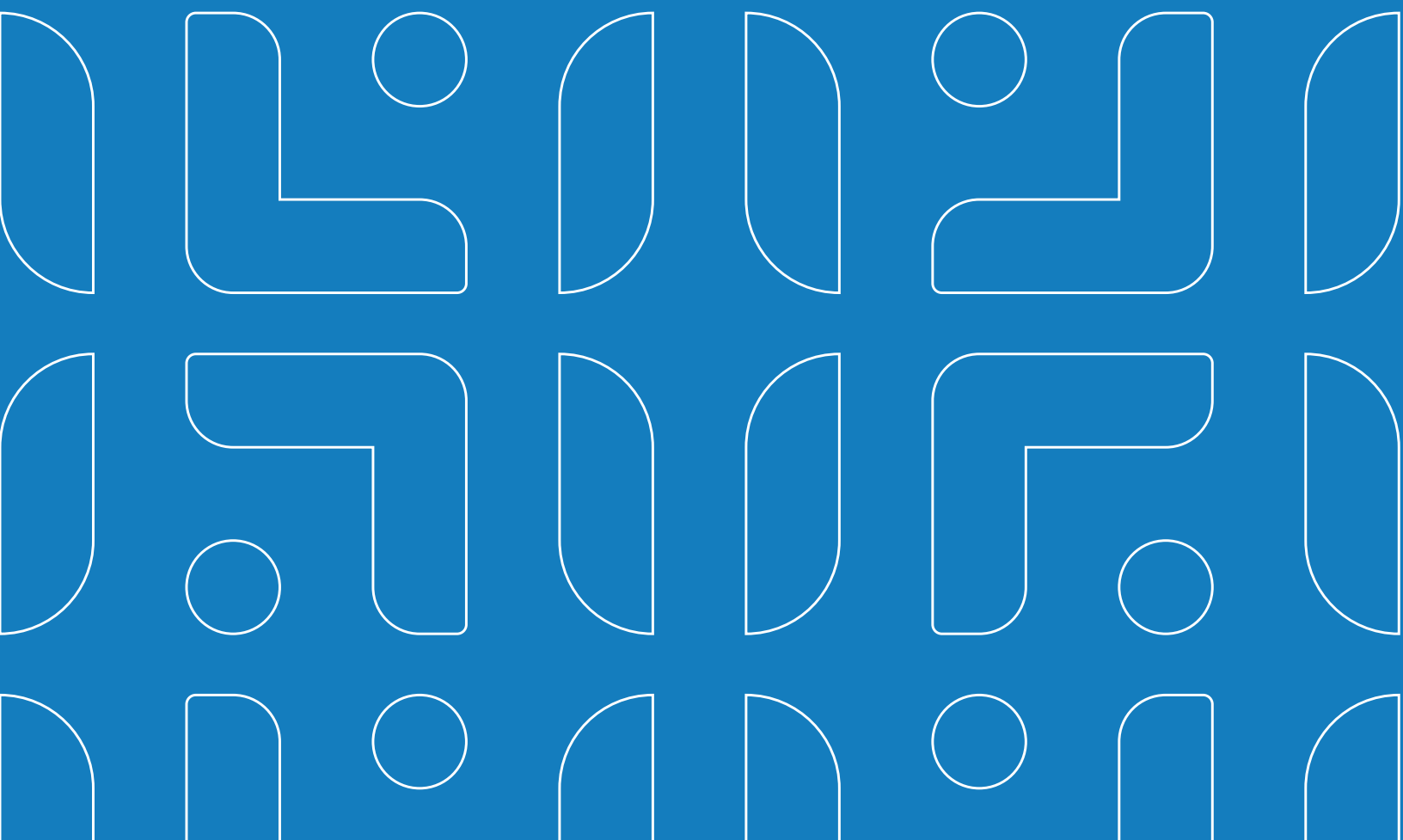


MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA



Avances en estudios de celdas de combustible tipo pem: una visión para el uso de hidrógeno verde

Advances in PEM Fuel Cell Research: A Vision for Green Hydrogen Use

DOI: <https://doi.org/10.51378/ilia.vi2.9820>

L. Blanco-Cocom¹ , S. Botello-Rionda¹ , L.C. Ordoñez²  y S. Ivvan Valdez³ 

¹Centro de Investigación en Matemáticas, A.C., Jalisco S/N, Col. Valenciana CP: 36023, Guanajuato, Gto, México, Apartado Postal 402, CP 36000, México.

²Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán. Parque Científico Tecnológico de Yucatán, Mérida, Yucatán, CP 97302, México.

³SECIHTI-Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, CENTROGEO A.C. Parque Tecnológico San Fandila, C.P. 76703, Querétaro, México.

Fecha de recepción: 15 de junio de 2025 Fecha de aprobación: 12 de agosto de 2025

Resumen

En la última década ha existido gran interés por parte de la comunidad científica en el estudio y análisis de tecnologías de generación de energía limpia. Una de las tecnologías con mayor potencial para la descarbonización son las celdas de combustible que producen energía sin emisiones contaminantes. En este trabajo se describe un panorama general sobre las celdas de combustible y se presenta parte del trabajo realizado por el grupo de investigación de celdas de combustible CIMAT-CICY-CentroGEO en México para analizar el rendimiento de una celda de combustible tipo PEM (PEMFC) con proyección a ser utilizada con hidrógeno verde como combustible. Los resultados numéricos de las simulaciones muestran que los modelos matemáticos reproducen adecuadamente las curvas de comportamiento de la celda, lo que permite analizar su funcionamiento bajo diferentes condiciones, y estimar parámetros que no son directamente medibles o que su medición es costosa, así como optimizar el funcionamiento a través de algoritmos que encuentran indicadores para mejorar el desempeño en experimentación simulada.

Palabras clave – celda de combustible tipo PEM, hidrógeno verde, curva de polarización, simulación numérica.

Abstract

Over the last decade, the scientific community has shown great interest in studying and analyzing

clean energy generation, conversion, and storage technologies. Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) are one of the technologies with the greatest potential for decarbonization. They produce electrical energy with high efficiency and without polluting emissions. This paper provides an overview of PEMFCs and presents the work of the CIMAT-CICY-CentroGEO fuel cell research group in Mexico regarding the numerical simulation and optimization of PEMFC performance. The numerical results demonstrate that mathematical and computational models accurately reproduce these fuel cells' performance curves and enable analysis of their operation under different conditions, estimation of unmeasurable or costly-to-measure parameters, and optimization of their performance through algorithms that identify parameters to enhance performance in simulated experiments.

Keywords – PEM fuel cell, green hydrogen, polarization curve, numerical simulation.

I. INTRODUCCIÓN

La energía obtenida mediante combustibles fósiles tiene efectos adversos en el medio ambiente y están relacionados con el cambio climático y diversas enfermedades [1]. Por lo que el desarrollo de fuentes alternativas de energía es uno de los principales temas de investigación a nivel global, ya que las fuentes de extracción de petróleo son cada vez más difíciles de acceder, bien sea por la profundidad de los pozos o la creciente ola de violencia por la disputa de territo-



rios ricos en el crudo. Del mismo modo, el incremento en la demanda de combustibles fósiles aumentan la contaminación ambiental, provocando el efecto invernadero y cambio en las temperaturas superficiales, lo que conlleva a un inminente cambio climático que afecta al planeta, y que se debe contrarrestar con medidas para controlar la contaminación y emisiones de efecto invernadero [2, 3, 4]. Por lo anterior, el estudio de fuentes alternativas de energía tiene su motivación en cuatro problemáticas principales: disminución de las reservas limitadas de petróleo, preocupación por el cambio climático, incremento en los precios de combustibles fósiles, el deseo por la independencia y seguridad energética. En México, la generación de electricidad se realiza principalmente por medio de plantas de ciclo combinado que utilizan gas natural, el transporte utiliza combustibles fósiles, así como distintos procesos industriales que emplean calor generado a partir de estos combustibles no renovables. Desafortunadamente, en su mayoría se importa el gas natural y no se cuenta con una cantidad importante de otras fuentes de energía para la generación de electricidad e impulsar el transporte eléctrico o híbrido que satisfaga adecuadamente la demanda. Como alternativa, se han propuesto el uso de fuentes renovables de energía e hidrógeno y su aplicación en la electromovilidad y la eficiencia energética en distintos sectores (transporte, electricidad, procesos industriales, etc.) [4]. Entre las fuentes alternativas de energía limpia existen diversos sistemas tecnológicos que permiten la conversión y el almacenamiento de un tipo de energía a otro, lo que permite el desarrollo de aplicaciones sustentables y eficientes energéticamente. Dentro de ellas se encuentran las celdas de combustible, los cuales son dispositivos electroquímicos capaces producir electricidad, agua, calor como principales productos, lo que los convierte en sistemas de interés para contribuir a la reducción del

efecto invernadero al evitar o disminuir emisiones de contaminación [5, 6, 7].

