EIEI ACOFI 2025
5º Congreso Latinoamericano de Ingeniería
Más Información: www.acofi.edu.co/eiei
Ingeniería de impacto para cuidar y transformar la vida
ACOFI: 50 años por la excelencia de la educación en ingeniería.

Determinación de la eficiencia energética en celdas de combustible PEM en Colombia: comparación experimental y teórica

Daniela García Céspedes, María Camila Benítez Álvarez, Juan Esteban Tibaquirá Giraldo

Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia

Resumen

En este trabajo se presentan dos enfoques de estudio para llevar a cabo el análisis energético de la celda de combustible tipo PEM. El primer enfoque consiste en un banco de experimentos para medir variables de interés como, el voltaje y la corriente de la celda, el caudal de hidrógeno suministrado y las temperaturas en la celda. El segundo se trata de un estudio analítico implementado en un software de ingeniería para determinar parámetros como las pérdidas de calor, la potencia y la eficiencia. Teniendo en cuenta que en la celda ocurren procesos electroquímicos se plantean cinco (5) casos de estudio, en donde se consideran diferentes relaciones entre los reactivos y productos, con el fin de determinar la incidencia de estas consideraciones en la eficiencia energética de la celda. Estos casos de estudio junto al diseño experimental son comparados con los resultados obtenidos por el fabricante, como las curvas características, la potencia y eficiencia. Durante la caracterización de la celda se encontró que los parámetros que más inciden en las discrepancias entre los resultados experimentales y los datos suministrados por el fabricante son las condiciones de operación y la degradación de los materiales de la celda.

Palabras clave: eficiencia energética; hidrógeno; celdas de combustible PEM; descarbonización

Abstract

This study presents two study approaches to carry out the energy analysis of a Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell. The first approach consists of an experimental setup to measure key variables such as cell voltage and current, the hydrogen flow rate supplied, and the temperatures within the cell. The second approach involves an analytical study implemented in engineering software to determine parameters such as heat losses, power output, and efficiency. Considering

DOI: https://doi.org/10.26507/paper.4628

that electrochemical processes occur within the cell, five (5) case studies are proposed, where different relationships between reactants and products are considered to determine their impact on the cell's energy efficiency. These case studies, along with the experimental design, are compared with the results provided by the manufacturer, such as characteristic curves, power output, and efficiency. During the cell characterization, it was found that the parameters most affecting the discrepancies between the experimental results and the manufacturer's data are the operating conditions and the degradation of the cell materials.

Keywords*: energy efficiency; hydrogen; PEM fuel cells; decarbonization*

1. Introducción

Actualmente, a nivel mundial se ha promovido el uso de energías renovables con el objetivo de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y mejorar la calidad del aire (Al Naimat & Liang, 2023), (Hoicka et al., 2021). De acuerdo con el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), el compromiso de mantener la temperatura promedio global por debajo de 2 °C para el año 2050 no se cumplirá; por tanto, es necesario continuar adelantando acciones de mitigación en los sectores más contaminantes (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018). En respuesta a esta necesidad global, los países han concentrado sus esfuerzos en encontrar alternativas para reducir las emisiones de los sectores con mayor dificultad de descarbonización, entre las cuales se destaca la incorporación del hidrógeno (H_2) como vector energético (Anser et al., 2025), (IEA, 2021),(Mantilla & Santos, 2022). Para integrar el H_2 en distintos ámbitos de la economía, se han desarrollado planes específicos, en el sector transporte se ha propuesto la adopción de vehículos impulsados por celdas de combustible de hidrógeno (Wang et al., 2023), (Gobierno de Colombia & (BID), 2021). En el contexto colombiano, la Hoja de Ruta del Hidrógeno, establece un despliegue escalonado de la tecnología, tanto en el sector transporte como en industria, con metas definidas hasta 2030 (Wu et al., 2025). Sin embargo, su implementación efectiva exige superar barreras clave, como el déficit de infraestructura de producción y distribución de H_2, formación técnica especializada y generación de estudios experimentales que validen su desempeño en condiciones reales de operación (Mantilla & Santos, 2022).

En este sentido, se han realizado estudios comparativos entre la eficiencia energética de las celdas de combustible y otros equipos de conversión de energía, encontrando que las celdas de combustible presentan una mayor eficiencia energética al compararla con los motores de combustión interna (Gobierno de Colombia & (BID), 2021).

