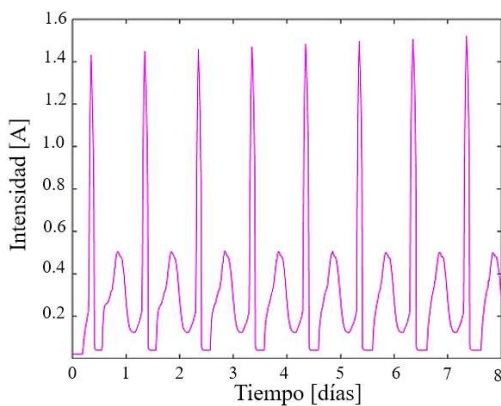


Figura 14. Corriente producida por celda de hidrógeno.

En la figura 14 se tiene el comportamiento de la intensidad de corriente al ser almacenada durante varias pruebas, llegando a picos de hasta 1.54 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 de pila de hidrógeno tipo PEM

Para corroborar este comportamiento, se procede a modelar una pila de hidrógeno 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:

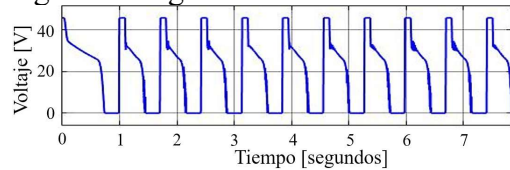


Figura 15. Tensión producida por modelo de celda de hidrógeno

En la figura 15, se puede señalar que 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 figura 16, 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/cm²[13].

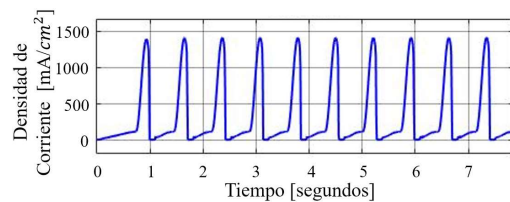


Figura 16. Densidad de corriente producida por modelo de celda de hidrógeno.

Para optimizar este modelo matemático, procedemos a conectar un bus DC y atenuar los picos de corriente y voltaje con 100Vdc obteniendo como resultado la figura 17 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 dato 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 figura 18 se observa 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 resistividad de sus materiales y al tener una resistencia pequeña con un voltaje alto se obtiene una cantidad de corriente superior.

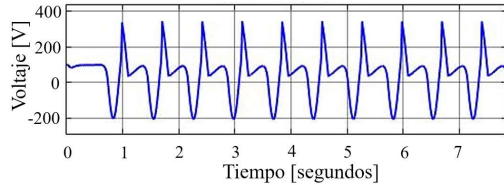


Figura 17. Voltaje bus DC para modelo de celda de hidrógeno.

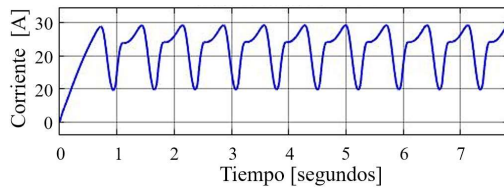


Figura 18. Corriente bus DC para modelo de celda de hidrógeno.

Gracias al modelo realizado, es posible observar la producción y suministro de combustible, los cuales se encuentran detallados en la figura 19; así como el consumo de los mismos, en la figura 20.

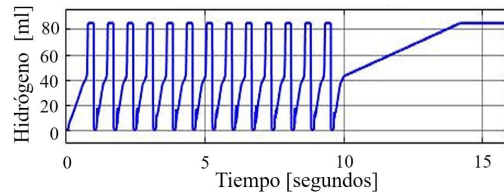


Figura 19. Suministro de combustible para pila tipo PEM.

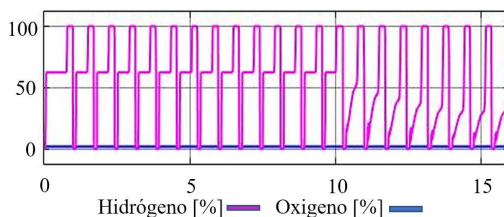


Figura 20. Consumo de reactantes dentro de la pila tipo PEM.