En este artículo se describen las celdas de combustible de intercambio protónico (PEMFC, por sus siglas en inglés *Proton-Exchange Membrane Fuel Cell*) como fuente alternativa de energía y se presentan algunos avances en los estudios por el grupo de investigación CIMAT-CICY-CentroGEO en este tema.

A. Celda de combustible

Las celdas de combustible son tecnologías de generación limpia de energía eléctrica, son dispositivos electroquímicos capaces de extraer la energía química de un combustible (hidrógeno, metanol, etanol, aguas residuales y otros) y convertirla eficientemente en electricidad. Son una familia de tecnologías que usan diferentes electrolitos y dependiendo de sus condiciones de operación y uso reciben su nombre, así, existen celdas de combustible de alta temperatura, las cuales operan a temperaturas mayores a 200 °C y de baja temperatura, las que operan a menos de 100 °C [6]. Las celdas de combustible tienen distintas aplicaciones: transporte (vehículos terrestres), aplicaciones móviles (sustitución de baterías de videocámaras, computadoras portátiles, telefonía celular y otros equipos electrónicos.), generación de energía estacionaria mediante sistemas combinados de calor y potencia, (abastecimiento de electricidad y calor a un edificio o casa-habitación) y vehículos espaciales. Para estas aplicaciones existen diferentes tipos de celdas que se pueden elegir dependiendo de la potencia requerida. Una desemejanza que deriva de la temperatura de operación es el empleo de distintos electrolitos que a temperaturas elevadas deben ser no acuosos [5, 6]. La clasificación de alta y baja temperatura es quizá la más adecuada, debido a las aplicaciones que unas y otras celdas tienen.

Tabla 1. Información sobre los distintos tipos de celda de combustible: el ión con el que se activa la celda, temperatura de operación, eficiencia y aplicaciones generales [6]

Tipo de celda	Ión	Temperatura	Eficiencia	Aplicaciones
Alcalina (AFC)	OH ⁻	50-200 °C	70	Usada en vehículos espaciales y lugares libres de CO ₂
Membrana de intercambio protónico (PEMFC)	H ⁺	25-80 °C	≈ 40	Transporte, aplicaciones móviles y residenciales de baja potencia
Alcohol directo (DAFC)	H ⁺	50-80 °C	≈ 40	Transporte, aplicaciones móviles y residenciales de baja potencia
Ácido fosfórico (PAFC)	H ⁺	≈ 220 °C	> 40	Uso industrial, hospitales, comercios y hoteles, 200 kW de potencia

Carbonato fundido (MCFC)	CO_2^{3-}	$\approx 650\text{ }^\circ\text{C}$	> 60	Uso industrial, desarrollos hoteleros y sistemas de generación de energía de una red eléctrica: media y alta potencia (MW)
Óxido sólido (SOFC)	O_2^-	$500\text{-}1000\text{ }^\circ\text{C}$	> 70	Uso industrial y sistemas de generación de energía de una red eléctrica. Adecuada para todos los niveles de potencia (MW): baja, media y alta

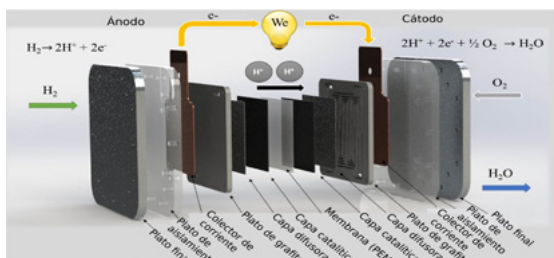


Fig. 1. Esquema de una celda de combustible tipo PEM de hidrógeno [5].

Las celdas de combustible basadas en membranas poliméricas de intercambio protónico (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC), son una alternativa para la generación de electricidad debido a que convierten con una alta eficiencia la energía química del hidrógeno en trabajo eléctrico por medio de reacciones electrocatalíticas. Además, estas celdas tienen bajas emisiones contaminantes ya que sólo producen electricidad, agua y calor [5, 6].

Una celda de combustible tipo PEM está conformada por 3 partes principales: la cámara anódica (ánodo), la cámara catódica (cátodo), y la membrana de intercambio protónica (PEM). En la figura 1 se presentan las distintas capas que conforman cada una de las 3 partes de la celda.

