VOLUMEN 28
Verano de la Ciencia XXIX
ISSN 2395-9797
www.jóvenesenlaciencia.ugto.mx

Analysis and Simulation of a Proton Exchange Membrane Type Fuel Cell (PEMFC) with Novel Channels

Análisis y simulación de una Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC) con canales novedosos

Dr. Hernández-Guerrero Abel[1], Gallegos-Zavala Erick Abel[1], Saavedra-Solís Víctor Manuel[1], Navarro-Ramirez Edwin Jacob[1], Rodríguez-Camarillo María Andrea[1], Alonso-Hernández Arlette Alejandra[1]

abel@ugto.mx[1], vm.saavedrasolis@ugto,mx[1], ea.gallegoszavala@ugto.mx[1], ej.navarroramirez@ugto.mx[1], ma.rodriguezcamarillo@ugto.mx[1]

[1] División de Ingenierías Campus Irapuato–Salamanca

Resumen

Para mejorar el rendimiento de las Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC), se deben de diseñar y probar nuevos conjuntos de placas bipolares debido al impacto que tienen en la distribución de los gases reactivos, la presión, la densidad de corriente y la temperatura, así como en la gestión del calor y el agua generados durante la operación. En este artículo, se presenta la propuesta de un innovador diseño del campo de flujo, al cual se le realizan dos modificaciones en la media del espesor (1.5 y 1.75 mm) y una en el ancho del canal de flujo (1.2 mm) para ser evaluadas con una configuración convencional de un multiserpentín, utilizando el método de dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD por sus siglas en inglés). Para llevar a cabo esta comparación, se resuelve el conjunto de ecuaciones que abarca desde continuidad, momento, energía, transporte de especies hasta reacciones electroquímicas empleando el algoritmo SIMPLE como método de solución. De acuerdo con los resultados obtenidos, se muestra que las caídas de presión fueron menores con la modificación de altura del canal de 1.5 mm, con una diferencia aproximada del 14.48% para el ánodo y 14.77% para el cátodo en comparación con las caídas de presión del multiserpentín. En conclusión, los resultados indican que el campo de flujo propuesto tiene un mejor rendimiento en comparación con la geometría convencional.

Palabras clave: PEMFC; CFD; Placas Bipolares; Campo de Flujo.

Introducción

En la actualidad, uno de los principales retos en la generación de energía es disminuir el uso de los recursos naturales y/o recursos no renovables, así como reducir la contaminación ambiental. Durante mucho tiempo, la energía mundial se ha producido por la combustión de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural), los cuales liberan energía en forma de calor y gases contaminantes como el dióxido de carbono (CO2), monóxido de carbono (CO) y otros gases, lo que los convierte en los principales responsables del calentamiento global y del cambio climático. Esto ha provocado que la temperatura media terrestre haya aumentado más de medio grado centígrado en los últimos diez años (+1.72º C respecto a la era preindustrial, ver Figura 1), comparado con la primera década del milenio (1.22º C), y con ello fenómenos como las lluvias ácidas y entre otros.

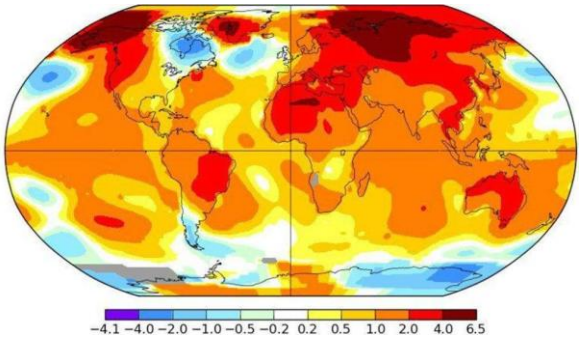


Figura 1. Aumento de temperatura 2024.

ISSN 2395-9797
www. jóvenesenlaciencia.ugto.mx

Debido a la alta demanda de combustibles fósiles y su alta contaminación, como se puede ver en la Figura 2, se buscan tecnologías alternativas para la producción de energía, como las celdas de combustible, las cuales han recibido una gran atención por su alto rendimiento y su capacidad de suministrar energía limpia y sin generación de contaminantes, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad ambiental y la seguridad energética a largo plazo.

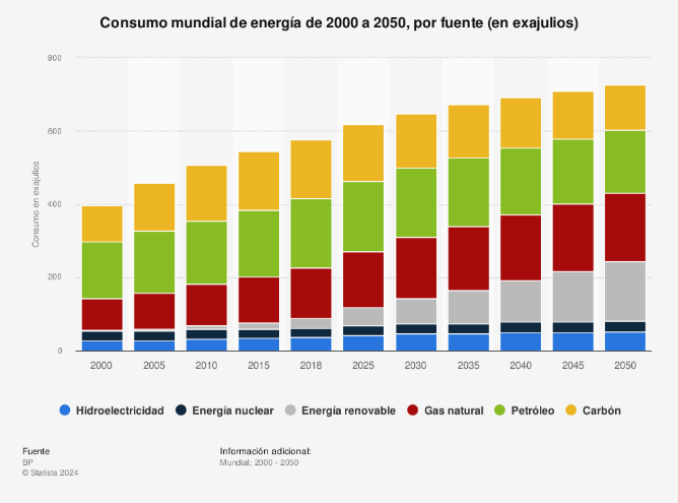


Figura 2. Consumo mundial de energía por tipo de fuente.

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de un combustible (generalmente hidrógeno) y un oxidante (generalmente oxígeno) en electricidad, agua y calor. Tienen una vida útil que puede variar de 5,000 a 40,000 horas dependiendo del tipo y la aplicación, y su eficiencia ronda entre el 40-60% en la conversión de energía química a electricidad, y cuando se utiliza el calor generado en aplicaciones combinadas de calor y energía (CHP), la eficiencia total puede superar el 80%. En la Tabla 1 se muestra la clasificación de las celdas de combustible según el electrolito empleado que depende de su aplicación, potencia, tiempo de vida, eficiencia, entre otros.

Tabla 1. *Tipos de celdas de combustible y sus principales características de operación*

Parámetro	AFC	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC
Temperatura	$60-90$	$160-220$	$50-80$	$600-700$	$800-1000$
Densidad de potencia	$100-200$	200	350	100	240
Eficiencia	$40-60$	55	$45-60$	$60-65$	$55-65$
Tiempo de vida	$>10{,}000$	$>40{,}000$	$>40{,}000$	$>40{,}000$	$>40{,}000$
Área de aplicación	Espacial, móvil	Distribución	Portable, móvil y estacionaria	Distribución y generación	Base de carga, generación

Además, las celdas de combustible se pueden emplear como fuente segura de energía eléctrica en sistemas de alimentación ininterrumpida. La Tabla 2, muestra una comparación general entre los sistemas de celdas de combustible y otros sistemas de generación de energía. De acuerdo a la Tabla 1, se puede observar que el rendimiento más alto se obtiene en los sistemas de celdas de combustible en comparación con los sistemas convencionales de distribución de energía; tienen un diseño simple y también un funcionamiento confiable. Además, con el uso del hidrógeno como reactivo, estos sistemas resultan amigables con el medio ambiente produciendo energía limpia y de forma silenciosa [1].

