



Optimización multiobjetivo de canales tipo pin en placas bipolares de celdas de combustible

Multi-objective optimization of pin-type channels in bipolar plates of proton exchange membrane fuel cells

Brian J. Moya¹ , Marcelino Rivas Santana^{1*} , Leandro González Rodríguez² ,
Raúl Mario del Toro Matamoras² 

1. Universidad de Matanzas. Facultad de Ciencias Técnicas. Matanzas, Cuba.

2. Universidad Politécnica de Madrid - Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, Centro de Automática y Robótica. Madrid, España.

* Autor de correspondencia: marcelino.rivas@umcc.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](#)



Recibido: 15 de febrero de 2025

Aceptado: 10 de marzo de 2025

Publicado: 12 de marzo de 2025

Resumen

La geometría de los canales de flujo en las placas bipolares de celdas de combustible de membrana de electrolito polimérico ejerce una influencia decisiva sobre el rendimiento electroquímico, la eficiencia de transferencia de masa y agua generada. En este trabajo se realizó una optimización geométrica de canales tipo pin de una celda de combustible con un área activa pequeña para aplicaciones de baja demanda energética. Se utilizó el método estadístico de Taguchi, definiendo dos funciones objetivo: la minimización de la caída de presión y la homogeneización del campo de velocidades en el plano activo de la celda. Para ello se simuló la distribución del hidrógeno por la geometría

de la pila, mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional en ANSYS FLUENT. Los resultados obtenidos permitieron identificar una configuración geométrica óptima con una altura del canal de 0,8 mm, lado del pin de 0,6 mm y espaciamiento entre pines de 2,5 mm, mostrando una caída de presión mínima y una distribución uniforme del flujo.

Palabras claves: canales tipo pin, celdas de combustible, dinámica de fluidos computacional, distribución de hidrógeno, método de Taguchi.

Abstract

The geometry of the flow channels in the bipolar plates of polymer electrolyte membrane fuel cells exerts a decisive influence on the electrochemical performance, mass transfer efficiency and generated water. In this work, a geometrical optimization of pin-type channels of a fuel cell with a small active area for low energy demand applications was performed. The Taguchi statistical method was used, defining two objective functions: minimization of the pressure drop and homogenization of the velocity field in the active plane of the cell. For this purpose, the hydrogen distribution

was simulated by means of computational fluid dynamics simulations in ANSYS FLUENT. The results obtained allowed identifying an optimal geometrical configuration with a channel height of 0.8 mm, pin side of 0.6 mm and pin spacing of 2.5 mm, showing a minimum pressure drop and a uniform flow distribution.

Key words: computational fluid dynamics, fuel cells, hydrogen distribution, pin channels, Taguchi method.

Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Moya BJ, Rivas Santana M, González Rodríguez L, del Toro Matamoras RM. Optimización multiobjetivo de canales tipo pin en placas bipolares de celdas de combustible. Ingeniería Mecánica. 2025;28:e706. <https://goo.su/qOU1R0s>

1. Introducción

Las pilas de combustible, y en particular las Pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, PEMFC), son una solución energética limpia y eficiente en un entorno global que demanda tecnologías sostenibles [1]. Su capacidad para transformar directamente la energía química del hidrógeno en electricidad, sin emisiones contaminantes y con una alta eficiencia energética, las convierte en una alternativa ideal para una amplia variedad de aplicaciones, que incluyen desde el transporte urbano hasta sistemas estacionarios, dispositivos portátiles y plataformas autónomas como drones o robots ligeros. Estas

ventajas, sumadas a su operación silenciosa y modular, las posicionan como una de las tecnologías clave en la transición hacia una economía basada en energías renovable [2, 3].

Dentro de la arquitectura de una PEMFC, la placa bipolar desempeña un papel determinante en la conducción eléctrica entre celdas, el soporte estructural del conjunto y en la gestión del flujo de gases reactivos y del agua generada durante el proceso electroquímico [4, 5]. Su diseño geométrico incide directamente en la distribución de reactivos, la caída de presión y la eficiencia en la evacuación del agua, afectando así la durabilidad, el rendimiento y la viabilidad operativa de la celda [6, 7].

A lo largo de la evolución del diseño de PEMFC, se han empleado diferentes configuraciones de canales en las placas bipolares, tales como los diseños tipo serpentina, paralelo, interdigitado, tipo malla [pin] y estructuras bioinspiradas [8]. Cada uno presenta ventajas y limitaciones según el contexto de aplicación. El canal serpentino ofrece buena capacidad de drenaje pero impone una elevada caída de presión; el paralelo minimiza la resistencia al flujo pero es más propenso a zonas de acumulación de agua; y el interdigitado mejora la penetración del gas en la capa de difusión a costa de una mayor demanda energética [9-11]. En un estudio [12] se simulaban diferentes configuraciones de canales de flujo para una celda de 100 cm², encontrando que el serpentin de 3 canales optimiza la distribución de reactivos, el manejo del agua y la eficiencia energética.