Las celdas de combustible tipo PEM han sido ampliamente estudiadas por su potencial para generar electricidad mediante una reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno, con agua como único subproducto (Wu et al., 2025). En comparación con los motores térmicos, estas celdas presentan ventajas como mayor eficiencia, operación silenciosa y cero emisiones locales de contaminantes (Gobierno de Colombia & (BID), 2021).

En este contexto, se plantea la evaluación energética de una celda de combustible PEM de 100 W, operada con hidrógeno puro y aire atmosférico, bajo condiciones reales en la ciudad de Pereira.

Se realiza un análisis experimental, implementando un banco de pruebas, y un análisis teórico a través de un modelo computacional. La combinación de ambos enfoques permite estimar la eficiencia del sistema, cuantificar pérdidas energéticas y comparar el desempeño real con los datos proporcionados por el fabricante.

2. Metodología

El análisis energético de la celda de combustible tipo PEM se abordó mediante un enfoque experimental y un modelo teórico, aplicado a un banco de pruebas en un sistema de cátodo abierto marca Horizon, modelo H-100W (Ilustración 1). La celda fue operada con hidrógeno seco de alta pureza (99,995 %) y aire atmosférico, bajo condiciones ambientales locales. Durante las pruebas, se registraron variables eléctricas, térmicas y de flujo, que permitieron alimentar el modelo energético y validar el comportamiento real del sistema frente a su desempeño teórico.

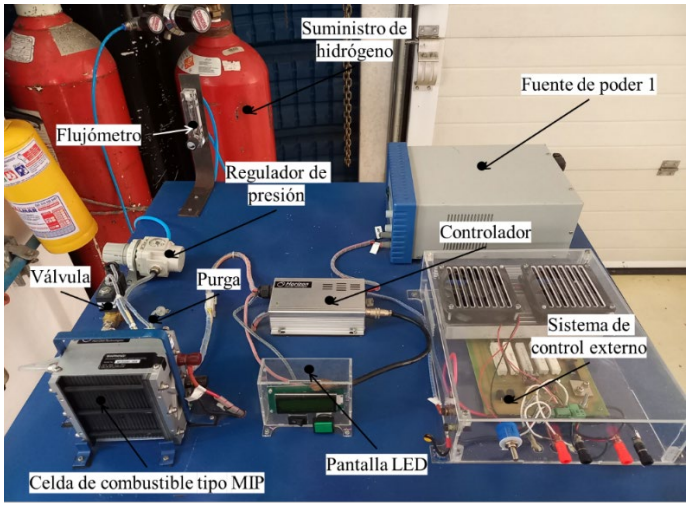

Ilustración 1. Banco experimental celda de combustible tipo MIP

La caracterización experimental se realizó utilizando un banco de pruebas con sensores de voltaje, corriente, temperatura y caudal. La celda fue sometida a diferentes niveles de carga eléctrica hasta alcanzar su punto de operación óptimo, correspondiente a una potencia máxima de 95,9 W, alcanzada a una corriente de 8,6 A y un voltaje de 11,15 V. Las condiciones ambientales durante las pruebas fueron estables, con una temperatura promedio de 28,21 °C y una presión de 86 kPa. Estas condiciones se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones operativas de entrada

Corriente (I)	**Voltaje de la celda (V_{celda})**	**Temperatura ambiente (T_0)**	**Presión (P_0)**
8, 6 A	11,15 V	28,21 °C	86 kPa

Fuente: Elaboración propia.

Además, se realizó la medición de las temperaturas del sistema mediante sensores tipo termopar ubicados en diferentes zonas de la carcasa y en el flujo de aire. Las temperaturas promedio registradas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Temperaturas de interés en la celda de combustible

Temperaturas*					
$T_{s,Delantera}$	**$T_{s,Posterior}$**	**$T_{s,laterales}$**	**$T_{s,Superior}$**	**$T_{in,aire}$**	**$T_{out,aire}$**
40,29 °C	33,01 °C	39,11 °C	39,46 °C	30,38 °C	41,65 °C

Fuente: Elaboración propia.
*Los subíndices "s" hacen referencia a temperaturas superficiales. In: entrada y out: salida.