Tabla 2. *Tipos de celdas de combustible y sus principales características de operación*

	Motor alternativo: diesel	Generador de turbina	Fotovoltaica	Turbina de viento	Celda de combustible
Rango de capacidad	500 kW – 50 MW	500 kW – 5 MW	1 kW – 1 MW	10 kW – 1 kW	200 kW – 2 MW
Eficiencia	35%	29 - 42%	6 – 19%	25%	40 – 85%
Costo de capital ($/kW)	200 - 350	450 - 870	6600	1000	1500-3000
Costo de operación y mantenimiento ($/kW)	0.005 - 0.015	0.005 - 0.0065	0.001 - 0.004	0.01	0.0019 - 0.0153

Ha surgido un fuerte interés en el desarrollo e implementación de las celdas de combustible tipo PEM ya que tienen una variedad de aplicaciones, desde pequeños equipos electrónicos hasta sistemas de energía para edificios y vehículos. Con un diseño adecuado y un mantenimiento regular, las PEMFC pueden tener una larga vida útil y ofrecer un rendimiento constante a lo largo del tiempo. Esta es una opción atractiva para una variedad de aplicaciones, especialmente en el contexto de la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles (ver Figura 3).

Las investigaciones se han concentrado tanto en el ámbito experimental como en el de simulación para la mejora de la optimización, producción y el desempeño en general de las celdas de combustible. Debido a que realizar este tipo de experimentación conlleva gastos considerables, se opta por seguir realizando análisis numéricos que ayuden a la mejora del desempeño.

Existen diferentes factores que determinan e influyen en el rendimiento de una celda de combustible en general, los cuales se clasifican principalmente en condiciones de operación como el transporte de especies, la distribución del agua, la cinética electroquímica, las fugas de los fluidos y la presión en general. Si hablamos de un stack, el cual es una pila de una celda de combustible que se compone de múltiples celdas individuales apiladas juntas para aumentar la potencia de salida, debe contar con placas bipolares bien diseñadas para evitar una mala distribución de los fluidos, puntos calientes en el electrolito, densidades de corriente inestables y hasta la destrucción total de la celda.

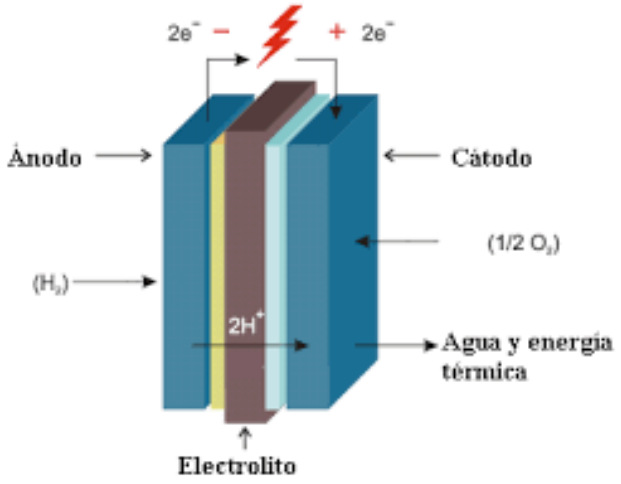


Figura 3. Configuración de una PEMFC.

En este artículo se estudian y discuten diseños de geometrías de las placas monopolares para buscar optimizar y mejorar el rendimiento de una celda de combustible mediante la modificación del campo de flujo.

Diseño de canales de flujo

El rendimiento de una celda de combustible de tipo PEM está relacionada a diversos factores como lo son las condiciones de operación y los fenómenos de transporte dentro de la celda, sin embargo, parámetros geométricos como un buen diseño en los canales de distribución de flujo permiten un acercamiento preciso para garantizar una mejora en su eficiencia.

Las placas bipolares presentadas a continuación han sido diseñadas con el objetivo de observar el comportamiento en la distribución de las especies buscando que sea homogénea y que no se produzcan estancamientos de agua, no obstante, se pretende que los gases reactivos permanezcan el tiempo suficiente para producir las reacciones electroquímicas necesarias. Además, se realiza una comparación con una geometría convencional de tipo serpentín. (ver Figura 4-6).

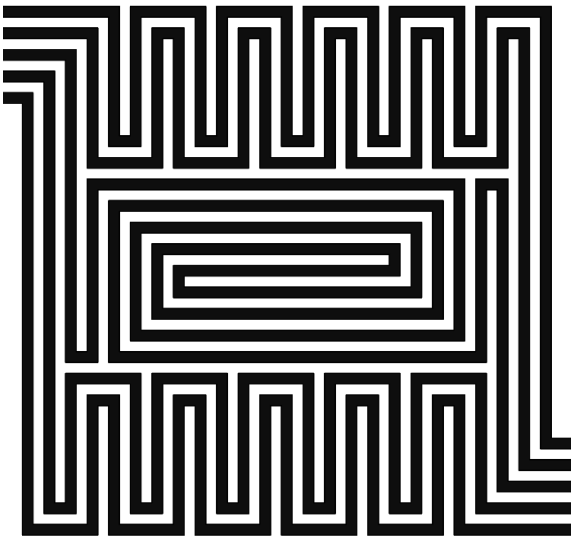


Figura 4. Geometría propuesta

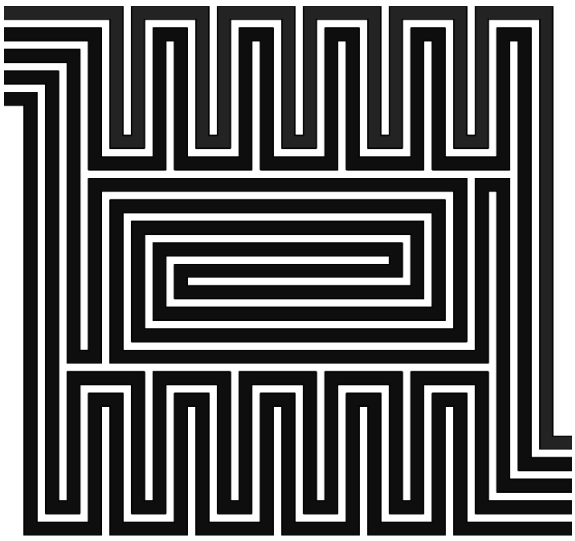


Figura 5. Geometría propuesta con modificación en el ancho del canal.