Los canales tipo pin, por su parte, generan una red intersticial de flujo mediante la inserción regular de obstáculos que permite una distribución más isotrópica, reducción de zonas muertas y evacuación multivía del agua líquida, con bajo gradiente de presión [13].

Las estructuras bioinspiradas buscan replicar patrones naturales eficientes, aunque su complejidad geométrica y requerimientos de fabricación limitan su aplicabilidad práctica, especialmente en dispositivos de escala reducida [14, 15].

En el contexto actual, los canales tipo pin mantienen relevancia siendo una alternativa viable, de alto rendimiento y adaptable a diferentes procesos de manufactura. Su estructura abierta favorece la difusión lateral, permite una gestión hídrica eficiente sin necesidad de drenajes complejos, y puede adaptarse geométricamente para responder a distintos patrones de consumo de reactivos mediante ajustes en la forma, el tamaño y el espaciado de los pines. La modificación del campo de flujo tipo pin permite alcanzar una distribución más homogénea de los reactivos y una reducción adicional en la caída de presión [16]. Precisamente la baja caída de presión es su principal ventaja, aunque presenta desventajas como la distribución no uniforme de los reactivos y la presencia de zonas estancadas [17].

Mediante configuraciones de diseño se han realizado optimizaciones geométricas [18] de este tipo de pilas logrando mejoras en el rendimiento con respecto al diseño convencional, destacándose que la forma geométrica de los pines tiene un impacto importante en la caída de presión y en la eficiencia para eliminar el agua, donde un arreglo de pines circulares favorece una dispersión más homogénea del agua líquida, mientras que los pines de perfil en diamante exhiben la menor caída de presión y minimizan la retención de agua, y los pines cuadrados facilitan un drenaje rápido del agua, aunque producen una caída de presión notablemente más alta. En la literatura [19] se propone una estrategia de mejora en la gestión del agua y el rendimiento de celdas PEMFC mediante la introducción de canales tipo pin con insertos porosos de carbono, donde el canal con configuración en zigzag demostró el mejor comportamiento, alcanzando una densidad de potencia máxima de 0,5276 W/cm².

Igualmente se ha planteado la introducción de deflectores ranurados, cuyo diseño fue optimizado mediante un algoritmo genético. El diseño permitió un incremento del 3,2 % en la densidad de potencia y una reducción del 53,6 % en la potencia de bombeo en comparación con configuraciones convencionales [20].

El diseño de campos de flujo tipo pin usualmente responde a dos variantes principales: uno en el que el flujo se divide uniformemente y otro en el que los reactivos se consumen a lo largo de los canales de flujo [8].

La variante de flujo dividido uniformemente se caracteriza por disponer los pines en una configuración regular y simétrica, lo que favorece una distribución homogénea del reactivo a lo largo del canal. Por otro lado, el diseño basado en el consumo de reactivos introduce modificaciones estratégicas en la disposición de los pines, permitiendo que la geometría se adapte a la distribución variable del consumo de reactivos y minimice las zonas muertas. Esto se logra ajustando la forma, el tamaño y el espaciamiento de los pines para optimizar tanto la baja caída de presión como la eficiencia de la reacción [21].

En este trabajo se realizó una optimización geométrica de canales tipo pin de una celda de combustible con un área activa pequeña para aplicaciones de baja demanda energética.

Los resultados obtenidos permitieron identificar una configuración geométrica óptima con una altura del canal de 0,8 mm, lado del pin de 0,6 mm y espaciamiento entre pines de 2,5 mm, mostrando una caída de presión mínima y una distribución uniforme del flujo.

2. Métodos y Materiales

Se describe el procedimiento para optimizar geométricamente los canales tipo pin en las placas bipolares de una PEMFC destinada a aplicaciones de baja demanda energética y se detallan las condiciones de operación teóricas de la celda, el diseño de la geometría de los canales, la planificación experimental empleando el método de Taguchi y el método de Dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) utilizado para evaluar y optimizar las configuraciones geométricas.

Los resultados obtenidos permitieron identificar una configuración geométrica óptima con una altura del canal de 0,8 mm, lado del pin de 0,6 mm y espaciamiento entre pines de 2,5 mm, mostrando una caída de presión mínima y una distribución uniforme del flujo.