Como se muestra en las figuras 19 y 20, 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.

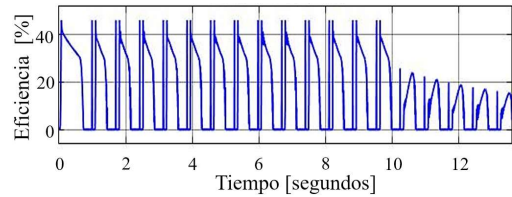


Figura 21. Eficiencia pila tipo PEM.

Por último, en la figura 21 se observa que la eficiencia de la pila supera los 40% y se reitera 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 de combustible

Tomando los valores propuestos de 1.26 kW a 24 V calculamos el número de celdas necesarias para suministrar la carga requerida de la siguiente forma:

$$\#celdas = \frac{I_{salida}}{I_{celda}} * \text{factor de seguridad} \quad (10)$$

$$\#celdas = \frac{52.5 \text{ A}}{1.5 \text{ A}} * 1.2 = 42 \quad (11)$$

El número que se necesita es de 42 celdas formando el stock de la pila, además de los valores obtenidos en las pruebas calculamos el consumo del hidrógeno al interior de la celda, sabiendo que la relación estequiométrica es de 1.2:

$$m_{H_2.in} = S_{H_2} \frac{m_{H_2}}{2F} I n_{cell} \quad (12)$$

$$m_{H_2.in} = 1.2 \frac{2.016 \text{ g/mol}}{2(96485.34 \text{ C/mol})} 1.25 * (42) \quad (13)$$

$$m_{H_2.in} = 6.564 * 10^{-4} \frac{g}{s} \quad (14)$$

Este es el valor mínimo de hidrógeno entrante a la celda de

combustible para obtener los valores de potencia y corriente propuestos. El siguiente calculo ayuda a encontrar el flujo de hidrógeno saliente de la celda de combustible usando la siguiente ecuación:

$$m_{H_2out} = (S_{H_2} - 1) \frac{m_{H_2}}{2F} I n_{celda} \quad (15)$$

$$m_{H_2out} = (1.2 - 1) \frac{2.016 \text{ g/mol}}{2(96485.34 \text{ C/mol})} 1.25 * 42 \quad (16)$$

$$m_{H_2out} = 10.968 * 10^{-4} \frac{g}{s} \quad (17)$$

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 figura 22.

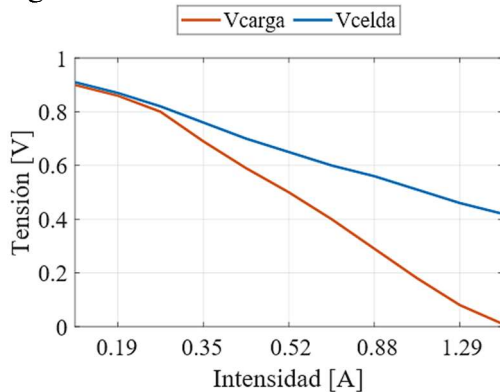


Figura 22. Comparativa de tensión y carga eléctrica.

En la figura 22 se observan que las intensidades coinciden, dado que las diferencias son prácticamente menores debido a la baja resistencia de la membrana polimérica.

$$n = \frac{m_{H_2in}}{m_{H_2out}} \quad (18)$$

$$n = \frac{6.564 \times 10^{-4} \frac{g}{s}}{10.968 \times 10^{-4} \frac{g}{s}} = 0.598 \quad (19)$$

$$n = 59\% \quad (20)$$

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 del tiempo de recuperación de la energía y sus costos

