Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Fecha de recepción: 01-04-2025
Fecha de aceptación: 15-07-2025

INGENIERÍA MECÁNICA
TECNOLOGÍA Y DESARROLLO
Vol. 8 No. 2 (2025) 024 - 031

Integración de Algoritmos Evolutivos y CFD para la Optimización del Desempeño en PEMFCs

Integration of Evolutionary Algorithms and CFD for Performance Optimization in PEMFCs

Sanchez-Rodriguez Evelin J., Cano-Almanza Francelia, Corona-Muñiz J. Adrian, Luviano-Ortiz J. Luis, Hernandez-Guerrero Abel *
Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Salamanca 36700, México
*abel@ugto.mx

Resumen

En las Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC, por sus siglas en inglés), la membrana influye en la eficiencia del transporte protónico y la gestión del agua, afectando directamente el rendimiento global de la celda. Este trabajo desarrolla una metodología computacional avanzada que combina algoritmos evolutivos (CMA-ES) con simulaciones CFD para optimizar el espesor de membrana en PEMFC. El enfoque de optimización logra un aumento del 23% en densidad de potencia, reduciendo la resistencia óhmica en 32% y mejorando la uniformidad de hidratación en 18% con respecto al caso base. La metodología acoplada CFD-Optimización establece un nuevo paradigma para el diseño de celdas de combustible basado en simulación, demostrando mejoras significativas para aplicaciones automotrices donde la densidad de potencia y gestión de agua son cruciales.

Abstract

In Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC), the membrane critically influences the proton transport efficiency and water management, directly impacting the overall cell performance. This study develops an advanced computational methodology combining evolutionary algorithms (CMA-ES) with CFD simulations to optimize membrane thickness in PEMFC. The optimization approach achieves a 23% increase in power density while reducing ohmic resistance by 32% and improving water content uniformity by 18% compared to the base case. The coupled CFD-Optimization methodology establishes a new paradigm for simulation-driven fuel cell design, demonstrating significant improvements for automotive applications where power density and water management are crucial.

Palabras clave:
PEMFC, Optimización, CFD, CMA-ES, Membrana de Intercambio Protónico.

Keywords:
PEMFC, Optimization, CFD, CMA-ES, Proton Exchange Membrane

Edición digital
ISSN 2448-5837

Introducción

La energía del hidrógeno ha sido reconocida como la forma definitiva de energía para el transporte debido a sus emisiones cero y su carácter no contaminante [1]. Actualmente, los vehículos de celdas de combustible son el escenario actual en el que el hidrógeno es altamente aplicable [2-5]. Las celdas de combustible han recibido una atención significativa debido a su naturaleza ecológica y diseño eficiente, junto a una alta densidad de potencia. Las Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC, por sus siglas en inglés) ofrecen ventajas como un arranque rápido, cero emisiones, alta eficiencia, bajo ruido y una amplia gama de fuentes de energía disponibles [6-8], lo que las convierte en una opción cada vez más utilizada en los campos del transporte y la generación de energía estacionaria [9]. Una Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC) convierte la energía química del hidrógeno en electricidad mediante reacciones electroquímicas. Como se muestra en la Figura 1, el hidrógeno se divide en protones y electrones en el ánodo; los protones atraviesan la membrana hacia el cátodo, mientras que los electrones circulan por un circuito externo, generando electricidad. En el cátodo, los protones se combinan con los electrones y el oxígeno para formar agua. La membrana es un componente clave, ya que permite el transporte selectivo de protones y debe mantenerse adecuadamente hidratada para asegurar una alta conductividad. Sin embargo, su espesor influye directamente en la resistencia óhmica y en la distribución del agua dentro de la celda. Este trabajo aborda el problema optimizando computacionalmente el espesor de la membrana mediante simulaciones CFD acopladas con el algoritmo evolutivo CMA-ES, lo que permite mejorar la hidratación, reducir pérdidas resistivas y aumentar significativamente la densidad de potencia de la celda. El desarrollo de las PEMFC enfrenta fuertes y complejos desafíos [10] y su rendimiento se ha vuelto un tema de interés de investigación. Diversos estudios han abordado la influencia de los parámetros operativos y estructurales en el desempeño global de las PEMFC [11, 12]. La membrana