2.1. Condiciones de operación de la pila

Dado que la aplicación objetivo corresponde a dispositivos de bajo consumo energético, como sensores autónomos o sistemas IoT, las condiciones de operación de la celda fueron seleccionadas de forma coherente con este tipo de requerimientos. Estudios recientes han demostrado que las microceldas PEMFC pueden proporcionar una densidad de energía adecuada para aplicaciones de baja potencia, manteniendo una alta eficiencia operativa [22]. Los parámetros teóricos de operación definidos se calcularon por las expresiones mostradas en [23]. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de operación. Fuente: autores

Parámetro	Valor
Área activa	441 mm²
Voltaje de operación	0,6 V
Densidad de corriente	0,4 - 0,8 A/cm²
Corriente de salida	1,76 – 3,53 A
Potencia útil teórica	1,23 – 2,12 W

2.2 Diseño de la geometría de los canales

Para el diseño de la geometría del canal tipo pin, se tuvieron en cuenta los tres parámetros geométricos de mayor relevancia [24, 25]. Teniendo en cuenta los criterios analizados en [la literatura](#) los parámetros geométricos en canales con estructura pin de mayor influencia son: lado del pin (d_p), el espaciamiento entre pines (s_p) y la altura del canal (h_c), como se muestran en la figura 1. Los intervalos utilizados para los diseños se muestran en la [Tabla 2](#). Estos rangos se seleccionaron para garantizar un área libre de paso suficiente para el flujo de hidrógeno y permitir una variación apreciable en la geometría que impacte sobre la caída de presión y la distribución de velocidades.

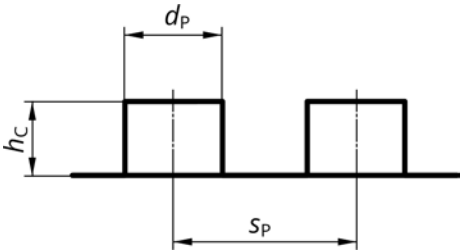


Fig. 1. Parámetros geométricos. Fuente: autores

Tabla 2. Intervalos de los parámetros geométricos utilizados para los diseños. Fuente: autores

Parámetro	Intervalo
Lado del pin (d_p)	0,5 - 1,5 mm
Espaciamiento entre pines (s_p)	1,5 - 2,5 mm
Altura del canal (h_c)	0,5 - 1,5 mm

2.3 Diseño de experimento y método de optimización

Para evaluar diferentes configuraciones geométricas, se empleó un diseño de experimento ortogonal tipo Taguchi L9 (3^3). La tabla 3 muestra los parámetros utilizados en el diseño.

Tabla 3. Diseño de experimento (arreglo ortogonal L9). Fuente: autores

Experimento	Altura del canal (h_c)	Lado del pin (d_p)	Espaciamiento entre pines (s_p)	Número total de pines	Fracción de área ocupada
1	0,8	0,6	1,5	196	0,125663706
2	0,8	0,9	2,0	100	0,144256806
3	0,8	1,2	2,5	64	0,164132188
4	1,0	0,6	2,0	100	0,064114136
5	1,0	0,9	2,5	64	0,092324356
6	1,0	1,2	1,5	196	0,502654825
7	1,2	0,6	2,5	64	0,041033047
8	1,2	0,9	1,5	196	0,282743339
9	1,2	1,2	2,0	100	0,256456543

Las placas diseñadas tenían dimensiones exteriores constantes con un área activa de 21 mm × 21 mm y un espesor de 3 mm. Cada configuración geométrica se centró dentro del área activa respetando un margen perimetral. Como ejemplo de los diseños realizados se muestra en la figura 2 el experimento No 1 de la tabla 3.

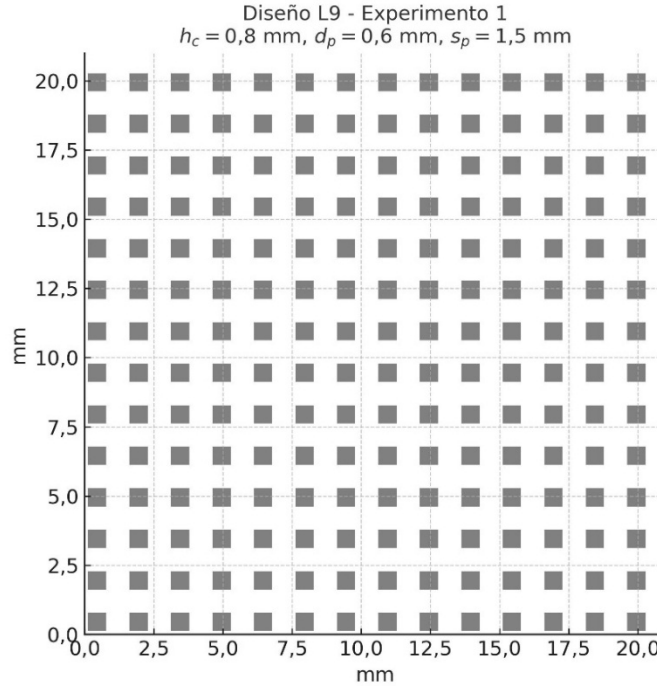


Fig. 2. Diseños realizados. Fuente: autores

Para el análisis numérico, se empleó el software ANSYS Fluent 2022 R2. La malla fue generada con celdas tetraédricas de segundo orden refinadas en la zona de los canales con tamaño 0,10 a 0,12 mm y 0,05 mm para las zonas de entrada y salida del fluido. Las condiciones de frontera definidas fueron: entrada de hidrógeno con velocidad uniforme de 5 m/s, salida con presión atmosférica, 1 atm y paredes con condición no-deslizante. Se consideró flujo laminar, dada la baja velocidad y el pequeño número de Reynolds calculado, $Re < 1$. No se incluyó la Capa de difusión de gas (*Gas Diffusion Layer*, GDL) en esta etapa, centrando el estudio en el comportamiento hidrodinámico interno de la placa.