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

$$EPBT \text{ (years)} = \frac{E_{in}}{E_{out}} \quad (21)$$

$$EPBT \text{ (years)} = \frac{5 \text{ kWh}}{2.995 \text{ kWh}} \quad (22)$$

$$EPBT \text{ (years)} = 1.67 \text{ años} \quad (23)$$

En base a estos resultados se observa que el EPBT es de 1.67 años, este es el tiempo requerido durante la etapa de uso de la celda de hidrógeno para compensar la energía invertida en su ciclo de vida [22]. 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 se toma el valor del modelo en el que se ocupó 2.74 kWh para generar 1.26 kWh es decir:

$$2.74 \text{ kWh} * 0.11 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 0.30 \text{ dólares} \quad (24)$$

$$1.26 \text{ kWh} * 0.11 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 0.14 \text{ dólares} \quad (25)$$

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 hidrógeno sin causar daño al medio ambiente. Tras realizar este análisis se procede a corroborar los resultados mediante el modelo realizando varios experimentos 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

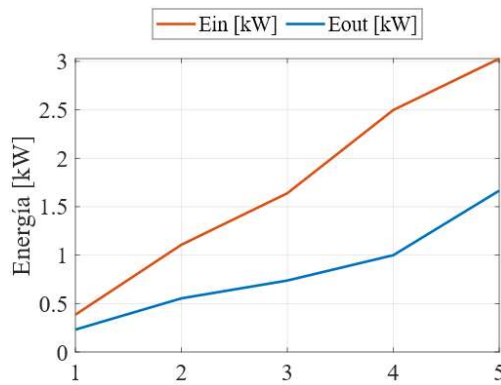


Figura 23. Comparación entre Ein y Eout

En la figura 23 y la tabla 6 se entiende que 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.

3.5. Análisis FODA del hidrógeno como fuente de combustible.

Con este análisis se propone estimar la factibilidad del uso de hidrógeno como posible fuente energética como uso residencial, para ello se evalúa el costo de producción del hidrógeno en la tabla

5 y la figura 24 la cual expone la potencia necesaria para disociar en 1 hora 500 litros de agua por medio de electrolisis y así obtener hidrógeno.

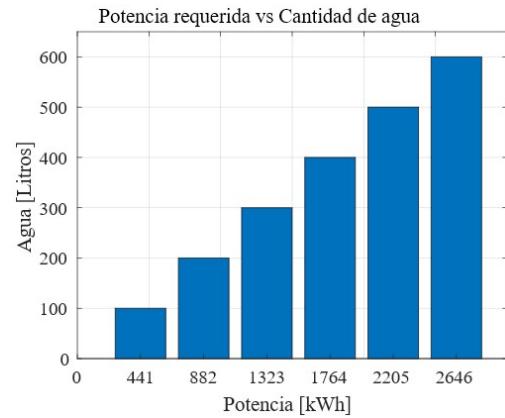


Figura 24. Potencia requerida para el proceso de electrolisis.

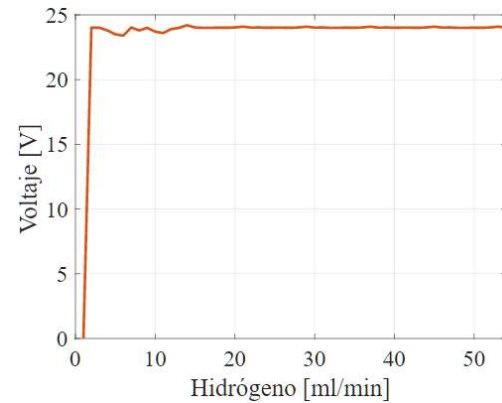


Figura 25. Voltaje en función de hidrógeno (modelo)

Al realizar un análisis foda del hidrógeno como medio energético, se observa una de las facultades del hidrógeno, en la figura 25, la cual analiza al voltaje en función del hidrógeno y se visualiza que el voltaje es constante hasta que se conecte una carga a la pila de combustible, y por otra parte la implementación de esta tecnología para el uso residencial tiene varias desventajas como por ejemplo el almacenamiento, ya que este gas tiende a ser volátil, por otro lado también tenemos la producción ,ya que se necesita más potencia eléctrica que la que genera, creando así un alto costo

económico que es un factor muy influyente al momento de realizar un proyecto, dando como resultado que el uso de hidrógeno a nivel residencial por el momento no es factible.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en laboratorio correspondientes a mediciones de las celdas de combustible tienen una curva de tensión con valores máximos de 3.6V y valores mínimos de 2.99V, el cual significa que el uso continuo de la celda de combustible ayuda a elevar la eficiencia de la misma hasta un cierto punto, puesto que la membrana polimérica se humedece ayudando al proceso electroquímico en la generación de energía eléctrica.