tiene un fuerte impacto en el rendimiento global de la celda de combustible, la capacidad de transferencia de masa y la capacidad de gestión del agua [13]. El espesor del electrolito ha sido identificado como un factor que influye en el rendimiento global de la celda. *Nishimura et al*. [14] desarrollaron un modelo 3D con el fin de analizar estas distribuciones bajo distintas condiciones de espesor de membrana, temperatura inicial de la celda y humedad relativa. Ellos observaron que una membrana más delgada, en combinación con una alimentación suficientemente humidificada, favorece una mayor generación de potencia. *Mohanty et al*. [15] estudiaron cómo influye el espesor del electrolito. Sus resultados mostraron una mejora del 17% en el funcionamiento con una membrana más delgada. *Li et al*. [16] analizaron el funcionamiento al variar el espesor de la membrana y encontraron una menor resistencia óhmica. Una membrana delgada favorece la gestión hídrica, evidenciando una interacción significativa entre el espesor de la membrana y los procesos de hidratación internos de la celda.

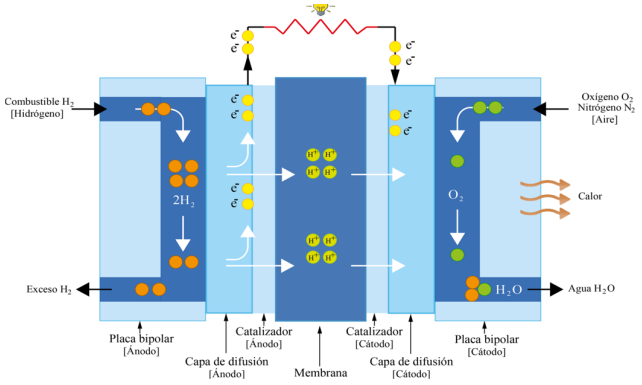

Figura 1 – Funcionamiento de PEMFC.

El uso de metodologías de optimización para el modelado de celdas de combustible es fundamental. Las técnicas de optimización permiten ajustar los parámetros operativos, brindando una mayor eficiencia energética. *Huang et al*. [17] utilizaron un algoritmo genético para optimizar los espesores de las capas catalíticas, logrando mejoras del 6.8% en el rendimiento general de la celda. *Xia et al*. [18] investigaron cómo el espesor y la porosidad de la GDL (Gas Diffusion Layer) afectan la distribución del flujo y la resistencia óhmica. Dichos autores concluyeron que una mayor porosidad mejora la difusión, mientras que un mayor espesor la reduce. En aplicaciones automotrices, las PEMFC requieren purgas periódicas para evitar la acumulación de gases inertes y mantener una eficiencia. A diferencia de estudios anteriores que sugerían el uso de una GDL delgada y muy porosa, *Kienitz* [19] estudió cómo el espesor de la membrana afecta la autonomía del vehículo. Aunque las membranas delgadas mejoran el rendimiento y reducen los costos, también aumentan el transporte de gases inertes. El modelo de *Kienitz* predice un espesor óptimo de membrana que maximiza la autonomía, el cual depende de las condiciones operativas. Por último, *Cheng et al*. [20] propusieron una estrategia de optimización multiobjetivo combinando la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM, *Response Surface Methodology*) con el algoritmo NSGA-II. Sus resultados demostraron mejoras en el rendimiento de la celda, destacando el potencial de esta metodología para el diseño eficiente de PEMFC.

Aunque numerosos estudios experimentales y simulaciones numéricas han contribuido significativamente al desarrollo y comprensión de las PEMFC, la literatura actual revela una brecha crítica en cuanto a la aplicación de enfoques de optimización sistemática. En particular, son escasos los trabajos que integren algoritmos evolutivos avanzados para la identificación de configuraciones de diseño verdaderamente óptimas, capaces de maximizar el rendimiento electroquímico y la eficiencia global del sistema bajo distintas condiciones operativas. Esta limitación restringe el potencial de mejora continua en el diseño y operación de las PEMFC, especialmente en componentes clave como la membrana polimérica, cuyo espesor influye directamente en el transporte de protones y en las pérdidas por sobrepotencial.

En este contexto, el presente trabajo propone y desarrolla un marco de optimización novedoso basado en el algoritmo CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy), un método estocástico robusto y eficiente para problemas de optimización no lineales y multimodales. La implementación del CMA-ES se orienta específicamente a la optimización del espesor del electrolito polimérico, buscando un equilibrio óptimo entre la conductividad protónica y la resistencia óhmica. Mediante este enfoque, se logra superar las limitaciones de los métodos tradicionales, ofreciendo una herramienta poderosa para el diseño automatizado de PEMFC adaptadas a requerimientos operacionales específicos.