Con el objetivo de optimizar simultáneamente dos respuestas conflictivas:

1. La caída de presión a través de los canales, D_p .
2. La homogeneidad del campo de velocidades en el plano activo. Para este objetivo se realizó la minimización de la desviación estándar de la velocidad del flujo en el plano transversal al canal en la dirección del eje z , S_v , medida usando monitores superficiales y funciones de postprocesamiento dentro del entorno CFD-Post. Las mediciones se realizaron en un plano a $0,5 h_c$ y se calculó el valor medio de la dispersión.

La estrategia de optimización multiobjetivo se basó en la integración del método Taguchi con el análisis de relación gris. Esta técnica permite combinar métricas de naturaleza diferente en un único índice de desempeño, facilitando así la identificación de configuraciones geométricas óptimas de los canales tipo pin.

A partir de los resultados obtenidos de las simulaciones para cada configuración experimental, se procedió con la normalización de las respuestas utilizando el criterio “menor es mejor”, dado que tanto la caída de presión como la dispersión de la velocidad deben minimizarse. La normalización se realizó aplicando la ecuación (1).

$$Y_i^{(k)} = \frac{y_i^{(k)} - \min(y^{(k)})}{\max(y^{(k)}) - \min(y^{(k)})}, \text{ si } y^{(k)} \text{ será minimizado} \quad (1)$$

Donde:

$y_i^{(k)}$ es el valor de la k -ésima variable de respuesta ($k = 1, \dots, n$) en el i -ésimo punto experimental ($i = 1, \dots, m$)

$Y_i^{(k)}$ es el valor normalizado.

Luego, mediante la ecuación (2), se calcula el valor de la pérdida estimada, Δ_i^k .

$$\Delta_i^{(k)} = \|Y_0^{(k)} - Y_i^{(k)}\| \quad (2)$$

Donde:

$Y_0^{(k)}$ el valor deseado de la k -ésima respuesta ($Y_0^{(k)} = 1$ si la k -ésima respuesta debe minimizarse $Y_0^{(k)} = 0$ si debe maximizarse).

A partir de los valores perdidos estimados, se puede determinar el grado relacional gris para cada respuesta en cada punto experimental, $\xi_i^{(k)}$, como se muestra en la ecuación (3).

$$\xi_i^{(k)} = \frac{\min(\Delta_i^{(k)}) + \psi^{(k)} \max(\Delta_i^{(k)})}{\Delta_i^{(k)} + \psi^{(k)} \max(\Delta_i^{(k)})} \quad (3)$$

Donde:

$\psi^{(k)}$ es un coeficiente de ponderación que describe la importancia relativa de la k -ésima respuesta desde el punto de vista total ($0 \leq \psi^{(k)} \leq 1$).

El grado de relación gris global (*Gray Relational Grade*, GRG) de cada experimento se determinó como el promedio aritmético de los coeficientes de relación gris individuales de las dos respuestas, otorgando igual ponderación a ambas variables objetivo ($\psi^{(k)} = 0,5$). El valor del GRG representa el índice de desempeño global de cada combinación geométrica. Finalmente, se calcularon los promedios del GRG para cada nivel de cada parámetro, con el fin de identificar el nivel óptimo por factor. La configuración con el menor valor de GRG fue considerada como la solución óptima del sistema, y se utilizó para la generación del diseño geométrico final.

Para combinaciones de niveles óptimos seleccionados que no estén incluidas en el diseño de experimentos, su grado relacional gris general correspondiente, γ^* , se predice mediante la ecuación (4).

$$\gamma^* = \bar{\gamma} + \sum_{i=1}^F (\bar{\gamma}_i - \bar{\gamma}) \quad (4)$$

Donde: $\bar{\gamma}$ es la media total de las calificaciones relacionales grises generales, y $\bar{\gamma}_i$ es la calificación relacional gris general media para el nivel óptimo del factor i -ésimo.

3. Resultados

La tabla 4 muestra los valores normalizados, el valor de la pérdida estimada, el grado relacional gris y el grado de relación gris global para las nueve simulaciones realizadas. La tabla 5 muestra los valores del grado de relación gris para cada nivel.