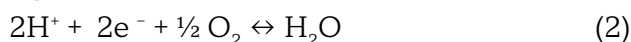
En la PEMFC de hidrógeno, en el ánodo, la molécula elemental de hidrógeno gas (H_2) circula por los canales de flujo, cuando éste se encuentra cerca de los sitios activos del catalizador y sitios de transferencia sobre la membrana, las moléculas se oxidan en protones y electrones, los primeros atraviesan la membrana para alcanzar el cátodo, y los electrones; por su parte, son recolectados en un plato conductor y son direccionados a un circuito externo para realizar un trabajo eléctrico. La membrana debe estar humedificada (con un contenido elevado de agua) para que pueda ocurrir una adecuada conducción protónica, en caso contrario, las pérdidas óhmicas aumentan, es decir una mala conducción de carga iónica. Sin embargo, es necesario eliminar el exceso de agua para que no disminuya la transferencia de masa, es decir, extraer el agua que se forma en el cátodo por la reacción de reducción de oxígeno [5].

La reacción electroquímica que modela el proceso anódico es [5, 7],



En el cátodo circula aire con oxígeno diatómico, cuando éste alcanza los sitios activos en el catalizador, se reducen con los protones y los electrones para formar agua. El mecanismo es muy complejo con varias etapas y la formación de distintas especies intermedias. De esta manera, la reacción catódica es más lenta.

La reacción catódica puede ser representada por la siguiente ecuación,



La reacción completa de la celda de combustible es, $\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$ (3)

Los productos de este proceso son electricidad, agua líquida y calor, considerando así a la PEMFC de hidrógeno como una fuente limpia de energía.

B. Curva de polarización

Una manera de analizar el funcionamiento y rendimiento de una celda de combustible es mediante la *curva de polarización* (ver figura 2) la cual muestra la caída de potencial (o tensión) conforme se le demanda a la celda una mayor carga (expresada en términos de la corriente). La curva representa en el eje de las abscisas la densidad de corriente (A/cm^2) o la intensidad de corriente (A) mientras que en el eje de ordenadas se representa la tensión (V). La curva de polarización se divide en tres regiones en función del fenómeno predominante que producen la pérdida del rendimiento de la celda o pila [5, 7].

- Región 1 (R1): *pérdidas por activación*, son debidas a las pérdidas cinéticas o de activación de la reacción electroquímica de las dos reacciones de electrodo, la anódica y catódica. Su forma se caracteriza en la curva por una caída exponencial de la tensión a bajas densidades de corriente. Es una caída por la mala actividad electroquímica que hay en cada uno de los electrodos.

Es una desviación del comportamiento ideal de la celda.

- Región 2 (R2): *pérdidas óhmicas*, debidas a las resistencias a la conducción electrónica en el circuito externo y a las resistencias debidas a la mala conducción iónica en la membrana electrolítica. Se observa en la zona de densidades de corriente moderada y su tendencia es prácticamente lineal.
- Región 3 (R3): *pérdidas por concentración*, se debe a que el proceso de difusión de especies reactivas es muy lento y el transporte de masa de la fase fluida a los sitios catalíticos no es suficiente para satisfacer la carga demandada, es decir, el proceso más lento es la difusión, y por lo tanto, controla el desempeño de la celda. Se está alcanzando la corriente límite.



Fig. 2. Curva de polarización de una celda de combustible de hidrógeno

C. Hidrógeno verde como combustible de una pemfc

En este marco, es necesario introducir un vector energético para reducir o evitar las intermitencias típicas de las fuentes renovables de energía y reducir la huella de carbono de distintos productos y servicios. El hidrógeno es un portador de energía muy interesante y sustentable, que también se puede emplear como materia prima para distintos productos, inclusive para la refinación misma del petróleo.

Esta molécula elemental (H_2) puede ser producida de manera sustentable a través de sistemas electroquímicos de electrólisis y fuentes renovables de energía (solar y eólica), al hidrógeno que es producido con una baja cantidad de emisiones se le ha nombrado *hidrógeno verde*. De manera inversa, el hidrógeno