La evaluación de EPBT, permite conocer que la tecnología propuesta aún se encuentra en desarrollo. El tiempo para justificar el costo de la energía que proporciona es de 1.67 años, ya que al pasar de un proceso a otro obtiene un desgaste en el cual la energía varía disminuyendo así su cantidad considerablemente, dando como resultado que el hidrógeno representa una gran pérdida hablando económicamente y eléctricamente.

El modelamiento de la celda de combustible tipo PEM permite observar una eficiencia no mayor al 60%, que es muy común en las de tipo PEM pero existen otro tipo de celdas que llegan hasta un 90% de eficiencia, en los resultados de laboratorio la energía que ingresa es de 2.52V pero luego de todo el proceso electroquímico la celda generó 1V 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 fuente de combustible en el uso doméstico.

5. Trabajos futuros

El presente trabajo es una base para determinar posibles líneas futuras de investigación. Cabe recalcar que es necesario nuevas tecnologías o mejoras significativas para del uso de las celdas de combustible para lograr encontrar un mayor rendimiento no solo para el uso residencial e industrial sino también para automóviles robots e incluso viajes espaciales, así como la investigación de la fabricación de este gas o la investigación de como almacenarlo de manera eficiente y no muy costosa ya que el hidrógeno al ser un combustible que no se termina puede tener varios tipos de uso.

6. Referencias

- [1] J. Valero Matas and J. Romay Coca, "Políticas científicas en materia de renovables: el caso del hidrógeno como fuente básica energética," *RIPS Rev. Investig. 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," *Rev. Int. Sociol.*, 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," *An. la Univ. Metrop.*, 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 Univ.*, 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, [Online]. Available: <https://www.revistaespacios.com/a18v39n32/a18v39n32p22.pdf>.
- [7] H. Untuk and S. Smp, “Uso del hidrogeno como fuente alternativa para alimentar pilas de combustible,” *Fund. Univ. américa*, 2018.
- [8] H. Américo and A. Visintin, “Hidrógeno, Combustible Del Futuro: ¿Por Qué, Cómo Y Dónde?,” *Inst. Investig. Fis. Teóricas y Apl.*, 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,” *Oilf. Rev.*, pp. 34–47, 2005, [Online]. Available: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish05/sum05/p34_47.pdf.
- [10] R. Sánchez-dirzo, R. Silvacasarín, G. Edgar, and M. R. D. G. González-huerta, “Hidrógeno Del Mar,” *TIP Rev. Espec. 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,” *Univ. Politècnica 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 Int. la energía Sosten. para todos*, p. 19, 2012, [Online]. Available: www.energia2012.es.
- [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,” *Rev. Cuba. Química*, vol. XXV, no. 2, pp. 165–179, 2013.
- [16] M. F. No, “Solar Hydrogen Education Kit Battery operation instructions ;,” *Horizone cell fuel*, 2008.
- [17] 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,” *An. la Real Acad. Dr. España*, vol. 3, no. 1, pp. 183–186, 2018.
- [18] V. M. Orera, “Hidrógeno y Pilas de combustible Hidrógeno y Pilas de Combustible,” *Fund. OPTI*, no. April, 2007.
- [19] 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,”