Tabla 4. Resultados de las simulaciones y del método de Taguchi-Gris. Fuente: autores

No	Dp (Pa)	Sv (m/s)	Dp (norm)	Sv (norm)	Δ Dp	Δ Sv	ξ Dp	ξ Sv	GRG
1	19,30	0,7127	0,0561	0,0000	0,9439	1,0000	0,3463	0,3333	0,3398
2	15,84	0,7172	0,0382	0,0040	0,9618	0,9960	0,3420	0,3342	0,3381
3	14,30	0,7362	0,0302	0,0211	0,9698	0,9789	0,3402	0,3381	0,3391
4	10,95	0,9468	0,0129	0,2101	0,9871	0,7899	0,3362	0,3876	0,3619
5	10,70	0,9737	0,0116	0,2343	0,9884	0,7657	0,3359	0,3950	0,3655
6	201,40	1,8266	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000
7	8,47	1,0093	0,0000	0,2662	1,0000	0,7338	0,3333	0,4053	0,3693
8	39,19	1,3626	0,1592	0,5834	0,8408	0,4166	0,3729	0,5455	0,4592
9	13,40	1,1273	0,0256	0,3722	0,9744	0,6278	0,3391	0,4433	0,3912

Tabla 5. Grado de relación gris para cada nivel. Fuente: autores

Factor experimental	Nivel	Promedio del grado relacional gris
Altura del canal (hc)	0,8	0,3390
	1,0	0,5758
	1,2	0,4066
Lado del pin (dp)	0,6	0,3570
	0,9	0,3876
	1,2	0,5768
Espaciamiento entre pines (sp)	1,5	0,5997
	2,0	0,3638
	2,5	0,3580

En la figura 3 se muestran los efectos principales del GRG, representados a través de gráficos de dispersión para las variables hc, dp y sp.

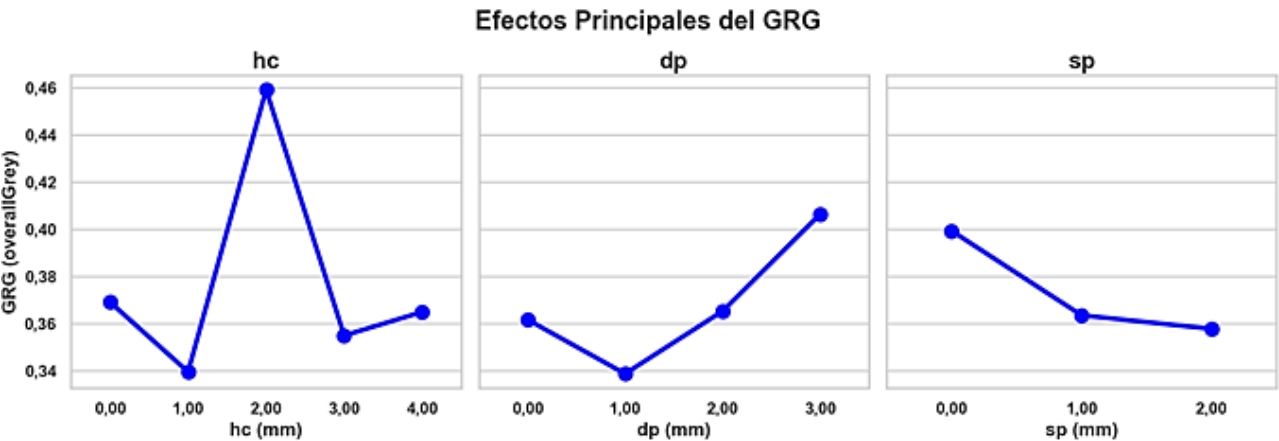


Fig. 3. Gráficos del GRG para hc, dp y sp. Fuente: autores

De la tabla 5 se puede observar que los valores óptimos son: hc=0,8 mm, dp=0,6 mm y sp=2,5 mm.

Para validar esta predicción, se realizó una ejecución experimental correspondiente a los niveles óptimos. Sus resultados, tabla 6, muestran valores para las cuatro respuestas en sus respectivas zonas promedio, lo que coincide con el equilibrio prescrito entre las respuestas.

Tabla 6. Valores de los niveles óptimos. Fuente: autores

	Parámetro (mm)	Valor predicho	Valor observado
Valores de la simulación	Altura del canal (hc)	-	0,8
	Lado del pin (dp)	-	0,6
	Espaciamiento entre pines (sp)	-	2,5
Respuestas	La caída de presión (Dp).	-	13,30
	Desviación estándar de la velocidad del flujo (Sv)	-	0,8418
Grado de relación gris global		0,3501	0,3513

De la tabla 6 se puede observar que existe una buena correspondencia entre los valores previstos y observados del grado relacional gris global.