Metodología

Modelo Simplificado de PEMFC

Se empleó un modelo físico que permite establecer una relación directa entre el espesor de la membrana y el rendimiento de la celda. La curva de polarización de una PEMFC se describe con la siguiente ecuación [21]:

$$V = E_{rev} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \tag{1}$$

donde E_{rev} es el voltaje teórico, η_{act} es el sobrepotencial de activación, η_{ohm} es el sobrepotencial óhmico y η_{conc} es el sobrepotencial de concentración.

El espesor de la membrana influye directamente en el sobrepotencial óhmico, el cual se determina como:

$$\eta_{ohm} = i \cdot \frac{t_{mem}}{\sigma_{mem}} \tag{2}$$

donde la relación t_{mem}/σ_{mem} representa la resistencia óhmica, i es la densidad de corriente, t_{mem} es el espesor del electrolito y

ISSN 2448-5837

Edición digital

σ_{mem} es su conductividad protónica. Un mayor espesor implica una mayor resistencia óhmica y, por tanto, una reducción en el voltaje de salida, como se puede observar en la Ec. (1).

La densidad de potencia está definida como:

$$P = V \cdot I \qquad (3)$$

Función Objetivo

La función objetivo está definida como el negativo de la densidad de potencia, de manera que el problema de maximización se convierte en un problema de minimización:

$$f(p) = -P(p) \qquad (4)$$

donde p es el vector de parámetros a optimizar.

Algoritmo de Optimización

La optimización del espesor de la membrana se llevó a cabo utilizando el algoritmo de Estrategia de Evolución con Matriz de Covarianza Adaptativa (CMA-ES, por sus siglas en inglés), el cual pertenece a la familia de métodos evolutivos estocásticos y ha demostrado ser eficiente en problemas de optimización no lineales, continuos y de alta complejidad [22]. Su fortaleza radica en su capacidad para adaptar la distribución de probabilidad de las soluciones candidatas mediante la actualización de la matriz de covarianza, lo que permite una búsqueda eficiente en espacios de diseño con fuertes correlaciones entre variables. Su capacidad para explorar el espacio de búsqueda sin requerir gradientes lo convierte en una herramienta adecuada para la optimización de parámetros estructurales en las PEMFC.

El algoritmo [22] comienza con la inicialización de un conjunto de parámetros que se representan como un vector de variables de decisión:

$$\boldsymbol{x}^{(0)} = x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)} \qquad (5)$$

Se inicializa una matriz de covarianza $\boldsymbol{C}^{(0)}$ que define la distribución de probabilidad de las nuevas soluciones generadas:

$$C^{(0)} = \sigma^2 \boldsymbol{I} \qquad (6)$$

aquí, σ^2 es la varianza inicial y la matriz identidad está definida como $\boldsymbol{I}$.

En cada iteración, se generan nuevas soluciones usando una distribución gaussiana multivariante:

$$\boldsymbol{x}_k^{t+1} = \boldsymbol{m}^t + \sigma^t \boldsymbol{B}^t \boldsymbol{D}^t \mathcal{N}(0, \boldsymbol{I}) \qquad (7)$$

donde $\boldsymbol{x}_k^{t+1}$ es la k-ésima nueva solución en la iteración t+1, $\boldsymbol{m}^t$ es el valor promedio de la población actual, σ^t es el tamaño de paso, $\boldsymbol{B}^t \boldsymbol{D}^t$ es la matriz de covarianza factorizada y $N(0, \boldsymbol{I})$ es una muestra de una distribución normal estándar.

Cada nueva solución $\boldsymbol{x}_k^{t+1}$ se evalúa usando la función objetivo:

$$f\left(\boldsymbol{x}_k^{t+1}\right) = -P\left(\boldsymbol{x}_k^{t+1}\right) \qquad (8)$$

Después de evaluar las soluciones, se seleccionan las mejores λ soluciones en función de su valor de $f(\boldsymbol{x}_k^{t+1})$ y se actualizan los parámetros del algoritmo: valor medio, matriz de covarianza y tamaño de paso, definidos por las ecs. (9)-(11):

$$\boldsymbol{m}^{t+1} = \sum_{k=1} \omega_k \left(\boldsymbol{x}_k^{t+1} - \boldsymbol{m}^t\right)\left(\boldsymbol{x}_k^{t+1} - \boldsymbol{m}^t\right) \qquad (9)$$

donde w_k son los pesos asignados a cada una de las mejores soluciones.

$$\mathbf{C}^{t+1} = (1-c)\mathbf{C}^t + c\boldsymbol{m}^{t+1} \qquad (10)$$

donde c es el coeficiente de aprendizaje para la actualización de la matriz de covarianza.

$$\sigma^{t+1} = \sigma^t \exp\left(\frac{c_\sigma}{d_\sigma}\left(\frac{\| \boldsymbol{p}_\sigma^{t+1} \|}{E[\| \mathrm{N}(0, \boldsymbol{I} \|]} - 1\right)\right) \qquad (11)$$

donde p_σ^{t+1} es un vector de evolución, c_σ es la constante de aprendizaje y d_σ es el factor de amortiguamiento.