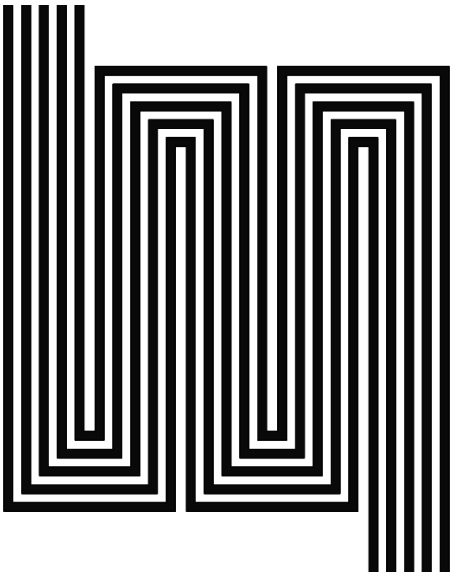


Figura 6. Comparación multiserpentín.

Parámetros de diseño

Los parámetros geométricos utilizados para cada una de las celdas de combustible se muestran en las tablas posteriores (ver Tabla 2-3), además, se presenta un diagrama para visualizar la secuencia general de los componentes (ver Figura 7). Así mismo, posterior a la propuesta, se han realizado modificaciones a la geometría inicial del canal para observar cómo distan los resultados y su error; los parámetros geométricos de dichas modificaciones se presentan paralelamente.

Tabla 2. *Parámetros de diseño utilizados para la geometría propuesta*

Descripción	Unidades	Valor
Ancho de la celda	mm	49.000
Largo de la celda	mm	49.000
Espesor de canal de flujo	mm	1.000
Espesor de capa de difusión de gas (GDL)	mm	0.500
Espesor de catalizador (CL)	mm	0.025
Espesor de colector de corriente	mm	1.500
Espesor de membrana	mm	0.128

Tabla 3. *Parámetros de diseño utilizados para modificar la geometría propuesta*

Casos	Unidades	Valor
Caso 1: Modificación del espesor de canal de flujo	mm	1.500
Caso 2: Modificación del espesor de canal de flujo	mm	1.750
Caso 3: Modificación del ancho de canal de flujo	mm	1.200

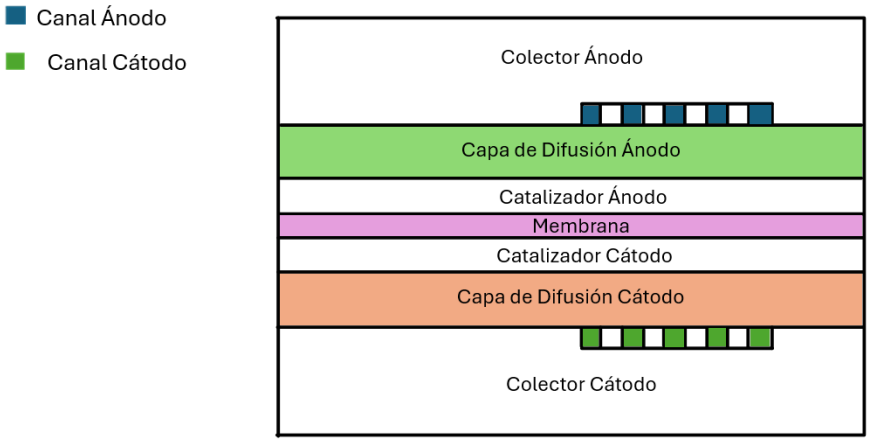


Figura 7. Vista lateral de los componentes del ensamble de la PEMFC.

Definición del modelo

Para realizar el análisis numérico de una celda de combustible es necesario establecer y conocer tanto las suposiciones, como las ecuaciones gobernantes, las condiciones de operación y los parámetros o propiedades electroquímicas características de la celda para llevar a cabo el modelo numérico.

Suposiciones

- Los gases reactantes tienen propiedades de los gases ideales.
- El flujo es incompresible.
- Hay flujo laminar en los canales de distribución de gases.
- La capa de difusión de gas (GDL) y el catalizador son homogéneos e isotrópicos.

Nomenclatura

C_p	Calor específico promedio de la mezcla, $\frac{J}{kg \cdot K}$
D^{eff}	Función de porosidad
k	Conductividad térmica, $\frac{W}{m \cdot K}$
${k_m}^{eff}$	Conductividad eléctrica en fase electrolito, $\frac{S}{cm}$
${k_s}^{eff}$	Conductividad eléctrica en fase sólida, $\frac{S}{cm}$
p	Presión del fluido, $\frac{N}{m^2}$
S_e	Fuente de energía
S_m	Fuentes adicionales de masa
S_M	Fuerzas externas, N
$S_{s,i}$	Especies adicionales
S_ϕ	Corriente volumétrica transferida
T	Temperatura, K
$\vec{u}$	Vector velocidad, $\frac{m}{s}$
x_i	Fracción másica del gas

Símbolos

ε	Porosidad del medio poroso
μ_{mix}	Viscosidad media de la mezcla, $\frac{kg}{m \cdot s}$
ϕ_s	Potencial de fase electrolito, V
ϕ_m	Potencial de fase sólida, V
ρ	Densidad, $\frac{kg}{m^3}$
∇	Operador, $\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy} + \frac{d}{dz}$

Ecuaciones gobernantes

- Conservación de masa

Esta ecuación asegura que la masa de los reactivos consumidos y los productos generados en la celda se mantienen constantes en cualquier proceso cerrado. Es válida para todos los procesos, tales como la difusión, el cambio de fase y las reacciones electroquímicas.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (p\vec{u}) = S_m \quad (1)$$

- Conservación de momento

Describe cómo interactúan las fuerzas y flujos de masa dentro de la PEMFC.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}\vec{u} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}) = -\nabla \mathrm{p} + \nabla \cdot (\mu_{mix} \cdot \nabla \vec{u}) + S_m \quad (2)$$

- Conservación de energía

Dadas las aportaciones de calor generadas por las reacciones electroquímicas dentro de la celda, es indispensable considerar cambios en la temperatura resolviendo la ecuación de la energía.

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_{eff} \cdot (\vec{u} \cdot \nabla \mathrm{T}) = \nabla \cdot (k_{eff} \cdot \nabla T) + S_e \quad (3)$$

- Ecuación de conservación de especies

De modo similar que, con la ecuación de la energía, derivado de las reacciones electroquímicas generadas a través de la celda, resulta necesario resolver la ecuación de las especies para entender cómo es la distribución de los gases reactantes.