Teniendo en cuenta que en la celda ocurren procesos electroquímicos se plantean cinco (5) casos de estudio, que consideran las diferentes reacciones entre los reactivos y productos con el fin de determinar la incidencia de estos en la eficiencia energética de la celda. Cada uno de los casos se calcula teniendo en cuenta el caudal promedio de hidrógeno de 6,29 mol/h obtenido a la corriente determinada.

Caso 1. Balance estequiométrico ideal

$$\mathbf{6,29}H_2 + \mathbf{3,14}\ O_2 \rightarrow\ \mathbf{6,29}\ H_2O \tag{1}$$

Caso 2. Balance estequiométrico considerando entrada de aire

$$\mathbf{6,29}H_2 + \mathbf{3,14}(O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow\ \mathbf{6,29}\ H_2O + \mathbf{11,83}N_2 \tag{2}$$

Caso 3. Balance estequiométrico considerando exceso de aire

$$\begin{gathered}\mathbf{6,29}H_2 +\ \mathbf{6,29}(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow \\ \mathbf{6,29}\ H_2O + \mathbf{11,83}N_2 + \mathbf{3,14}(O_2 + 3{,}76N_2)\end{gathered} \tag{3}$$

Caso 4. Balance estequiométrico considerando aire y pérdidas del 5% H_2

$$\begin{gathered}\mathbf{6,29}H_2 +\ \mathbf{3,14}(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow \\ \mathbf{5,97}\ H_2O + \mathbf{11,23}N_2 + \mathbf{0,31}H_2 + \mathbf{0,15}(O_2 + 3{,}76\ N_2)\end{gathered} \tag{4}$$

Caso 5. Balance estequiométrico considerando pérdidas de 5% H_2 y exceso de aire

$$\begin{gathered}\mathbf{6,29}H_2 +\ \mathbf{6,29}(O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow \\ \mathbf{5,97}\ H_2O + \mathbf{11,23}N_2 + \mathbf{0,31}H_2 + \mathbf{3,30}(O_2 + 3{,}76\ N_2)\end{gathered} \tag{5}$$

El modelo teórico se fundamentó en un balance energético por primera ley, que permite establecer la eficiencia de la celda como la razón entre la energía útil generada y la energía total de entrada por I. D. (Gimba et al., 2016). La ecuación general utilizada fue:

$$\dot{E}_{neto} = \dot{E}_{H_2,in} + \dot{E}_{aire,in}\ -\ \dot{E}_{productos} - \dot{E}_{pérdidas}\ -\ \dot{E}_{rect}\ -\ \dot{E}_{Eléctrico} \tag{6}$$

En la ilustración 2 se presenta el esquema del flujo de energías para realizar su respectivo balance.

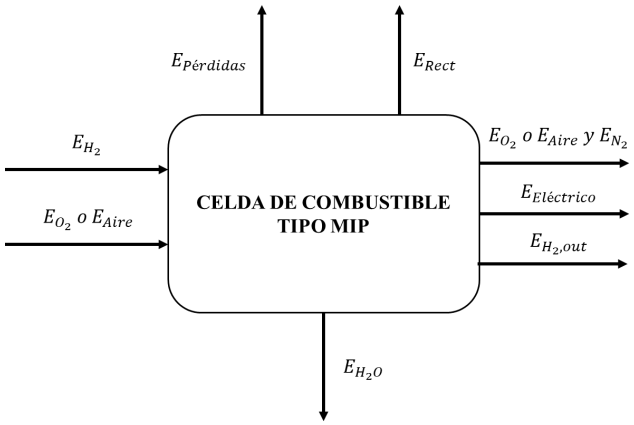

Ilustración 2. Balance energético

Donde $\dot{E}_{entrada}$ y $\dot{E}_{salida}$ son las entradas y salidas de la celda de combustible y $\dot{E}_{neto}$ es el total de energía producto de los procesos físicos y químicos dentro de la celda. De este modo, reorganizando:

$$\dot{E}_{neto} = \dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida}\ [W] \tag{7}$$