Los resultados de la simulación del valor del óptimo se muestran en las figuras 4 y 5

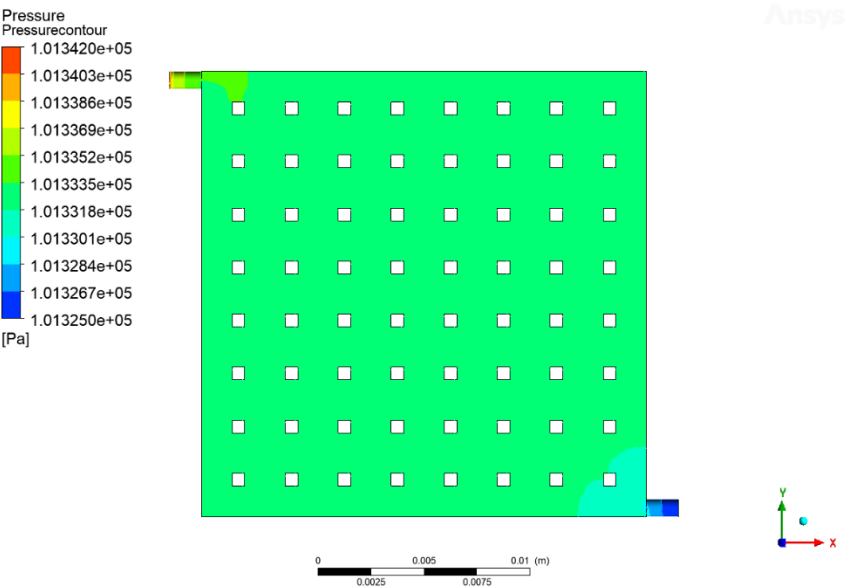


Fig. 4. Simulación de la caída de presión para el valor óptimo. Fuente: autores

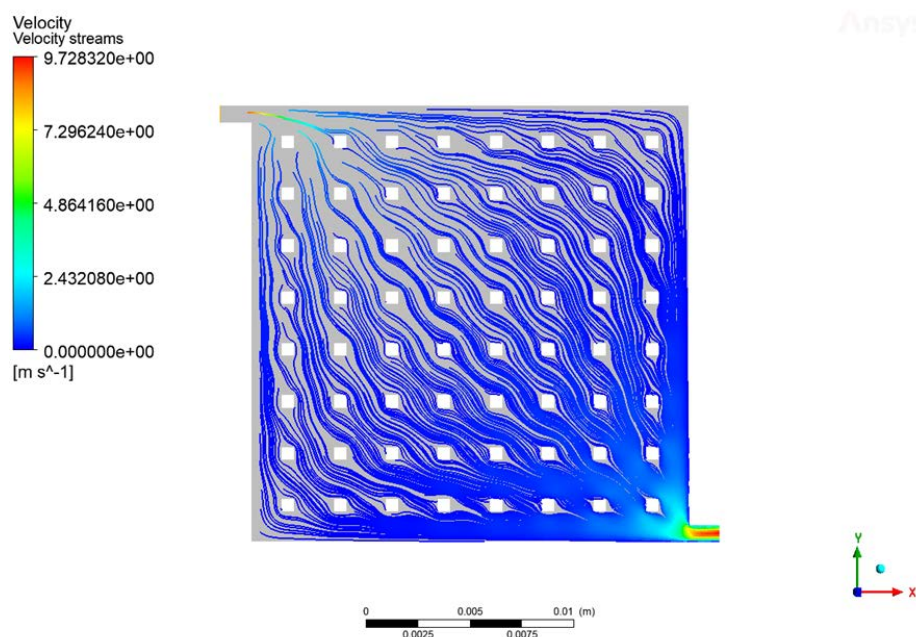


Fig. 5. Simulación de la velocidad del hidrógeno por los canales de la placa para el valor óptimo. Fuente: autores

4. Discusión

De la tabla 7 se observa que la diferencia entre el valor predicho y el observado del grado de relación gris global es muy pequeña, por lo que podemos decir que los resultados del método de Taguchi-Gris son satisfactorios y que los valores de los parámetros de los canales obtenidos pueden ser tomados como los valores óptimos.

En la figura 3 muestra se observa una distribución globalmente uniforme del campo de presión en la región central de la placa, lo cual es indicativo de un comportamiento hidráulico favorable con mínima acumulación de gradientes de presión significativos. La presión máxima registrada a la entrada es del orden de 101339,56 Pa, mientras que la mínima, ubicada en la zona de salida, desciende a aproximadamente 101326,26 Pa. Esta diferencia resulta en una caída de presión total de 13,30 Pa, lo que confirma una excelente eficiencia hidráulica del diseño.

La suave transición del gradiente de presión desde la entrada (zona izquierda) hasta la salida (zona derecha) sin presencia de zonas de alta concentración de presión sugiere que el flujo atraviesa el arreglo de pines de forma equilibrada. No se observan zonas de recirculación o remolinos significativos, lo que contribuye a la reducción de pérdidas por fricción interna. La estructura ordenada de pines cuadrados con espaciado amplio ($sp = 2,5$ mm) facilita la disipación de presión y la expansión lateral del flujo, reduciendo la resistencia hidráulica sin comprometer la uniformidad del suministro de reactante al electrodo.

El diseño muestra un comportamiento similar al de un campo de flujo del tipo pseudo-paralelo con múltiples trayectorias de baja resistencia, validando el enfoque de canales tipo pin como alternativa eficiente en geometrías de escala reducida. La baja caída de presión registrada es particularmente ventajosa en aplicaciones de bajo consumo energético, como celdas portátiles, donde se requiere minimizar el esfuerzo de bombeo sin sacrificar la uniformidad de distribución.