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho x_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} \cdot \varepsilon \rho x_i) = (\nabla \cdot \rho {D_i}^{eff} \nabla x_i) + S_{s,i} \quad (4)$$

- Ecuación de conservación de carga

Describe la distribución de potencial eléctrico a los componentes de la celda como capas de difusión y membrana.

$$\nabla \cdot ({k_s}^{eff} \cdot \nabla \phi_s) = S_{\phi_s} \quad \rightarrow electrones \quad (5)$$
$$\nabla \cdot ({k_m}^{eff} \cdot \nabla \phi_m) = S_{\mathrm{m}_s} \quad \rightarrow protones \quad (6)$$

Condiciones de operación

- Gases 100% puros de hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2).
- Humedad relativa del 100% a la entrada de los canales.
- Temperatura constante de 343 K en toda la celda.
- Presión de operación de 2 atm.
- Razón de flujo estequiométrico del ánodo de 1.5.
- Razón de flujo estequiométrico del cátodo de 2.0.
- Voltaje de la celda a circuito abierto de 0.95 V.

Parámetros estequiométricos

En las tablas posteriores (ver Tablas 4-6) se presentan los parámetros electroquímicos de los componentes de la celda, de los electrodos y de los gases.

Tabla 4. *Parámetros electroquímicos de los componentes*

Parámetro	Unidades	Valor
Conductividad eléctrica del colector	$\frac{1}{\Omega m}$	125×10^7
Conductividad eléctrica de la capa de difusión	$\frac{1}{\Omega m}$	53
Conductividad eléctrica del catalizador	$\frac{1}{\Omega m}$	53
Porosidad de la capa de difusión	–	0.4
Porosidad del catalizador	–	0.112

Tabla 5. *Parámetros de los electrodos*

Parámetro	Unidades	Valor
Exponente de concentración en el ánodo	–	0.5
Exponente de concentración en el cátodo	–	1
Coeficiente de intercambio del ánodo	–	2
Coeficiente de intercambio del cátodo	–	1
Densidad de corriente de referencia del ánodo	A/cm^2	25×10^3
Densidad de corriente de referencia del cátodo	A/cm^2	7.5

Tabla 6. *Parámetros de los gases*

Parámetro	Unidades	Valor
Difusividad de referencia del hidrógeno, H_2	m^2/s	1.1×10^{-4}
Difusividad de referencia del oxígeno, O_2	m^2/s	3.2×10^{-5}
Difusividad de referencia del agua, H_2	m^2/s	7.35×10^{-5}
Difusividad de referencia del nitrógeno, N_2	m^2/s	8×10^{-5}

Resultados

Caída de presión

De acuerdo con los contornos de presión obtenidos para los canales del ánodo y el cátodo, se observa que la presión máxima se encuentra en la salida de los canales y la mínima en la entrada debido a las condiciones de operación aplicadas a la celda de combustible. La geometría multiserpentín mostró caídas de presión en el ánodo de 454.52 Pa (ver Figura 8a) y en el cátodo de 832.52 Pa (ver Figura 9a) aproximadamente. La geometría propuesta con una altura de canal de 1 mm arrojó una caída de presión máxima en un canal del ánodo de 651.9 Pa (ver Figura 8b) y para el cátodo la caída de presión se mostró más uniforme en todos los canales (ver Figura 9b) siendo de 1201.3 Pa, mayor al caso del multiserpentín.

La siguiente modificación, con una altura de canal de 1.5 mm, dio como resultado una caída de presión de 388.71 Pa para el ánodo (ver Figura 8c) y 709.59 Pa para el cátodo (ver Figura 9c), siendo menor en comparación con la caída de presión en el ánodo del multiserpentín y muy similar a la del cátodo. Por otro lado, la modificación de altura a 1.75 mm resultó en una caída de presión máxima de 322.9 Pa para el ánodo (ver Figura 8d) y 586.65 Pa en el cátodo (ver Figura 9d), mejorando considerablemente la caída de presión en ambos contornos. Finalmente, la modificación del ancho del canal dio como resultado una caída de presión máxima de 520.32 Pa en el ánodo (ver Figura 8e) y 955.46 Pa en el cátodo (ver Figura 9e), valores que no son los mejores pero que se encuentran dentro del rango de las otras modificaciones.

Fracción másica de agua

Los contornos de fracción de masa de agua obtenidos para la capa de difusión de gas (GDL) del ánodo en la geometría multiserpentín muestran valores que oscilan desde 0.58 como mínimo hasta 0.83 como máximo (ver Figura 10a). Las mayores concentraciones de agua se localizan fuera del área activa de los canales. En el GDL del ánodo, tanto en la geometría propuesta como en sus modificaciones de altura y ancho del canal de flujo (ver Figuras 10b-e) mantienen una fracción de masa de agua de 0.58 en toda la superficie, a excepción de la última modificación en la cual a la salida y en algunas secciones con cambio en la dirección del flujo se observan mayores concentraciones de agua con valores de 0.65.

Para la capa de difusión de gas (GDL) del cátodo, los valores de masa de agua para todos los casos varían de 0.62 a 0.77 (ver Figuras 11a-e). En la geometría multiserpentín la mayor concentración se encuentra en el contorno que rodea el área activa de los canales (ver Figura 11a). En cambio, en la geometría propuesta y sus modificaciones, la mayor concentración se localiza en las esquinas superior e inferior derecha, aunque generalmente también se encuentra fuera del área activa de los canales. Además, en el área de los canales, todas las geometrías presentan una generación similar de fracción de masa de agua, siendo menor en la entrada y mayor en la salida.

Discusión de resultados.

Los resultados de las simulaciones muestran que la modificación de altura del canal de 1.5 mm presenta una menor caída de presión comparada con el diseño clásico de multiserpentín y otras modificaciones. Esta reducción en la caída de presión se debe a una mejor distribución de los gases reactivos y una menor resistencia al flujo dentro de los canales modificados. Específicamente, la mayor altura del canal permite un mayor espacio para el flujo de gases reduciendo la fricción y, por lo tanto, la resistencia al movimiento del fluido. Este efecto se traduce en una menor presión necesaria para mantener el flujo, mejorando así la eficiencia de la celda de combustible.

En términos de rendimiento, la menor caída de presión implica una mayor eficiencia en la operación de la celda de combustible ya que se requiere menos energía para mantener el flujo de gases a través del sistema. La optimización en la distribución de gases también contribuye a una reacción electroquímica más uniforme y eficiente, mejorando así la producción de energía. La geometría multiserpentín con su diseño más complejo, crea zonas de alta resistencia al flujo y una distribución menos uniforme de los gases reactivos, lo que resulta en un rendimiento menos eficiente.