De la ilustración 2, se muestra que el total de energía entrante es

$$\dot{E}_{Entrada} = \dot{E}_{H_2,in} + \dot{E}_{aire,in} \tag{8}$$

Donde $\dot{E}_{H_2,in}$ y $\dot{E}_{aire,in}$ representan los flujos de hidrógeno y aire que entran a la celda. Cabe aclarar que para el primer caso de estudio se considera la energía entrante del oxígeno representada por $\dot{E}_{O2,in}$. Así mismo, para la energía saliente, se utiliza la ecuación 9:

$$\dot{E}_{salida} = \dot{E}_{productos} + \dot{E}_{pérdidas} + \dot{E}_{rect} + \dot{E}_{Eléctrico}\ [W] \tag{9}$$

Donde $\dot{E}_{productos}$ depende de los casos de estudio presentados anteriormente, los cuales pueden verse representados por $\dot{E}_{H_2,out}$, $\dot{E}_{aire,out}$ y $\dot{E}_{N_2,out}$ como las salidas de los flujos de hidrógeno, exceso de aire y nitrógeno, $\dot{E}_{H_2O}$ es la salida de agua. Asimismo, $\dot{E}_{rect}$ es la energía debido a la reacción electroquímica catódica y anódica, $E_{pérdidas}$ son las pérdidas energéticas debido al proceso y $\dot{E}_{Eléctrico}$ es la energía eléctrica generada por el proceso.

$$\dot{E}_{pérdidas} = \dot{E}_{nconv} + \dot{E}_{fconv} + \dot{E}_{rad}\ [W] \tag{10}$$

Donde $\dot{E}_{nconv}$ son las pérdidas por convección libre o natural, $\dot{E}_{fconv}$ las pérdidas por convección forzada y $\dot{E}_{rad}$ las pérdidas por radiación.
Por otra parte, para calcular la energía entregada por la celda en el proceso:

$$\dot{E}_{Eléctrico} = V_{celda}\ x\ I\ [W] \tag{11}$$

Donde, V_{celda} es el voltaje de la celda de la celda e I es la corriente. Los valores implementados.
De este modo, se puede reescribir la ecuación (10) de la siguiente manera:

$$\dot{E}_{neto} = \dot{E}_{H_2,in} + \dot{E}_{aire,in} - \dot{E}_{productos} - \dot{E}_{pérdidas} - \dot{E}_{rect} - \dot{E}_{Eléctrico} \quad (12)$$

Reescribiendo en términos de entalpías:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{neto} = H_{H_2,in} + H_{aire,in} - H_{productos} - h_{nc}A_{FC}(T_{FC} - T_0) \\ - m_{aire}C_{p,aire}\left(T_{aire,out} - T_{aire,in}\right) - \varepsilon\sigma A_{FC}(T_{FC}^4 - T_0^4) - H_{rect} \\ - V_{cell}\, x\, I\, t\end{aligned} \quad (13)$$

Para el cálculo de H_{rect} se plantea la siguiente ecuación:

$$H_{rect} = H_{rect}^{\circ} + C_p(T_0 - 298)[W] \quad (14)$$

De esta forma, la eficiencia energética del sistema se puede representar por:

$$\eta_{energética} = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{E}_{neto}} \quad (15)$$

Donde $\dot{W}_{neto}$ es el producto del voltaje por la corriente y $\dot{E}_{neto}$ es la energía neta de la celda de combustible.

3. Resultados y análisis

A partir de 1 988 mediciones experimentales, se identificaron dos zonas en la curva de polarización: pérdidas por activación (0–2 A) y pérdidas óhmicas (2–10 A), a diferencia de la curva del fabricante que presenta tres zonas bien definidas, incluyendo pérdidas por concentración. Las pérdidas por activación, asociadas a la energía requerida para iniciar la reacción, se superan a mayores corrientes en el experimento debido a la falta de control sobre temperatura y humedad. Las pérdidas óhmicas, evidenciadas por una caída lineal de tensión con el aumento de corriente, son mayores en la curva experimental, posiblemente por baja hidratación del electrolito o degradación de componentes. La ausencia de la zona de pérdidas por concentración en el experimento sugiere una purga más eficiente del agua, evitando su acumulación y favoreciendo la continuidad de la reacción.