puede ser transformado en celdas de combustible generando electricidad útil y como subproducto agua sin cualquier emisión de CO_2 . Este gas tiene muchas aplicaciones industriales como son: la generación de electricidad, fertilizantes, industria alimentaria, procesos de refinación, celdas de combustible, etc. [9]. Tiene una alta densidad energética, de 140 MJ/Kg, mayor que cualquier combustible convencional (alrededor de 50 MJ/Kg) [10]. A pesar de que no existe un plan a nivel Federal para su implementación en el país, en algunos estados como Tamaulipas ya se cuenta con un mapa de ruta para su implementación. En el programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional mexicano (PRODESEN 2020-2034) se menciona que a partir del 2024, la alimentación de hidrógeno verde en mezclas con gas natural en las plantas de generación de electricidad por ciclo combinado. La comisión federal de electricidad (CFE) ha planteado un proyecto piloto del uso del hidrógeno verde [3]. De esta manera, para la implementación de la economía del hidrógeno en México es necesario el desarrollo de sistemas electroquímicos como son celdas de combustible y de electrólisis.

D. Resultados y avances en simulación de pemfcs

La simulación numérica y optimización ofrecen una manera formal de establecer una solución lo más aproximada a un problema real de manera racional y óptima [5,6]. En México, algunos Centros de Investigación de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) tienen estudios sobre celdas de combustible. El grupo de investigación CIMAT-CICY-CentroGEO, conformados por el Centro de Investigación en Matemáticas, A.C. (CIMAT), el Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (CICY), y el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C. (CentroGEO), cuenta con un avance sustancial en el estudio, análisis y desarrollo del diseño y optimización de celdas de combustible de hidrógeno y etanol. Las Unidades de Energía Renovable y Materiales del CICY han desarrollado distintos materiales y prototipos de celdas de combustible y de electrólisis PEM-WE. Además, se han conjuntado esfuerzos con el CIMAT y CentroGeo para el modelamiento numérico y matemático de celdas de combustible con la finalidad de describir los fenómenos que ocurren en dichas celdas y optimizar diferentes parámetros de operación y escalamiento.

Se cuenta con el material y conocimiento necesario debido a la revisión exhaustiva de la literatura de celdas de combustible, se ha desarrollado software basado en diferentes modelos matemáticos, obtenidos de la literatura y propuestas del grupo de investigación, se han utilizado técnicas metaheurísticas como algoritmos genéticos, y algoritmos de estimación de distribución para la optimización y estimación de parámetros [5, 7, 8].

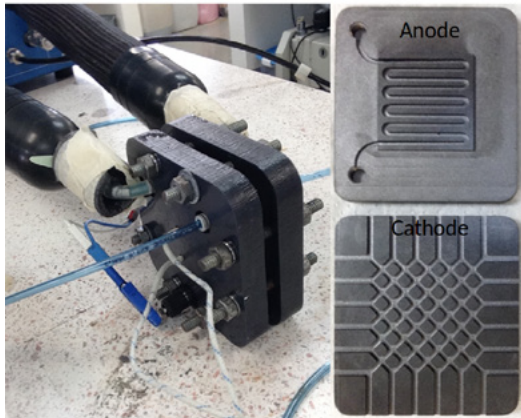


Fig. 3. Prototipo de una celda de combustible tipo PEM (Unidad de Energía Renovable del CICY)

a. Simulaciones numéricas

El grupo de investigación CIMAT-CICY-CentroGEO cuenta con prototipos del PEMFC con los cuales se han realizado diversos experimentos (ver figura 3), ha desarrollado una metodología basada en el análisis detallado de modelos matemáticos 1D y 3D para la codificación de software científico de autoría propia y simular las presiones, la dinámica de fluidos de las especies involucradas, la temperatura y la densidad de corriente en una PEMFC.

Para realizar las simulaciones, se crea una configuración geométrica basada en medidas reales de una PEMFC experimental del laboratorio de la Unidad de Energía Renovable del CICY, por ejemplo, en la figura 4 se presenta la geometría del canal del ánodo de una celda por donde circula el H₂ como combustible, luego el software discretiza la geometría para aplicar distintos métodos numéricos y resolver las ecuaciones de la dinámica interna en la celda (elemento finito, dinámica computacional de fluidos, etc.). Entre los softwares utilizados se encuentran implementaciones basadas en C, C++, Octave, OpenFOAM, entre otros, detalles de los trabajos previos en [5, 7, 11].