En cuanto a la fracción másica de agua, la distribución de agua en la capa de difusión de gas es crucial para el rendimiento de la celda de combustible. Una distribución uniforme del agua asegura que la membrana de intercambio protónico (PEM) se mantenga hidratada, lo cual es esencial para su conductividad iónica. Sin embargo, un exceso de agua puede causar inundación, bloqueando los poros del GDL y obstruyendo el paso de gases reactivos, lo que reduce la eficiencia de la celda. Las modificaciones en el diseño del canal, especialmente la altura de 1.5 mm, mostraron una distribución más uniforme del agua, minimizando tanto la sequedad como la inundación y mejorando así el rendimiento general.

Conclusiones

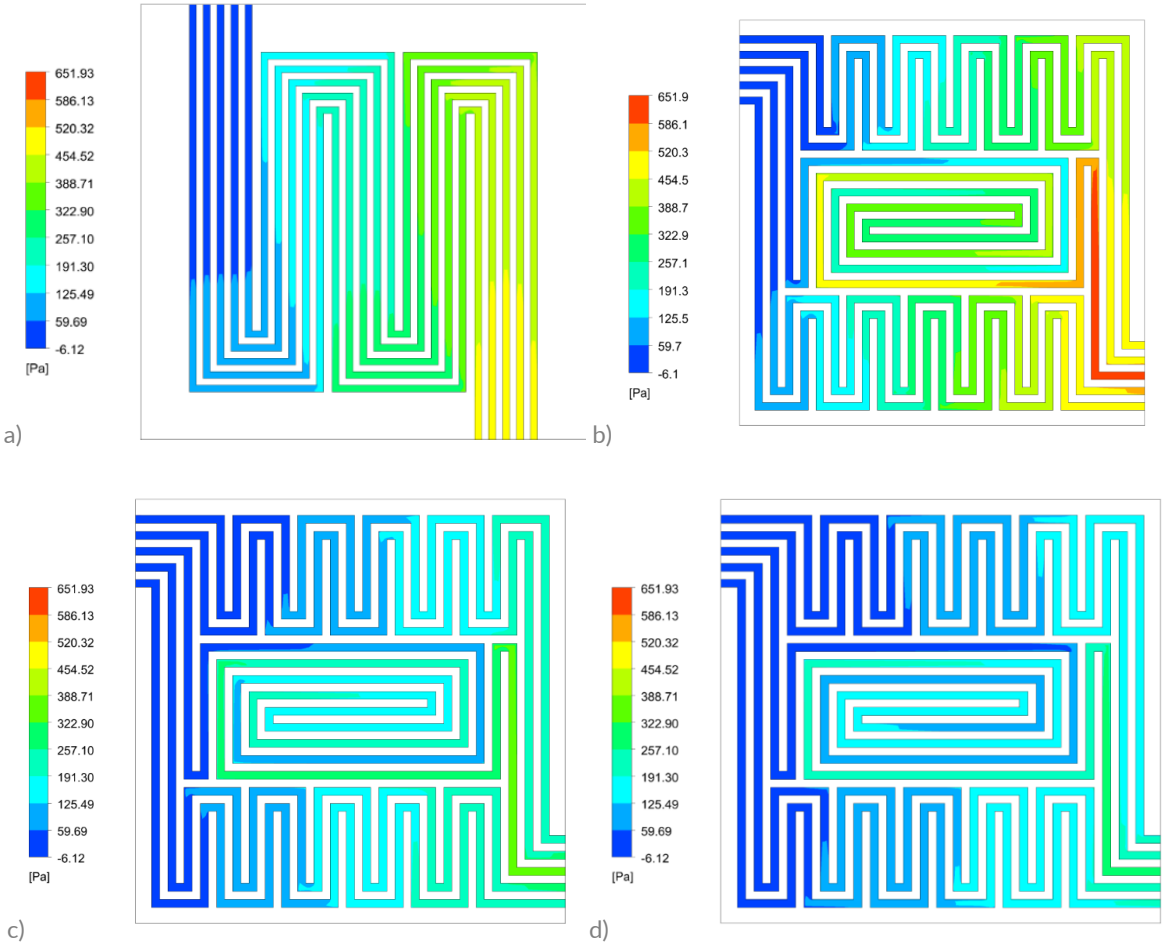
En este estudio se analizó el diseño de un campo de flujo propuesto con diferentes modificaciones tanto en altura como en el ancho del canal para las placas bipolares de una celda de combustible de tipo membrana de intercambio protónico. Los resultados obtenidos indican que:

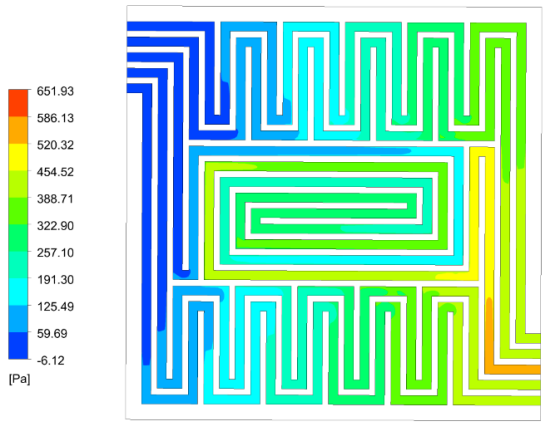
Como se pueden ver en la Figura 8, las caídas de presión fueron significativamente menores en la modificación de altura del canal a 1.5 mm en comparación con las caídas de presión del diseño multiserpentín y otras modificaciones. Esta reducción en la caída de presión se atribuye a una mejor distribución del flujo de gases y una menor resistencia hidráulica dentro de los canales. En particular, la menor fricción y resistencia al flujo en la geometría de 1.5 mm permiten un transporte más eficiente de los reactivos, mejorando la eficiencia global de la celda de combustible. La caída de presión en esta configuración mostró una reducción significativa, con un margen de diferencia de aproximadamente 14.48% para el ánodo y 14.77% para el cátodo en comparación con el diseño multiserpentín.

Las fracciones de masa de agua fueron similares para todas las geometrías analizadas, sin embargo, los resultados sugieren que la modificación del ancho del canal produce menor estancamiento de agua en comparación con las otras modificaciones. Este comportamiento se puede explicar por la mejor evacuación del agua generada en la reacción electroquímica, evitando la saturación de la capa de difusión de gas (GDL) y, por lo tanto, manteniendo una mayor eficiencia operativa. Al comparar con la geometría multiserpentín, se observó un margen de diferencia del 26.51% para el valor máximo y 1.72% para el valor mínimo en el ánodo, con valores similares obtenidos para el cátodo.