Modelado Numérico de PEMFC

Se empleó el Método de Volúmenes Finitos (FVM). El método de solución Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) se utiliza para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, calcular los campos de velocidad y presión, ajustar mediante corrección de presión y resolver el transporte de especies. Posteriormente, se determinan los campos de potencial.

El sistema acoplado de ecuaciones gobernantes se resuelve iterativamente hasta alcanzar convergencia, definida por una tolerancia menor a $1x10^{-6}$ en los residuales y una diferencia de corriente menor a $1x10^{-4}$.

Para garantizar la viabilidad y precisión de las simulaciones numéricas, se establecieron las siguientes suposiciones que permiten simplificar el problema sin comprometer la representatividad de los resultados:

- Análisis tridimensional en estado estacionario.
- Régimen de flujo laminar.

Edición digital

ISSN 2448-5837

- Características termo-físicas son constantes.
- Capas de difusión y catalíticas isótropas.

Las ecuaciones gobernantes para una PEMFC se basan en los principios de la termodinámica y la mecánica de fluidos. En la Tabla 1 se observan las ecuaciones gobernantes del modelo. Cabe destacar que los términos fuente S presentes en las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento, energía y transporte de especies, se determinan en función del modelo físico-químico específico de la celda de combustible. Estos términos permiten incorporar efectos como la generación o consumo de masa debido a las reacciones electroquímicas, las fuerzas adicionales en medios porosos, la generación de calor por pérdidas óhmicas y sobrepotenciales, así como la producción o consumo de especies. Su formulación se basa en principios termodinámicos, ecuaciones de Faraday y balances de carga, acoplados a las condiciones locales de operación (densidad de corriente, concentración de especies, temperatura), y se integran dentro del esquema de solución numérica para representar de manera precisa los fenómenos internos de la PEMFC.

Tabla 1 – Ecuaciones gobernantes.

Nombre	Ecuación	
Conservación de masa	$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m$	(12)
Conservación de momento	$\vec{u}\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + S_{fe}$	(13)
Conservación de energía	$\rho c_p \vec{u} \cdot \nabla \vec{T} = \nabla \cdot (k \nabla \vec{T}) + S_h$	(14)
Transporte de especies	$\rho \vec{u} \cdot \nabla m_i = \nabla \cdot \vec{J} + S_i$	(15)

En las simulaciones de PEMFC, las condiciones de frontera regulan el transporte de corriente y especies entre membrana, electrodos y colectores, asegurando un modelo preciso. Se permite flujo de corriente solo en los contactos eléctricos del ánodo y cátodo. Térmicamente, las paredes se consideran adiabáticas excepto las expuestas al ambiente, que están a temperatura constante.

En las entradas de los canales, se define un perfil de velocidad uniforme basado en la estequiometría del flujo:

$$\zeta_a = X_{H_2,in} \vartheta_{a,in} \frac{P_a}{RT} \frac{2F}{I_{ref} A_{MEA}} \tag{16}$$

$$\zeta_c = X_{O_2,in} \vartheta_{c,in} \frac{P_c}{RT} \frac{4F}{I_{ref} A_{MEA}} \tag{17}$$

donde X_i es la fracción másica de entrada del gas, ϑ es el flujo volumétrico de entrada, A_{MEA} es el área activa de la celda, R es la constante de los gases, P es la presión, T es la temperatura de la celda, I_{ref} es la densidad de corriente de referencia y F es la constante de Faraday.

Validación del Modelo

La validación determina si el modelo computacional predice con precisión los fenómenos físicos y electroquímicos que ocurren durante el funcionamiento de la celda de combustible. Para este estudio, la validación se realizó simulando una configuración de canal recto. Los parámetros electroquímicos, las condiciones de funcionamiento, las propiedades del material y las características geométricas de los componentes para la comparación se obtuvieron de Um et al. [23]. Estos parámetros se incorporaron al modelo computacional para garantizar la coherencia entre la configuración de la simulación y el marco experimental.