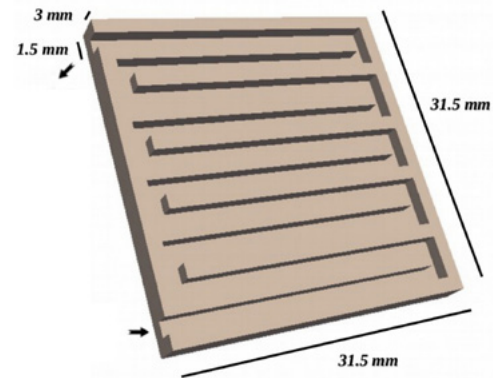


Fig. 4. Aproximación de la geometría de serpentin para el ánodo de una PEMFC

En la literatura científica, existen diversas maneras de realizar un modelado matemático para una simulación, y que además, ésta coincida con los datos experimentales u observados en el laboratorio, es decir, con los valores de la curva de polarización (figura 2). En general, una vez elegido el modelo matemático y los métodos numéricos para su resolución correspondiente, al finalizar la ejecución del software, se obtiene una simulación que describe de manera precisa lo que ocurre en la celda cuando ésta se encuentra en funcionamiento, sin la modelación y simulación, esto sería imposible debido a que los elementos de la celda están interactuando entre sí en un instante dado y existen parámetros que son difíciles de medir en laboratorio, como lo son las difusividades de las especies o las porosidades [5, 7, 8].

Entre las investigaciones más destacadas realizadas por el grupo de investigación se encuentra el análisis de una celda de combustible de hidrógeno a través de modelos algebraicos (*empíricos o semi-empíricos*): modelos basados en expresiones algebraicas simplificadas de las diversas reacciones electroquímicas que ocurren dentro de la celda de combustible y describen la curva de polarización [8, 12]; *modelos macro-homogéneos*: modelos basados en la constitución física de la celda en donde las simplificaciones se fundamentan en la descripción por medio de ecuaciones diferenciales ordinarias, generalmente, describen el comportamiento del consumo de oxígeno, generación de sobrepotenciales y densidad de corriente [5, 7, 8]; *modelos complejos*: modelos sustentados en ecuaciones diferenciales parciales que describen de manera más compleja la dinámica física del sistema como los son los flujos de fluidos, los campos de velocidad, consumo/generación de especies, presiones,

temperatura, etc. Entre estos modelos se encuentran los modelos aglomerados, modelos de reacción-convección-difusión (RCD), modelos de dinámica computacional de fluidos (CFD), entre otros [8, 11].

Como ejemplo, consideremos el modelo macro-homogéneo reportado en [7], en el cual se describe la dinámica de las reacciones electroquímicas en la capa catalítica del cátodo de una PEMFC,

$$\frac{dO_2}{dz} = \frac{i - I_\delta}{4FD_{O_2}}, \quad (4)$$

$$\frac{d\eta}{dz} = \frac{i}{k_{eff}} + \frac{i - I_\delta}{\sigma_{eff}}, \quad (5)$$

$$\frac{di}{dz} = ai_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_c F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) \right] \quad (6)$$

$$V = E_0 - \eta(l) - R_{ohm} I_\delta \quad (7)$$

Donde O_2 (mol/cm^3) es el concentración de oxígeno, η (Volts) es el sobrepotencial de la celda, i (A/cm^2) es la densidad de corriente en la capa catalítica del cátodo, V el voltaje de la celda en función de I_δ , l es el grosor de la capa catalítica (μm), y E_0 , R_{ohm} , F , D_{O_2} , α_a , α_c , R , T , ai_0 son constantes, detalles en [7].

Para este modelo, el software generado, resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas no lineales (4) - (6) con técnicas de Runge-Kutta y Lobatto implícitas, y para estabilizar numéricamente las soluciones se aplican técnicas de elemento finito con mallas Shishkin adaptativas en función del comportamiento de las soluciones de la densidad de corriente en (6). Luego de obtener las soluciones del sistema, se procede a calcular el voltaje de la celda con la expresión en (7).

Al tener una solución para la curva de polarización se comparan con datos experimentales, si la solución se encuentra muy "lejos" de los datos observados se procede a realizar una estimación de parámetros mediante algún algoritmo de optimización. Un *proceso de optimización*, es un conjunto de pasos que proponen y refinan parámetros de diseño como dimensiones, materiales o temperaturas de operación con el fin de minimizar los costos o maximizar la producción de energía, para este ejemplo se procede a minimizar la diferencia de los datos del voltaje esperado con los voltajes simulados. Entre los algoritmos utilizados se encuentran los algoritmos evolutivos como algoritmos de estimación de distribución (AED), algoritmos genéticos (AG), algoritmo de enjambre de partículas (PSO), entre otros [5, 7, 8].