Estos hallazgos son consistentes con la teoría de que la geometría del canal influye directamente en la dinámica del flujo y la distribución de reactivos dentro de la celda de combustible. Las modificaciones propuestas, en particular la geometría con altura de canal de 1.5 mm, demostraron ser eficaces en mejorar la distribución del flujo y reducir la resistencia, lo que resulta en una mayor eficiencia y mejor gestión del agua. Estos resultados subrayan la importancia de la optimización geométrica en el diseño de sistemas de flujo para maximizar la eficiencia y la eficacia de las celdas de combustible, proporcionando una guía útil para futuros desarrollos en esta área.

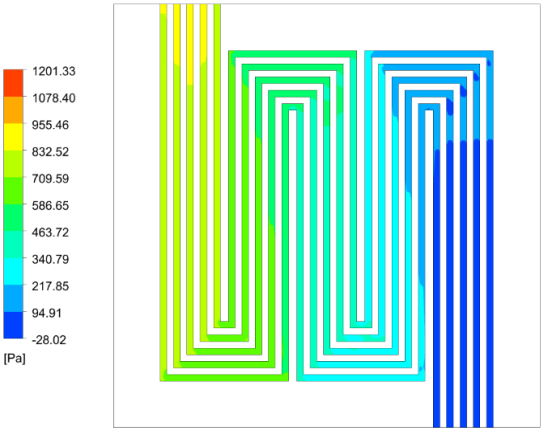
Además, la correcta distribución de los gases reactivos y la gestión efectiva del agua son factores clave que contribuyen a la mejora del rendimiento y la durabilidad de las celdas de combustible. La distribución uniforme del agua evita problemas de inundación en la membrana de intercambio protónico, lo cual es crucial para mantener su conductividad iónica y asegurar un rendimiento óptimo.



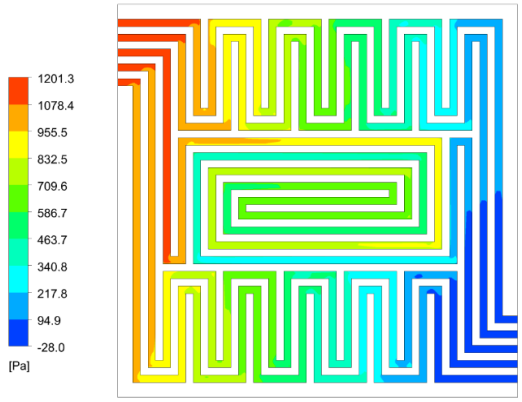


e)

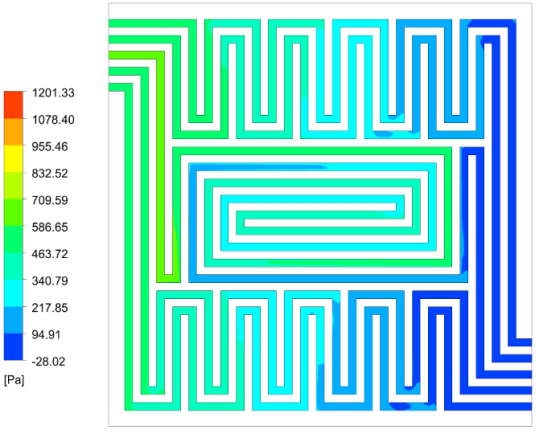
Figura 8. Presión en el ánodo a) Multiserpentín, b) Propuesta Altura 1 mm, c) Propuesta Altura 1.5 mm, d) Propuesta Altura 1.75 mm y e) Propuesta Ancho.



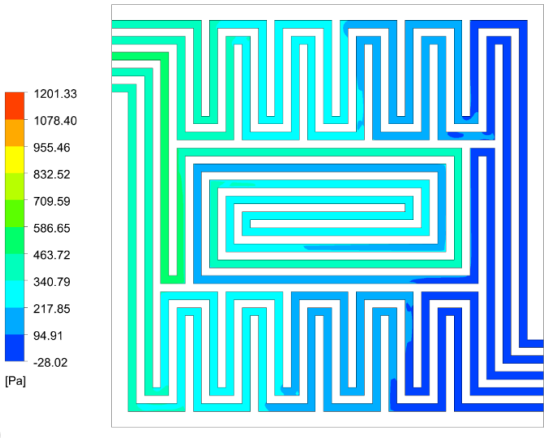
a)



b)

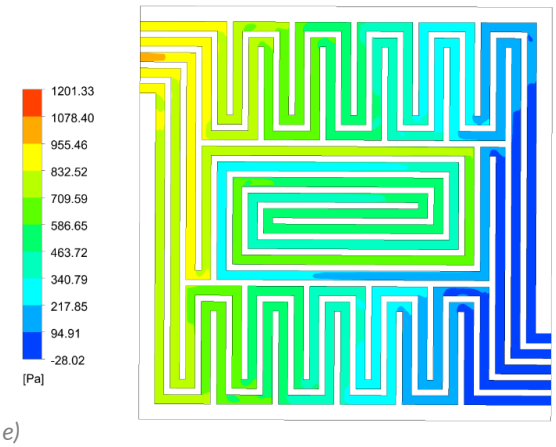


c)