- Libr. Trab. Complet. del III Congr. Nac. Cienc. y Tecnol.*, no. 1, pp. 1–10, 2017.
- [20] I. De Rob and R. C. Castell, “Control de temperatura en pilas de combustible tipo PEM de c ´ atodo abierto .,” *Com. Español Automática la IFAC*, pp. 3–5, 2014.
- [21] J. Romero Polanco, “Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción,” *Univ. Valladolid Esc.*, p. 134, 2018, [Online]. Available: <http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31495/TFG-I-929.pdf;jsessionid=A26BA53F15FBA2352834CF31E42931D5?sequence=1>.
- [22] G. Palmer and J. Floyd, “An Exploration of Divergence in EPBT and EROI for Solar Photovoltaics,” *Biophys. Econ. Resour. Qual.*, vol. 2, no. 4, 2017, doi: 10.1007/s41247-017-0033-0.
- [23] L. F. T. Vergara, “Diseño Y Construcción De Un Prototipo De Celda De Combustible (Tesis de Maestría),” p. 120, 2015, [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11517/1/CD-6497.pdf>.
- [24] A. M. Aguirre, “Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico,” *Univ. Carlos III Madrid*, p. 231, 2009.
- [25] 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,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 133–141, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.057.
- [26] C. Toledo Arias and V. Campos Guzmán, “Consideraciones en el tiempo de retorno energético de sistemas fotovoltaicos integrados arquitectónicamente en edificios,” *Anu. Jóvenes Investig.*, vol. 9, no. 9, pp. 144–147, 2016.
- [27] D. G. Couret, “Las energías renovables al servicio de la humanidad Renewable Energies in the service of mankind,” *Arquit. y Urban.*, vol. XXXVI, no. 1, pp. 93–98, 2015, [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-58982015000100008.
- [28] C.- Esmeraldas *et al.*, “PRECIO MEDIO DE ENERGÍA FACTURADA (USD ¢/kWh),” *Regul. eléctrica*, p. 2017, 2017, [Online]. Available: https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/15_PRECIO_MEDIO_ENERGIA_FACTURADA.pdf.

7. Matriz de Estado del Arte

EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROGENO Y SU UTILIDAD EN GENERACIÓN ELÉCTRICA.																				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
				Hidrógeno	Celdas de combustible	Energy Pay Back Time	La Economía del hidrógeno	Cálculo de la eficiencia en celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Estimación de eficiencia en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Costo de producción de hidrógeno	Energy Pay Back Time	Operación de la celda de combustible	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía
1	2009	Políticas científicas en materia de renovables: el caso del hidrógeno como fuente básica energética	42	X	X	□	□	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
2	2010	El Espejismo De Una Energía Social: La Economía Del Hidrógeno	21	X	X	□	□	X	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
3	2004	Hacia una economía basada en el hidrógeno	4	□	X	□	□	□	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
4	2012	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	20	X	X	□	□	X	X	□	□	□	□	□	□	□	X	X	□	□

EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROGENO Y SU UTILIDAD EN GENERACIÓN ELÉCTRICA.

ITEM	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Hidrógeno	Celdas de combustible	Energy Pay Back Time	La Economía del hidrógeno	Cálculo de la eficiencia en celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Estimación de eficiencia en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Costo de producción de hidrógeno	Energy Pay Back Time	Operación de la celda de combustible	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía
5	2014	El Negocio De Las Energías Renovables En Los Balcanes	42	X	X	□	X	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	X
6	2018	Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia	20	X	X	□	□	X	□	X	□	X	□	□	□	□	□	□	□	□
7	2018	Uso del hidrogeno como fuente alternativa para alimentar pilas de combustible	73	X	X	X	X	□	X	X	X	X	X	X	X	X	□	X	X	X
8	2010	Hidrógeno, Combustible Del Futuro: ¿Por Qué, Cómo Y Dónde?	1	X	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	X	□	□	□

EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROGENO Y SU UTILIDAD EN GENERACIÓN ELÉCTRICA.

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
					Hidrógeno	Celdas de combustible	Energy Pay Back Time	La Economía del hidrógeno	Cálculo de la eficiencia en celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Estimación de eficiencia en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Costo de producción de hidrógeno	Energy Pay Back Time	Operación de la celda de combustible	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía
9	2012	Hidrógeno. Pilas de combustibles de tipo PEM		16	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	2015	Las energías renovables al servicio de la humanidad Renewable Energies in the service of mankind		31	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	2011	Producción De Electricidad En Celdas De Combustible Microbianas Utilizando Agua Residual: Efecto De La Distancia Entre Electrodo		12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	2018	Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables		5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROGENO Y SU UTILIDAD EN GENERACIÓN ELÉCTRICA.