La visualización de líneas de velocidad mostradas en la figura 4 se evidencia un comportamiento altamente eficiente en términos de distribución del flujo de hidrógeno a lo largo de la región activa de la placa bipolar. Se observa que el fluido ingresa por el canal superior izquierdo y se bifurca de manera progresiva, fluyendo entre los pines distribuidos en forma de matriz cuadrada. Esta distribución canaliza el flujo a través de múltiples trayectorias intersticiales, minimizando zonas de recirculación y estancamiento, y promoviendo una buena cobertura del área activa.

En términos de intensidad de velocidad, los valores máximos registrados son del orden de 9,7 m/s, concentrados principalmente en la región de entrada y salida, donde se estrecha el paso del fluido. Este aumento localizado en velocidad es coherente con el efecto de aceleración al atravesar zonas de menor sección hidráulica. Sin embargo, en la región central se mantiene un patrón regular de líneas con intensidades suaves, lo que indica una distribución relativamente homogénea del flujo.

La alineación y continuidad de las líneas de corriente en sentido general desde la entrada hasta la salida refleja que el diseño ha logrado evitar zonas muertas o retrocesos de flujo significativos. La geometría con pines estrechos ($dp = 0,6$ mm) y espaciados ($sp = 2,5$ mm) actúa como un entramado que guía el flujo sin ofrecer alta resistencia, pero a la vez suficiente para inducir una dispersión transversal beneficiosa. Esta condición favorece

la homogeneidad en el transporte de reactivos y la evacuación de productos como el agua, elementos fundamentales en la operación eficiente de una PEMFC.

El flujo presenta una ligera inclinación hacia el borde inferior derecho, lo cual puede ser resultado de la disposición del canal de salida. Sin embargo, no se aprecia una concentración extrema de líneas en un solo canal, lo cual indica que el diseño logra repartir de forma efectiva la carga hidráulica. Desde el punto de vista de la función objetivo de homogeneidad del campo de velocidades, el resultado es positivo, con baja dispersión visible en las trayectorias del flujo.

Se confirmó por tanto, que el diseño optimizado minimiza la caída de presión y garantiza una distribución eficiente del flujo, cumpliendo con los requisitos esenciales para un buen desempeño electroquímico en la celda PEMFC.

Comparando los resultados obtenidos con estudios similares reportados en la literatura, destaca que el uso del método de Taguchi presenta como principal ventaja la evaluación eficiente de múltiples variables simultáneamente, utilizando un número limitado de simulaciones numéricas. Esto reduce significativamente el esfuerzo computacional y acelera el proceso de optimización. Sin embargo, al emplear un diseño experimental con niveles discretos y predefinidos, el método podría pasar por alto soluciones intermedias relevantes, a diferencia de los métodos evolutivos [14] que exploran con mayor amplitud el espacio de soluciones.

Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman que es posible alcanzar un equilibrio óptimo entre eficiencia hidráulica y distribución del flujo con la selección adecuada de los parámetros geométricos. La configuración con $h_c = 0,8$ mm, $d_p = 0,6$ mm y $s_p = 2,5$ mm presentó un desempeño superior, con una caída de presión mínima (13,30 Pa) y una distribución de velocidades uniforme a lo largo del plano activo, las simulaciones de validación mostraron un flujo sin zonas de estancamiento ni recirculaciones importantes, validando así la eficacia del diseño propuesto.