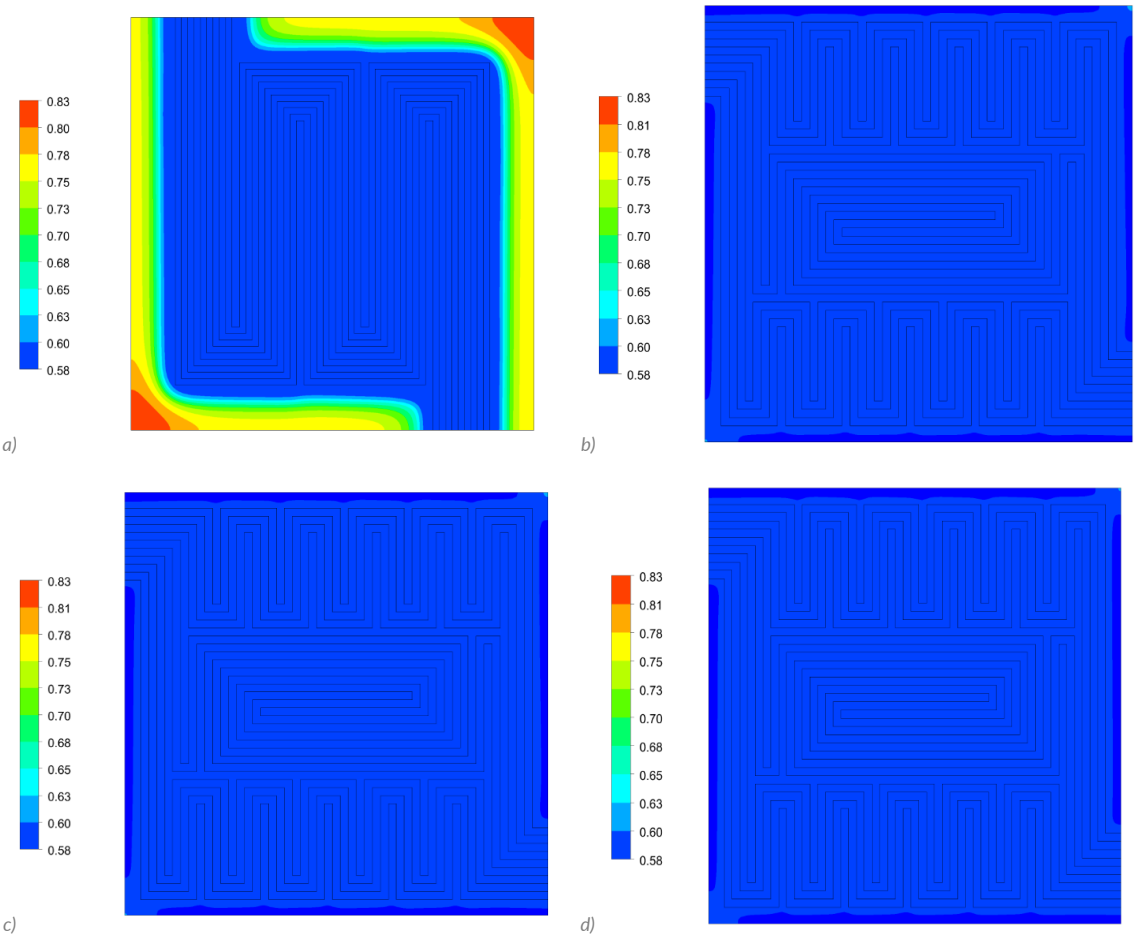
d)

VOLUMEN 28
Verano de la Ciencia XXIX
ISSN 2395-9797
www. jóvenesenlaciencia.ugto.mx



e)

Figura 9. Presión en el cátodo a) Multiserpentín, b) Propuesta Altura 1 mm, c) Propuesta Altura 1.5 mm, d) Propuesta Altura 1.75 mm y e) Propuesta Ancho.



VOLUMEN 28
Verano de la Ciencia XXIX
ISSN 2395-9797
www. jóvenesenlaciencia.ugto.mx

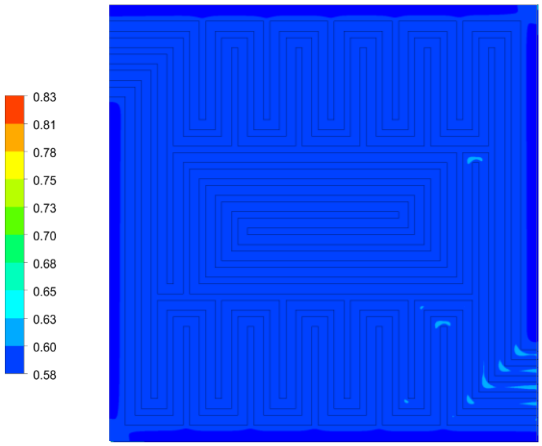
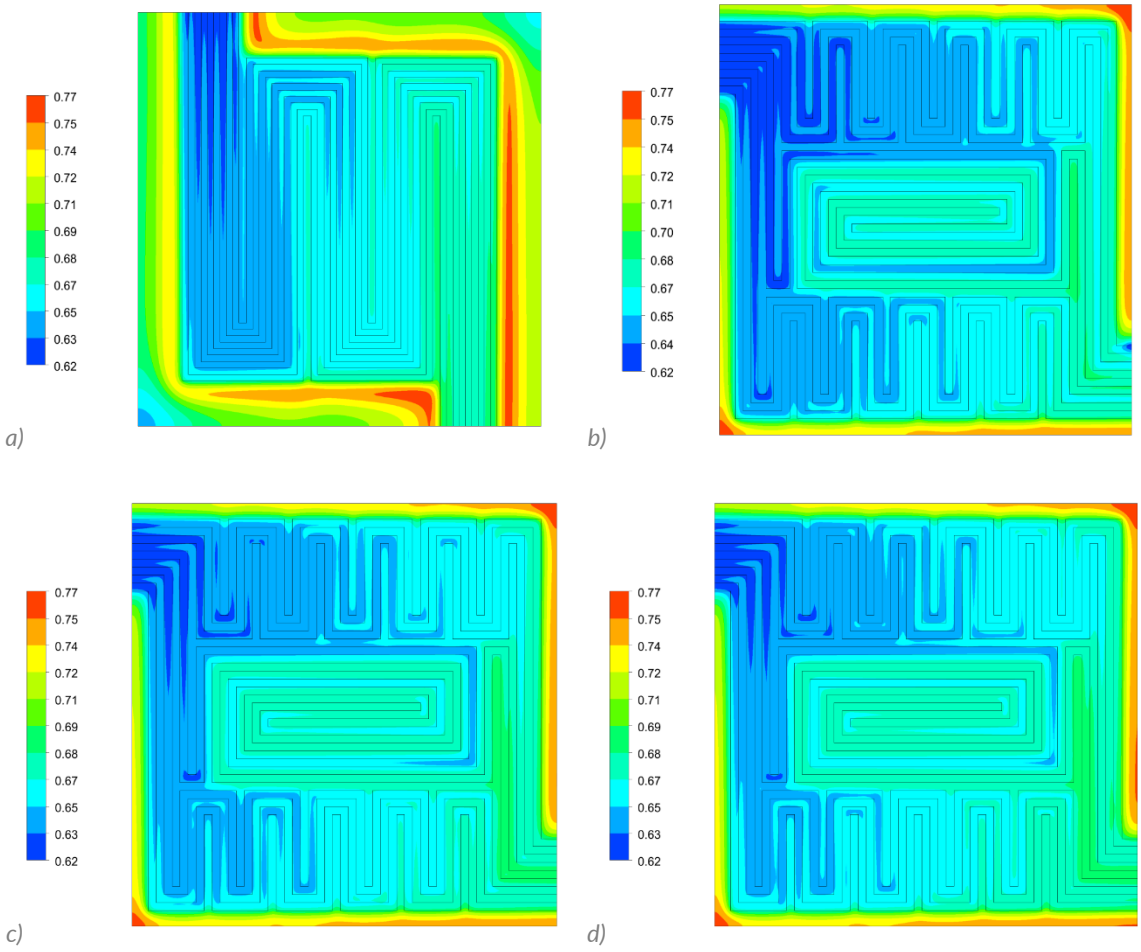
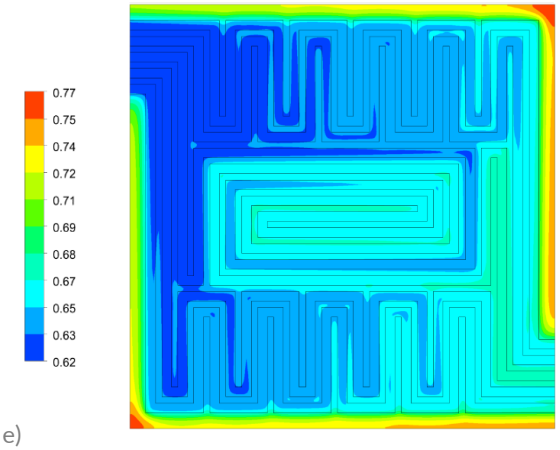