La Figura 2 presenta la curva V-I obtenida en el análisis numérico y los resultados experimentales obtenidos por Um [23]. Los resultados de la simulación numérica (Figura 2) muestran una fuerte correlación con los datos experimentales, lo que indica que el modelo desarrollado es capaz de predecir con precisión el comportamiento real de una celda PEMFC en las condiciones de funcionamiento dadas.

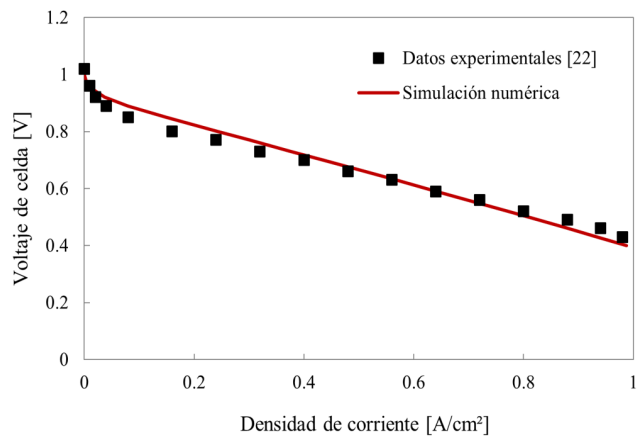

Figura 2 – Validación del modelo numérico con datos experimentales [23].

Independencia de Malla

Un aspecto fundamental en las simulaciones numéricas es el análisis de independencia de malla. Usar muy pocos elementos puede introducir errores, mientras que una malla demasiado refinada puede generar costos computacionales excesivos. Para evaluar la independencia de malla, se generaron seis mallas diferentes. El criterio para determinar cuándo un refinamiento adicional ya no afectaba significativamente los resultados fue una variación en la densidad de corriente promedio inferior a $5x10^{-3}$. En la Tabla 2 se puede observar que la variación relativa de I_{prom} entre la Malla 5 y la Malla 6 es extremadamente pequeña, con una diferencia de solo 0.000157. Esto sugiere que la malla con 3,300,000 elementos está lo suficientemente refinada para obtener una solución precisa.

ISSN 2448-5837

Edición digital

Tabla 2 – Independencia de Malla.

Elementos	Densidad de Corriente [A/cm²]
470,000	1.277199
1,200,000	1.339939
1,700,000	1.355259
2,000,000	1.365597
3,300,000	1.373505
3,700,000	1.373722

Resultados

El análisis numérico se centró en la optimización del espesor de la membrana y su impacto en diversas propiedades críticas del sistema, como el contenido de agua en la membrana, la densidad de corriente y la densidad de potencia. El vínculo entre los resultados de las simulaciones y el proceso de optimización se establece mediante un esquema acoplado en el que la simulación computacional actúa como evaluador del desempeño de la celda. En cada iteración del algoritmo evolutivo, se genera una propuesta de diseño (un valor específico del espesor de la membrana), la cual se introduce en el modelo CFD para simular el comportamiento electroquímico y de transporte de la celda. A partir de los resultados obtenidos, como la distribución de corriente, temperatura, concentración de especies y caída de potencial, se calcula una función objetivo, la cual es devuelta al algoritmo para guiar la evolución de nuevas soluciones.

En este estudio, la optimización se realizó considerando un rango de espesor de membrana entre 0.025 mm y 0.25 mm, el cual abarca y extiende los valores reportados para membranas comerciales. El valor óptimo obtenido fue de 50 micrómetros, lo que representa una solución intermedia que equilibra la resistencia óhmica y la hidratación efectiva de la membrana.

Análisis de la Función Objetivo

La Figura 3 ilustra la evolución de la función objetivo a lo largo de las generaciones. Inicialmente, el algoritmo explora de manera amplia el espacio de soluciones, mostrando fluctuaciones significativas en el valor de la función objetivo. A medida que avanzan las generaciones, el algoritmo converge hacia regiones de mayor calidad, estabilizando el valor de la función objetivo. Esto indica que el método CMA-ES ha sido efectivo en identificar configuraciones óptimas para maximizar la densidad de potencia. La estabilidad observada en las últimas generaciones sugiere que se ha alcanzado una solución cercana al óptimo global.