Se han seleccionado para modelos macro-homogéneos más complejos, parámetros de interés en

la composición de un catalizador basado en platino, como la carga de platino, carga de carbón, densidad de platino y porosidad, con los cuales se han realizados validaciones numéricas con datos reportados en la literatura, obteniendo resultados favorables de las estimaciones. En la literatura especializada se reporta que la carga y densidad de platino adecuadas en el catalizador son de $0.2 \pm 0.5 \text{ mg/cm}^2$, y 24 g/cm^3 , respectivamente, mientras que en las optimizaciones se han alcanzado valores óptimos alrededor de 0.20001 mg/cm^2 , y 23.999 g/cm^3 , respectivamente [7].

En la figura 5-a) se presenta la distribución de la temperatura para una simulación numérica de una PEMFC experimental, se observan los diferentes perfiles de calor que se generan en la celda al momento de ejecutarse experimentalmente [11]. También se puede obtener información sobre la distribución de la densidad de corriente (figura 5-b)) que se genera en la celda, la cual es indispensable conocer para describir el comportamiento de la curva de polarización esperada [11].

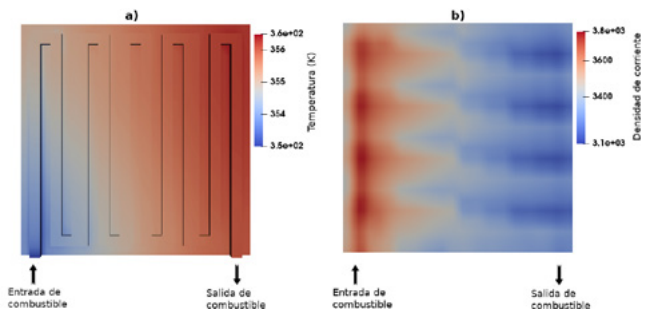


Fig. 5. Simulaciones de una celda de combustible tipo PEM [10]: a) Distribución de la temperatura en los canales de flujo del serpentín en el ánodo; b) Distribución de la densidad de corriente en la capa catalítica del cátodo

Entre la información que se puede obtener a través de una simulación numérica están los parámetros principales que definen el funcionamiento de la celda de combustible, como lo son la cantidad de combustible de alimentación en el ánodo, o la presión a la cual el oxígeno ingresa a la celda. Por otro lado, estos parámetros se pueden optimizar, es decir, se puede obtener valores adecuados que hacen que la celda tenga un funcionamiento y rendimiento energético óptimo, así mismo, se pueden variar las condiciones de operación como la temperatura y debe mantener el perfil esperado, por ejemplo, en la figura 6 se presentan las curvas de polarización de una celda de combustible tipo PEM alimentada con un alcohol (etanol, celda de combustible de etanol directo), en el cual, se realiza la estimación de algunos parámetros

seleccionados y se aplica un algoritmo de optimización para obtener la mejor aproximación a datos experimentales a 60 °C. Si los valores de la estimación son los adecuados, entonces debe describir la curva de polarización esperada bajo otra condición, así, al variar únicamente la temperatura a 25 °C en el simulador, la curva de polarización simulada se aproxima a los datos experimentales de 25 °C obtenidos en el laboratorio de la Unidad de Energía Renovable del CICY, detalles en [12].

En general, después de haber encontrado una celda, que en simulación por computadora tiene un desempeño óptimo, validamos los parámetros encontrados comparándolos con los reales, o los reportados en la literatura, o con diferentes metodologías o modelos de simulación, para verificar que el desempeño simulado sea congruente con diferentes variantes de cálculo.

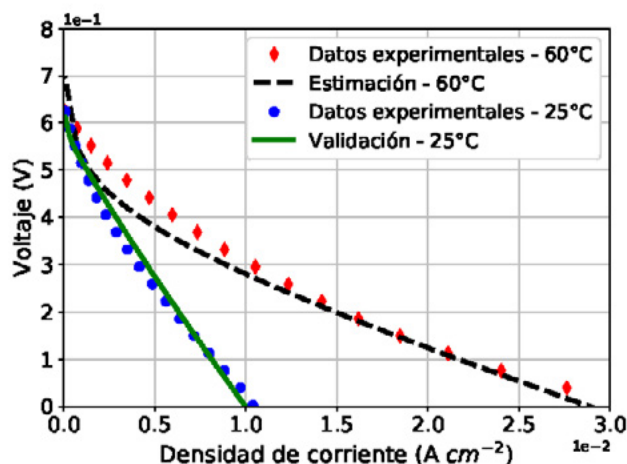


Fig. 6. Ajuste de la curva de polarización experimental a 60 °C y su validación con datos a 25 °C