DATOS		TEMÁTICA	FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA									
ITEM	AÑO		TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Hidrógeno	Celdas de combustible	Energy Pay Back Time	La Economía del hidrógeno	Cálculo de la eficiencia en celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Estimación de eficiencia en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Costo de producción de hidrógeno	Energy Pay Back Time	Operación de la celda de combustible	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía
13	2002	Energía y ambiente : pasado , presente y futuro . Parte dos : Sistema energético basado en energías alternativas Universidad de los Andes Cómo citar el artículo Número complet	18	X	□	□	X	X	X	□	□	□	X	□	□	□	□	X	□	□	
14	2008	Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM	36	□	□	X	X	□	□	X	X	□	□	□	□	X	□	□	□	□	X
15	2013	Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia	13	X	X	□	□	□	X	□	□	X	□	□	X	□	□	□	□	X	□
16	2015	Estudio sobre la aplicación de hidrógeno como combustible alternativo a bordo de buques	26	□	X	□	X	□	□	X	□	□	□	X	□	□	□	□	□	□	X
17	2009	Combustible hidrógeno para el ciclo Rankine	44	□	X	X	□	X	□	X	□	□	□	□	□	□	□	X	□	□	X

EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROGENO Y SU UTILIDAD EN GENERACIÓN ELÉCTRICA.

DATOS		TEMÁTICA	FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA								
ITEM	AÑO		TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Hidrógeno	Celdas de combustible	Energy Pay Back Time	La Economía del hidrógeno	Cálculo de la eficiencia en celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Estimación de eficiencia en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Costo de producción de hidrógeno	Energy Pay Back Time	Operación de la celda de combustible	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible
18	2017	Estudio de diferentes celdas de combustible microbianas para la generación de energía a partir de residuos orgánicos de efluentes líquidos	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19	2013	Estudio de la producción de hidrógeno mediante fotocátalisis heterogénea	12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	2013	Análisis del ciclo de vida para la producción de hidrógeno como combustible del futuro	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21	2007	Hidrógeno y Pilas de combustible Hidrógeno y Pilas de Combustible	15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	2011	Membrana polimérica	19	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROGENO Y SU UTILIDAD EN GENERACIÓN ELÉCTRICA.

ITEM	AÑO	DATOS	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
				Hidrógeno	Celdas de combustible	Energy Pay Back Time	La Economía del hidrógeno	Cálculo de la eficiencia en celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Estimación de eficiencia en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Costo de producción de hidrógeno	Energy Pay Back Time	Operación de la celda de combustible	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía
23	2014	Control de temperatura en pilas de combustible tipo PEM de catodo abierto	5	X	□	X	X	□	□	□	X	□	X	□	□	X	X	□	□	
24	2018	Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción	76	X	X	□	X	X	X	X	□	X	□	X	□	□	□	□	X	
25	2017	An Exploration of Divergence in EPBT and EROI for Solar Photovoltaics	13	□	X	X	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□	X	□	□	
26	2017	PRECIO MEDIO DE ENERGÍA FACTURADA (USD ¢/kWh)	0	□	□	□	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	
27	2008	Solar Hydrogen Education Kit Battery operation instructions	0	□	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	

EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROGENO Y SU UTILIDAD EN GENERACIÓN ELÉCTRICA.

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
					Hidrógeno	Celdas de combustible	Energy Pay Back Time	La Economía del hidrógeno	Cálculo de la eficiencia en celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Estimación de eficiencia en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Costo de producción de hidrógeno	Energy Pay Back Time	Operación de la celda de combustible	Ventajas y desventajas en celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Celdas de combustible	Aplicaciones de las celdas de combustible	Estimación de EPBT y costos de energía
28	2015	Diseño Y Construcción De Un Prototipo De Celda De Combustible		83	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CANTIDAD:					12	15	11	12	13	9	10	9	7	8	7	3	2	7	8	4	9

8. Resumen e Indicadores