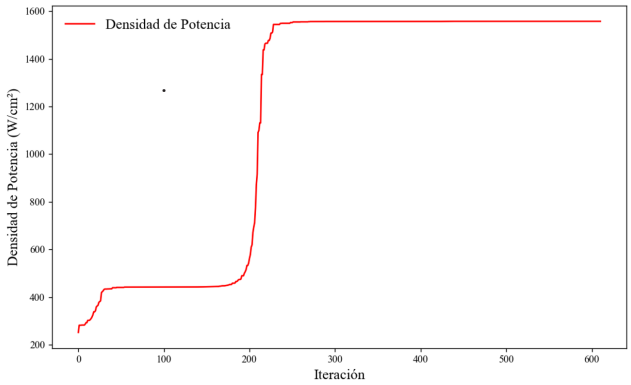

Figura 3 – Evolución de la función objetivo.

Contenido de Agua de la Membrana

El contenido de agua en la celda se analizó para evaluar el impacto de la optimización en la gestión del agua. El contenido de agua en la membrana se expresa mediante λ (adimensional) y representa la cantidad de moléculas de agua por cada grupo ácido sulfónico ($-SO_3H$). Como se muestra en la Figura 4, la optimización del espesor permitió un control más preciso sobre la gestión del agua en la PEMFC. Un espesor reducido mejoró la distribución de agua dentro de la membrana, evitando problemas como la deshidratación en ciertas zonas o la acumulación excesiva de agua en otras, lo que podría llevar a la inundación de los electrodos. Este balance óptimo de agua resultó en una conductividad protónica más elevada y constante, lo que favoreció un mejor transporte de protones a través de la membrana y, por lo tanto, un rendimiento electroquímico superior.

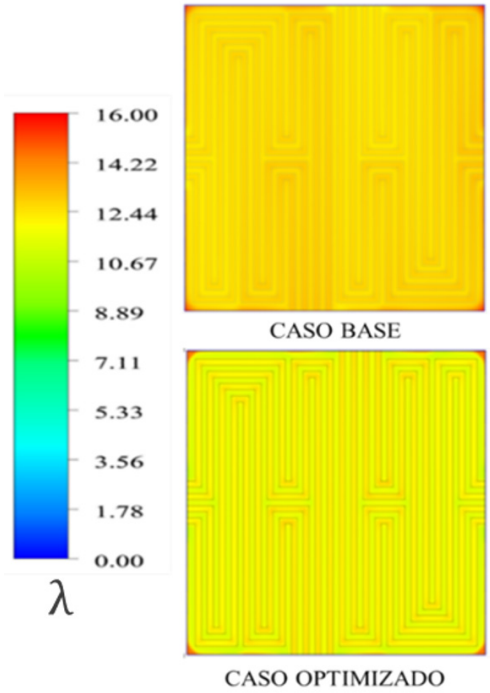

Figura 4 – Contenido de agua en la membrana.

EDICIÓN DIGITAL

ISSN 2448-5837

Densidad de Corriente

La densidad de corriente es una medida directa del rendimiento de la PEMFC y refleja la cantidad de carga eléctrica generada por unidad de área de la membrana. A través de la optimización del espesor, se logró una reducción notable en la resistencia interna del sistema, lo que permitió un transporte más eficiente de protones desde el ánodo hasta el cátodo. Como resultado, la densidad de corriente aumentó significativamente (véase la Figura 5). Este incremento es indicativo de un mayor aprovechamiento de los gases reactivos y una menor caída de voltaje, lo que en última instancia se traduce en una mayor eficiencia. Este efecto es particularmente pronunciado en condiciones operativas donde la demanda de corriente es alta, demostrando la efectividad de la optimización.

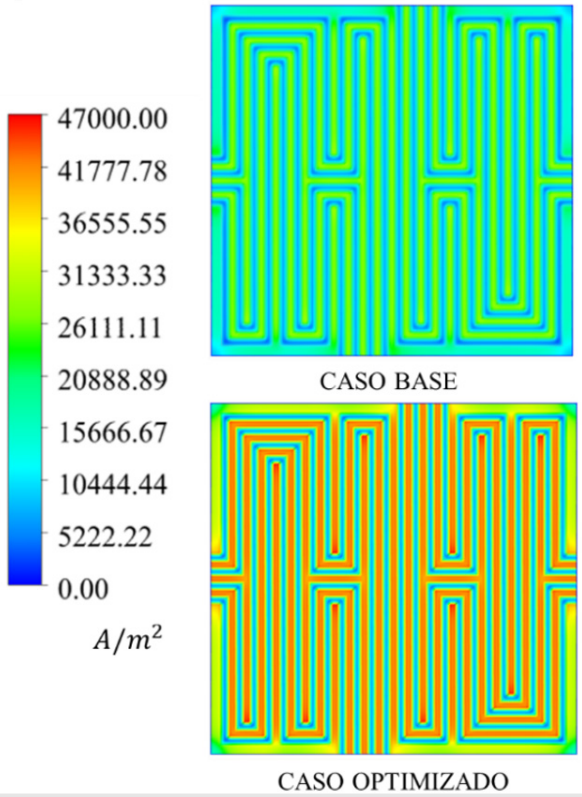

Figura 5 – Distribución de densidad de corriente.