El grupo de investigación ha realizado diversos estudios con diferentes modelos matemáticos que pueden complementarse entre sí para proporcionar información relevante sobre el funcionamiento de una celda tipo PEM alimentada con hidrógeno y alcohol (metanol y etanol), las principales aportaciones al estado del arte en simulación, estimación de parámetros y optimización pueden consultarse en [5, 7, 8, 11, 12]. Con la experiencia e información recolectada se proyecta realizar simulaciones comparativas con el uso de hidrógeno verde como combustible en una PEMFC y contribuir como sociedad a disminuir la emisión de contaminantes en el mundo.

II. CONCLUSIÓN

En este artículo se presenta un panorama general sobre el uso de celdas de combustible para distintas aplicaciones (domésticas, comerciales, industriales, etc.). Los modelos matemáticos y métodos numéricos pueden reducir significativamente los costos de probar diferentes diseños de celdas de combustible y permitir la estimación de cantidades de operación como temperaturas o electricidad producida. Cuando se combinan con un método de optimización permite generar diseños con menores costos o mayor capacidad de producción. El grupo ha desarrollado modelos y software que permiten lo anterior, y han tenido múltiples publicaciones, y registros de derechos de autor. El futuro de esta investigación es altamente promisorio ya que el hidrógeno se sitúa como una de las fuentes de energía verdes con mayor proyección futura. Lo anterior muestra como la multidisciplinariedad y la ciencia básica puede contribuir a reducir nuestro impacto ambiental y ofrecer alternativas para la reducción a la dependencia en combustibles fósiles, así como a fuentes de energía limpias que pueden ser utilizadas en zonas desconectadas de las redes de distribución de energía o en situaciones de desastre.

III. REFERENCIAS

- [1] D.J. Soeder, Fracking and the Environment: A scientific assessment of the environmental risks from hydraulic fracturing and fossil fuels - Fossil fuels and climate change, Springer, pp. 155-185, 2021.
- [2] J. Wang, H. Wang, Y. Fan, *Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization*. Engineering, vol. 4, pp. 352-360, 2018.
- [3] HINICIO. Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación. Tomo I: Contexto nacional e internacional del hidrógeno Verde, 2001.
- [4] C. M. Drapcho, P. N. Nhuan, T. H. Walker, *Biofuels Engineering Process Technology*. McGraw-Hill Companies, Inc. 2008.
- [5] L. Blanco-Cocom, S. Botello-Rionda, L.C. Ordoñez, S.I. Valdez, *Robust parameter estimation of a PEMFC via optimization based on probabilistic model building*, Mathematics and computers in simulations, vol. 185, pp. 218-237, 2021.

- [6] W.J. Pech-Rodríguez, *Desarrollo de una celda de etanol directo (DEFC)*, Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2011.
- [7] L. Blanco-Cocom, S. Botello-Rionda, L.C. Ordoñez, S.I. Valdez, *Design optimization and parameter estimation of a PEMFC using nature-inspired algorithms*, Soft Comput., vol. 27, pp. 3765-3784, 2022.
- [8] L. Blanco-Cocom, S. Botello-Rionda, L.C. Ordoñez, S.I. Valdez, *A Self-Validating Method via the Unification of Multiple Models for Consistent Parameter Identification in PEM Fuel Cells*, Energies, vol. 15, pp. 885, 2022.
- [9] A. Kazim, T.N. Veziroglu, *Utilization of solar hydrogen energy in the UAE to maintain its share in the world energy market for the 21st century*, Renewable Energy, vol. 24, pp. 259-274, 2001.
- [10] J. Chi, Y. Hongmei, *Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production*, Chin. J. Catal. vol. 39, pp. 390-394, 2018.
- [11] L. Blanco-Cocom, S. Botello-Rionda, L.C. Ordoñez, S.I. Valdez, *Numerical simulation of direct methanol fuel cells using computational fluid dynamics*, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 108, pp. 87-98, 2025.
- [12] L. Blanco-Cocom, S. Botello-Rionda, L.C. Ordoñez, S.I. Valdez, *Parameter estimation for empirical and semi-empirical models in a direct ethanol fuel cell*, Energy Reports, vol. 10, pp. 451-459, 2023.