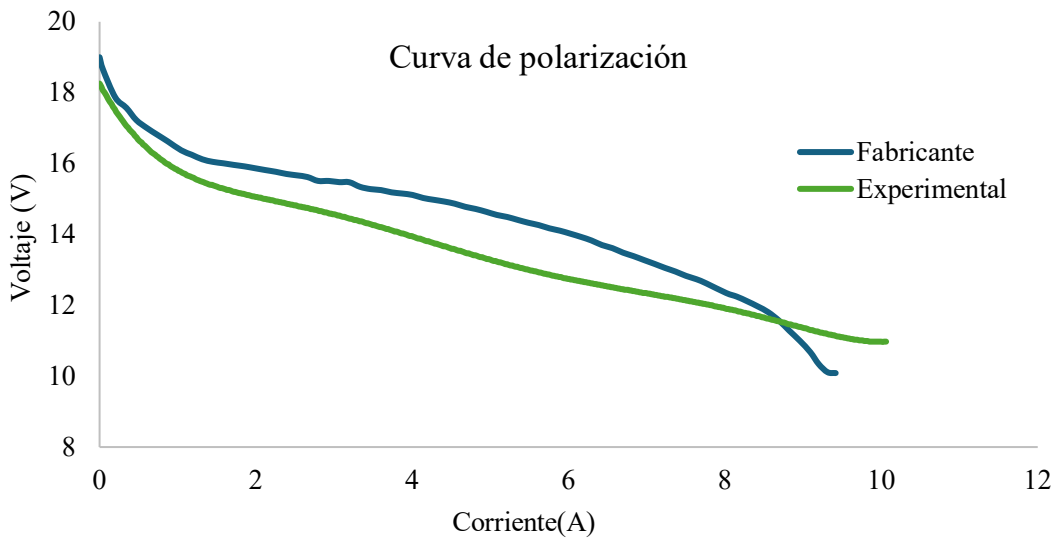

Ilustración 3. Comparativa curva de polarización experimental y fabricante.

A partir de las mediciones experimentales se construyó la curva de potencia en función de la corriente, evidenciando un comportamiento inicial similar al del fabricante hasta los 2 A, lo que indica pérdidas por activación comparables. A partir de este punto, la curva experimental decrece más con rapidez, posiblemente por variaciones en temperatura, humedad y mayores pérdidas óhmicas. A 8,6 A, el fabricante reporta una potencia máxima de 100 W, mientras que el experimento alcanza 95,89 W, con una diferencia del 4 %. Tras este punto, la curva del fabricante desciende por pérdidas por concentración, mientras que la experimental continúa en aumento, lo que sugiere un sistema más eficiente en la gestión del agua acumulada.