Densidad de Potencia

La curva de polarización de la Figura 6 representa la relación entre el voltaje y la densidad de corriente. Se mostró una mejora sustancial como resultado de la optimización del espesor de la membrana. Un espesor más fino no solo redujo las pérdidas óhmicas, sino que también optimizó el balance entre la conductividad protónica y el manejo del agua, lo que se tradujo en una mayor eficiencia en la conversión de energía química en energía eléctrica. La curva de polarización mejorada sugiere que la PEMFC optimizada es más competitiva para aplicaciones prácticas, con una mejora de aproximadamente 23% en la generación de energía, donde la eficiencia energética y la capacidad de operar eficientemente en un amplio rango de condiciones son esenciales.

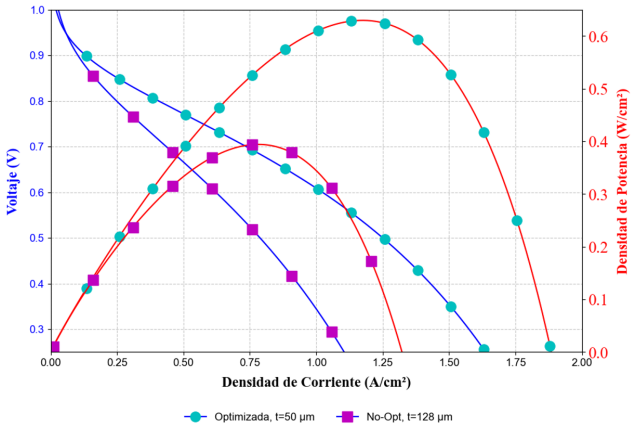

Figura 6 – Curva de polarización.

Conclusiones

El espesor de la membrana influye directamente en el transporte de protones y en la densidad de potencia generada por la celda, siendo un parámetro crítico en el diseño de PEMFC. Si bien el uso de membranas más delgadas puede mejorar notablemente el rendimiento electroquímico al reducir la resistencia óhmica, esta mejora sólo se alcanza dentro de un rango óptimo que equilibre múltiples efectos contrapuestos. En particular, una reducción excesiva del espesor puede comprometer la durabilidad del sistema y provocar problemas de manejo de agua. Por tanto, la optimización de este parámetro no puede abordarse de manera aislada, sino que debe considerar la interacción simultánea de variables fisicoquímicas, estructurales y operativas. En este trabajo, se trasciende el enfoque convencional basado únicamente en simulaciones numéricas al integrar un marco de optimización sistemática mediante el método CMA-ES. Este enfoque permite explorar el espacio de diseño de forma más eficiente y robusta, identificando configuraciones óptimas que no serían fácilmente detectables mediante análisis paramétricos tradicionales. La principal aportación de esta metodología radica en su capacidad para encontrar un espesor de membrana que maximice la conductividad protónica. Esta gestión eficiente del agua, combinada con la reducción de las pérdidas internas, permite incrementar la densidad de corriente y prolongar la vida útil del sistema. En resumen, el uso del algoritmo CMA-ES no solo mejora la parte del proceso de optimización, sino que establece una base metodológica sólida para el diseño avanzado de PEMFC más eficientes.

ISSN 2448-5837

Edición digital

Referencias

[1] Global Hydrogen Review 2023, *Global Hydrogen Review 2023*, 2023.

[2] C. Geng, S. Mei, L. Liu, W. Ma, and Q. Xue, "*Simulation and experimental research on energy management control strategy for fuel cell heavy-duty truck*," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 69, no. October 2023, pp. 1305–1318, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.081.

[3] B. Yang et al., "*Parameter identification of proton exchange membrane fuel cell via Levenberg-Marquardt backpropagation algorithm*," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 46, no. 44, pp. 22998–23012, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.04.130.

[4] K. Jiao et al., "*Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells*," Nature, vol. 595, no. 7867, pp. 361–369, 2021, doi: 10.1038/s41586-021-03482-7.