Referencias

- Gong M, Zhang X, Chen M, Ren Y. Proton exchange membrane fuel cell as an alternative to the internal combustion engine for emission reduction: a review on the effect of gas flow channel structures. *Atmosphere*. 2023;14(3):439. <https://doi.org/10.3390/atmos14030439>
- Yi J, Nguyen T. An along-the-channel model for proton exchange membrane fuel cells. *J Electrochem Soc*. 1998;145(4):1149-1159. <https://doi.org/10.1149/1.1838431>
- Xu Z, Qiu D, Yi P, Peng L, Lai X. Towards mass applications: A review on the challenges and developments in metallic bipolar plates for PEMFC. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2020;30(6):815-24. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.10.015>
- Khosravi H S, Abbas Q, Reichmann K. Electrochemical aspects of interconnect materials in PEMFCs, *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(71):35420-447. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.105>
- Liu R, Jia Q, Zhang B, Lai Z, Chen L. Protective coatings for metal bipolar plates of fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(54):22915-37. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.078>
- Wu S, Yang W, Yan H, Zuo X, Cao Z, Li H, et al. A review of modified metal bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. *International journal of hydrogen energy*. 2021;46(12):8672-701. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.074>
- Song Y, Zhang C, Ling CY, Han M, Yong RY, Sun D, et al. Review on current research of materials, fabrication and application for bipolar plate in proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(54):29832-47. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.231>
- Pedapati PR, Dhanushkodi SR, Chidambaram RK, Taler D, Sobota T, Taler J. Design and Manufacturing Challenges in PEMFC Flow Fields-A Review. *Energies*. 2024;17(14):3499. <https://doi.org/10.3390/en17143499>
- Daud WRW, Rosli RE, Majlan EH, Hamid SAA, Mohamed R, Husaini T. PEM fuel cell system control: A review. *Renewable Energy*. 2017;113:620-38. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.027>
- Marappan M, Palaniswamy K, Velumani T, Chul KB, Velayutham R, Shivakumar P, et al. Performance Studies of Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Different Flow Field Designs – Review. *The Chemical Record*. 2021;21(4):663-714. <https://doi.org/10.1002/tcr.202000138>
- Bunyan ST, Dhahad HA, Khudhur DS, Yusaf T. The Effect of Flow Field Design Parameters on the Performance of PEMFC: A Review. *Sustainability*. 2023;15(13):10389. <https://doi.org/10.3390/su151310389>
- Arif M, Cheung S, Andrews J. Numerical investigation of effects of different flow channel configurations on the 100 cm² PEM fuel cell performance under different operating conditions. *Catalysis Today*. 2021;1:397-399. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.07.016>
- Shen J, Tu Z, Chan SH. Evaluation criterion of different flow field patterns in a proton exchange membrane fuel cell. *Energy conversion and management*. 2020;213:112841. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112841>
- Cai G, Liang Y, Liu Z, Liu W. Design and optimization of bio-inspired wave-like channel for a PEM fuel cell applying genetic algorithm. *Energy*. 2020;192:116670. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116670>
- Suárez C, Iranzo A, Toharias B, Rosa F. Experimental and numerical investigation on the design of a bioinspired PEM fuel cell. *Energy*. 2022;257:124799. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124799>
- Zaffora A, Barbera O, Gallo E, Santamaria M, Giacoppo G. The effect of pin-type flow field plate design on the current distribution in a H₂-fed polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Power Sources*. 2024;616:235129. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235129>
- Al-Okbi Y, Al-murshedi ASN, Nemah MN, Saad HAK. Influence of design anode and cathode channel on (PEMFC) fuel cell performance. *Materials Today: Proceedings*. 2021;42:2177-84. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.302>
- Dang DK, Zhou B. Effects of pin shapes on gas-liquid transport behaviors in PEMFC cathode. *Journal of Power Sources*. 2023;557:232584. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232584>
- Pal V, Karthikeyan P, Anand R. Performance Enhancement of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Pin Type Flow Channel with Porous Inserts. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2015;3(5):1-10. <https://doi.org/10.4236/jpee.2015.35001>

20. Gu H, Peng C, Qian Z, Lv S, Feng J, Luo K, et al. Design and optimization of gas channel with groove baffles for PEMFC using genetic algorithm. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024;227:125543. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125543>
21. Pan W, Chen Z, Chen X, Wang F, Dai G. Analytical and numerical investigation of flow distribution in PEMFC stacks. *Chemical Engineering Journal*. 2022;450:137598. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137598>
22. Hwang W, Sung YE. Recent Developments of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Design. *J Electrochem Sci Technol*. 2023;14(2):120-30. <https://doi.org/10.33961/jecst.2022.00808>
23. Albarbar A, Alrweq M. Design and Fundamental Characteristics of PEM Fuel Cells. In: Albarbar, A., Alrweq, M. (editor). *Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Design, Modelling and Performance Assessment Techniques*. Cham: Springer International Publishing; 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70727-3_3
24. Pandit J, Thompson M, Ekkad SV, Huxtable ST. Effect of pin fin to channel height ratio and pin fin geometry on heat transfer performance for flow in rectangular channels. *International Journal of heat and mass transfer*. 2014;77:359-68. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.030>
25. Kerkoub Y, Benzaoui A, Haddad F, Ziari YK. Channel to rib width ratio influence with various flow field designs on performance of PEM fuel cell. *Energy Conversion and Management*. 2018;174:260-75. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.041>

Editor:

Alberto Julio Rodríguez Piñeiro.

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Brian J. Moya.

Participó en el diseño de la investigación, el desarrollo del modelo geométrico y la configuración de los parámetros experimentales. Realizó las simulaciones CFD y el análisis de los resultados obtenidos. Así como, trabajó además en la redacción, revisión crítica y aprobación del trabajo final.

Marcelino Rivas Santana.

Supervisó el enfoque metodológico general y validó el diseño experimental. Contribuyó al análisis estadístico, a la interpretación de resultados y a la discusión técnica. Participó en las simulaciones CFD, trabajó además en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Leandro González Rodríguez.

Asesoró en el uso del software ANSYS Fluent y en los procedimientos de mallado. Apoyó la validación numérica y la estructuración de los resultados obtenidos, trabajó además en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Raúl Mario del Toro Matamoras.

Contribuyó en el análisis comparativo de los diseños geométricos y en la formulación del enfoque multiobjetivo mediante el método de Taguchi-Gris, trabajó además en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.