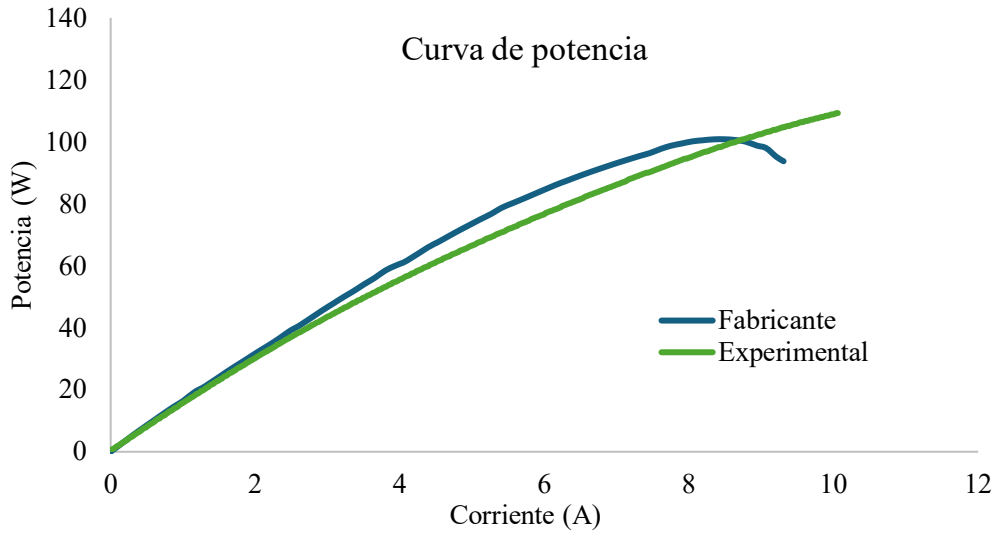

Ilustración 4. Comparativa curva de potencia experimental y del fabricante

El modelo teórico permitió evaluar el comportamiento del sistema en los cinco escenarios definidos. Se comparó la eficiencia energética reportada por el fabricante con los resultados de un análisis estequiométrico en cinco configuraciones operativas de la celda: oxígeno puro, aire, exceso de aire, salida de hidrógeno y una combinación de exceso de aire con salida de hidrógeno. La evaluación se realizó a una corriente de 8,6 A, correspondiente al punto de máxima eficiencia según el fabricante. El caso con oxígeno puro, aunque idealizado, presentó la menor eficiencia (28,13 %) debido a una sobreestimación de la potencia generada. Los casos con aire, con o sin exceso, mostraron eficiencias similares (29,86 % y 29,89 %) y una potencia levemente inferior. Al considerar la pérdida del 5 % de hidrógeno (Casos 4 y 5), la eficiencia aumentó a 31,95 % y 31,98 %, pero con una reducción de potencia cercana al 12 % respecto al caso ideal. Esto evidencia que la participación del hidrógeno tiene un mayor impacto en la eficiencia que el exceso de aire. Todas las eficiencias calculadas se encuentran por debajo del 40 % reportado por el fabricante, debido principalmente a la falta de control de temperatura y humedad en el experimento, así como a la degradación de la celda por falta de uso y ausencia de humidificación previa.

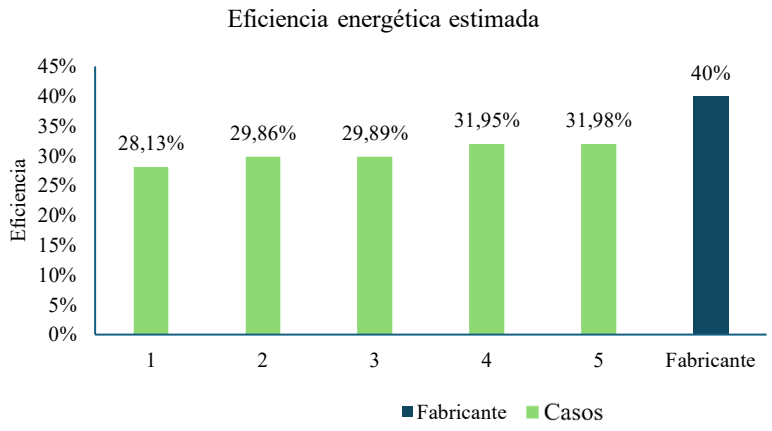

Ilustración 5. Eficiencia energética estimada para los cincos casos de estudio

Las eficiencias calculadas anteriormente se encuentran por debajo del 40% reportado por el fabricante. Esta diferencia se debe a dos factores:

1. La eficiencia del fabricante se calcula en condiciones de laboratorio con temperatura y humedad controladas, condiciones que no se pudieron mantener durante el experimento.
2. La degradación natural de la celda por falta de uso aumenta la resistencia interna y dificulta la correcta generación de la reacción (Araya et al., 2022). Según el fabricante (Horizon Fuel Cell Technologies, 2013), después de 4 semanas sin utilizarla se debe llevar a cabo un procedimiento de humidificación para mantener la eficiencia de la celda que sugiere el fabricante. Este proceso no se llevó a cabo y este podría ser uno de los factores que condicionan los resultados de la eficiencia obtenida.

4. Conclusiones

El estudio realizado permitió determinar la eficiencia energética de una celda de combustible tipo PEM mediante un enfoque combinado, integrando caracterización experimental y modelado teórico. La construcción del banco experimental y la obtención de las curvas características permitieron identificar el punto de operación óptimo de la celda y evidenciar las diferencias entre el comportamiento teórico y el observado en condiciones reales. Las principales causas de estas discrepancias están relacionadas con la temperatura ambiente, la presión, el envejecimiento de los materiales, y la calidad del hidrógeno utilizado (Horizon Fuel Cell Technologies, 2013).