Figura 10. Fracción másica en GDL ánodo a) Multiserpentín, b) Propuesta Altura 1 mm, c) Propuesta Altura 1.5 mm, d) Propuesta Altura 1.75 mm y e) Propuesta Ancho.





e)

Figura 11. Fracción másica en GDL cátodo a) Multiserpentín, b) Propuesta Altura 1 mm, c) Propuesta Altura 1.5 mm, d) Propuesta Altura 1.75 mm y e) Propuesta Ancho

En la Figura 12 se muestra la curva de polarización de cada una de las celdas de combustible anteriormente mostradas; esta curva muestra la relación entre el potencial eléctrico (voltaje de celda [V]), densidad de corriente (A/cm^2) y densidad de potencia (W/cm^2) de cada de las celdas de combustible.

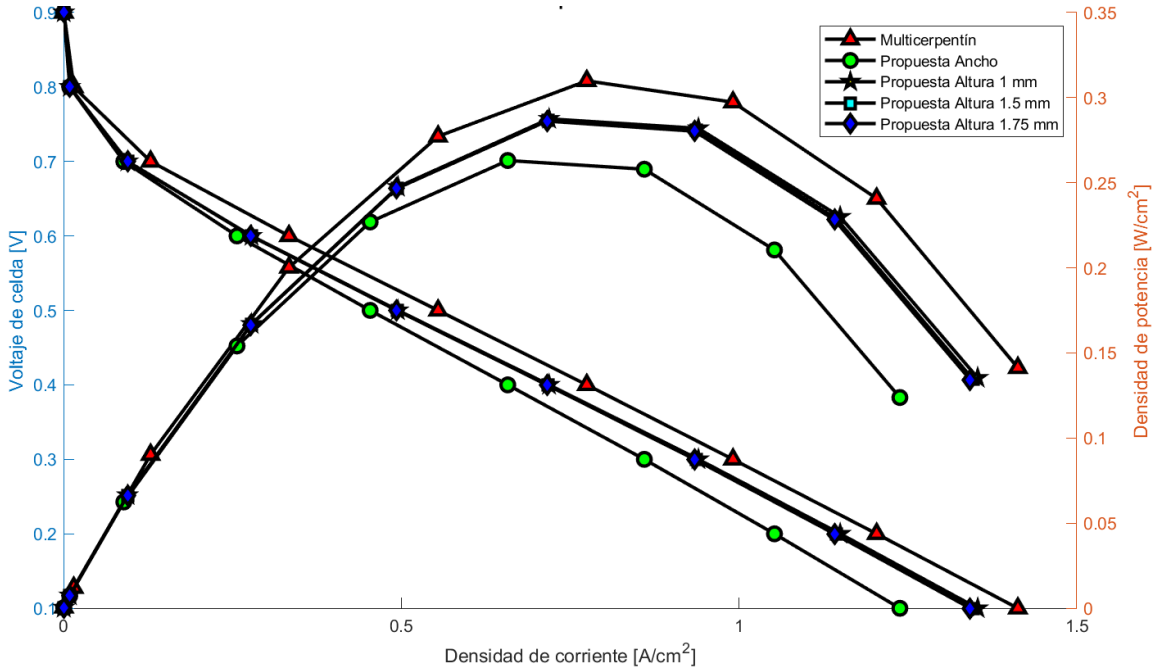


Figura 12. Curva de polarización.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Guanajuato por la creación del programa Verano en la Ciencia que permite a los estudiantes desarrollar habilidades, conocimiento y experiencia en trabajos de investigación de este nivel. Y agradecen al asesor, Dr. Abel Hernández Guerrero, por la confianza para llevar a cabo este proyecto de suma importancia para el futuro de la generación de energía sustentable a través de fuentes amigables con el medio ambiente.

Bibliografía/Referencias

[1] Alvarado-Flores, J. (2013). Estudio comparativo de las diferentes tecnologías de celdas de combustible. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, 52(3), 105-117.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Global Warming of 1.5 °C. IPCC, 2018.

[3] International Energy Agency. (2024). World Energy Outlook 2024.

[4] Environmental Protection Agency. (2024). Climate Change Indicators: Weather and Climate.

[5] Stadistical Review of World Enery 2010, U. S. Energy Information Administration, 2010.

[6] Fierro, J. G. Celdas de combustible. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, CSIC, Madrid.

[7] Li, Xianguo. Principles of Fuel Cells. 2006. New York: Taylor & Francis Group.

[8] Preuster, P., A. Alekseev, and P. Wasserscheid, Hydrogen Storage Technologies for Future Energy Systems. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 2017. 8(1): p. 445-471.

[9] M. Winter and R. J. Brodd, “What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?,” Chemical Reviews, vol. 104, no. 10, pp. 4245–4270, Oct. 2004, DOI: 10.1021/cr020730k.

[10] J. M. Andújar and F. Segura, “Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, no. 9, pp. 2309–2322, Dec. 2009, DOI: 10.1016/j.rser.2009.03.015.

[11] K. Kordesch and J. Oliveira. Fuel cells: the present state of the technology and future applications, with special consideration of the alkaline hydrogen/oxygen (air) systems. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 13, no. 7, pp. 411–427, 1988, DOI: 10.1016/0360-3199(88)90127-9.

[12] Larmine J., Dicks A. Fuel Cell Systems Explained. Second Edition. Wiley (2003).