[5] S. Dutta and C. M. Hussain, *Sustainable Fuel Technologies Handbook*, 2020.

[6] C. J. McKinlay, S. R. Turnock, D. A. Hudson, and P. Manias, "*Hydrogen as a deep-sea shipping fuel: Modelling the volume requirements*," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 69, no. May, pp. 863–873, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.054.

[7] Y. Lu, X. Wang, G. Yang, D. Gong, and S. Xu, "*Experimental study on the influence of operating conditions on performance decline with periodic anode purges in a vehicular PEMFC stack*," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 69, no. January, pp. 1276–1286, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.159.

[8] L. Zhang and Z. Shi, "*Optimization of serpentine flow field in proton-exchange membrane fuel cell under the effects of external factors*," Alexandria Eng. J., vol. 60, no. 1, pp. 421–433, 2021, doi: 10.1016/j.aej.2020.09.007.

[9] F. Chen, H. Ye, and Y. Pei, "*Optimizing the economic viability of proton exchange membrane fuel cells operated with oxygen-enriched cathode air for residential hydrogen energy storage systems*," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 65, no. March, pp. 236–251, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.280.

[10] K. Meng, B. Chen, H. Zhou, W. Chen, and Z. Tu, "*Experimentally investigation on current density distribution characteristics of hydrogen-oxygen proton exchange membrane fuel cells under dynamic loading*," J. Clean Prod., vol. 393, p. 136315, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136315.

[11] Y. Lu, X. Wang, G. Yang, D. Gong, and S. Xu, "*Experimental study on the influence of operating conditions on performance decline with periodic anode purges in a vehicular PEMFC stack*," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 69, no. January, pp. 1276–1286, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.159.

[12] L. Fan, "*Recent development in design a state-of-art proton exchange membrane fuel cell from stack to system: Theory, integration and prospective*," Int. J. Hydrogen Energy, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.212.

[13] K. S. Dhathathreyan and N. Rajalakshmi, "*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*," in Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology, pp. 40–115, doi: 10.1007/978-0-387-68815-23.

[14] A. Nishimura, K. Toyoda, Y. Kojima, S. Ito, and E. Hu, "*Numerical simulation on impacts of thickness of Nafion series membranes and relative humidity on PEMFC operated at 363 K and 373 K*," Energies, vol. 14, p. 8256, 2021, doi: 10.3390/en14248256.

[15] S. Mohanty, A. N. Desai, S. Singh, V. Ramadesigan, and S. M., "*Effects of the membrane thickness and ionomer volume fraction on the performance of PEMFC with U-shaped serpentine channel*," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 46, no. 39, pp. 20650–20663, May 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.03.252.

[16] S. Li, R. Wei, G. Zhang, Y. Qi, G. Yang, and Q. Shen, "*Numerical investigation on the impact of membrane thickness on transport phenomena in PEM fuel cells*," Int. J. Electrochem. Sci., vol. 15, no. 5, pp. 4138–4147, Mar. 2020, doi: 10.20964/2020.05.15.

[17] T. Huang et al., "*Optimization of the thickness of catalytic layer for HT-PEMFCs based on genetic algorithm*," Energy Reports, vol. 8, pp. 12905–12915, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.09.111.

[18] L. Xia, M. Ni, Q. He, Q. Xu, and C. Cheng, "*Optimization of gas diffusion layer in high temperature PEMFC with the focuses on thickness and porosity*," Appl. Energy, vol. 300, p. 117357, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117357.

[19] B. Kienitz, "*Optimizing polymer electrolyte membrane thickness to maximize fuel cell vehicle range*," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 46, no. 19, pp. 11176–11182, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.126.

[20] Z. Chen, W. Zuo, K. Zhou, Q. Li, Y. Huang, and J. E., "*Multi-objective optimization of proton exchange membrane fuel cells by RSM and NSGA-II*," Energy Convers. Manag., vol. 277, p. 116691, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.116691.

Edición digital

ISSN 2448-5837

[21] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2003.

[22] K. Uchida, R. Hamano, M. Nomura, S. Saito, and S. Shirakawa, "*CMA-ES for safe optimization,*" arXiv preprint, May 2024, doi: 10.48550/arxiv.2405.10534.

[23] S. Um and C. Y. Wang, "*Three-dimensional analysis of transport and electrochemical reactions in polymer electrolyte fuel cells*," J. Power Sources, 2003, doi: 10.1016/j.jpowsour.2003.07.007.

ISSN 2448-5837

Edición digital