El modelo energético implementado permitió cuantificar las pérdidas térmicas por convección natural, forzada y radiación, y estimar la eficiencia bajo diferentes escenarios de operación. Los resultados mostraron que la eficiencia del sistema disminuye al incorporar pérdidas de hidrógeno o al operar con exceso de aire. En todos los casos, las pérdidas térmicas representaron una fracción considerable de la energía química no convertida en electricidad, lo que resalta la importancia de una adecuada gestión térmica para mejorar el rendimiento global del sistema.

Se concluye que para evaluar e implementar tecnologías basadas en hidrógeno en el contexto colombiano, es indispensable considerar las condiciones locales de operación, desarrollar capacidades técnicas en modelado y caracterización, y establecer metodologías de análisis energético ajustadas a la realidad operativa. El modelo propuesto constituye una herramienta útil para predecir la eficiencia de celdas de combustible PEM en diversos escenarios, y puede ser aplicado en estudios de dimensionamiento, evaluación de desempeño y análisis técnico de soluciones energéticas limpias.

5. Referencias bibliográficas

- Al Naimat, A., & Liang, D. (2023). Substantial gains of renewable energy adoption and implementation in Maan, Jordan: A critical review. *Results in Engineering*, *19*(June), 26. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101367
- Anser, M. K., Ali, S., Umair, M., Javid, R., & Tayab, M. (2025). Optimizing hydrogen integration in vehicle fuel systems for sustainable development: A step towards economic decarbonization. *International Journal of Hydrogen Energy*, *98*, 321–333. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.12.009
- Araya, S. S., Li, N., & Liso, V. (2022). Degradation and failure modes in proton exchange membrane fuel cells. *PEM Fuel Cells: Fundamentals, Advanced Technologies, and Practical Application*, 199–222. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823708-3.00015-8
- Gimba, I. D., Abdulkareem, A. S., Jimoh, A., & Afolabi, A. S. (2016). Theoretical Energy and Exergy Analyses of Proton Exchange Membrane Fuel Cell by Computer Simulation. *Journal of Applied Chemistry*, *2016*, 1–15. https://doi.org/10.1155/2016/2684919
- Gobierno de Colombia, & (BID), B. I. de D. (2021). Hoja de ruta del Hidrógeno en Colombia. *Ministerio de Minas y energía*, *1*(1), 54.
- Hoicka, C. E., Lowitzsch, J., Brisbois, M. C., Kumar, A., & Ramirez Camargo, L. (2021). Implementing a just renewable energy transition: Policy advice for transposing the new European rules for renewable energy communities. *Energy Policy*, *156*(November 2020), 10. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112435

- Horizon Fuel Cell Technologies. (2013). *H-100 Fuel Cell Stack User Manual*. www.horizonfuelcell.com/warranty.htm
- IEA. (2021). Hydrogen in Latin America. *Hydrogen in Latin America*. https://doi.org/10.1787/68467068-en
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Global warming of 1.5°C. En *Special Report on Global Warming of 1.5°C*.
- Mantilla, S., & Santos, D. M. F. (2022). Green and Blue Hydrogen Production: An Overview in Colombia. *Energies 2022, Vol. 15, Page 8862*, *15*(23), 8862. https://doi.org/10.3390/EN15238862
- Wang, S., Peng, Z., Wang, P., Chen, A., & Zhuge, C. (2023). A data-driven multi-objective optimization framework for determining the suitability of hydrogen fuel cell vehicles in freight transport. *Applied Energy*, *347*(June), 17. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121452
- Wu, Q., Dong, Z., Zhang, X., Zhang, C., Iqbal, A., & Chen, J. (2025). Towards More Efficient PEM Fuel Cells Through Advanced Thermal Management: From Mechanisms to Applications. *Sustainability 2025, Vol. 17, Page 943*, *17*(3), 943. https://doi.org/10.3390/SU17030943

Sobre los autores

- **Daniela García Céspedes:** Ingeniera Mecánica. Estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira. d.garcia6@utp.edu.co
- **María Camila Benítez Álvarez:** Ingeniera Mecánica. Estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira. mariaca@utp.edu.co
- **Juan Esteban Tibaquirá Giraldo:** Ingeniero Mecánico. Máster en Ingeniería Mecánica. Doctor en Ingeniería Mecánica. Profesor titular. juantiba@utp.edu.co

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)