

Simulación de los Canales de Flujo Inspirado en la Naturaleza para un Stack Tipo PEM

Edwin Alonso Monje* Beatriz E. Graniel García**

* *Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (e-mail: alonso.201116878@gmail.com).*

** *Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (e-mail: beatriz.graniel@correo.buap.mx)*

Resumen

En este trabajo se considera el uso de BP (siglas en inglés: Bipolar Plate) con un modelo de canal de flujo inspirado en la naturaleza para un stack basado en celdas de combustible tipo PEM (siglas en inglés: Proton Membrane Exchange). Se emplean las BP para ahorrar la cantidad de material dentro de un stack.

El modelo empleado es una derivación de la ley de Murray, el cual está basado en el sistema circulatorio biológico y en el consumo mínimo de energía. Dicho modelo se comparará con el modelo paralelo-serpentin.

Se realizan los análisis de simulación para ambos modelos, los cuales son: velocidad, presión y temperatura del gas (oxígeno). Ambos análisis se realizan en la parte del cátodo del stack. Dichos análisis fueron realizados en el software SolidWorks, con el fin de observar que la distribución del gas dentro del stack sea homogénea, así como la disipación de calor mejore y así maximizar el rendimiento del stack.

Keywords: Ley de Murray, Placas Bipolares, Stack, Simulación de Canales.

1. INTRODUCTION

Actualmente, la preocupación en la obtención de energía que depende de los combustibles fósiles ha tenido mayor relevancia, debido a que éstos se están agotando y su utilización provoca un deterioro en el medio ambiente. Esto ha motivado que se tomen en cuenta fuentes alternas de generación de energías como la eólica, la geotérmica, y la solar, ya que ayudan a disminuir el impacto ambiental causado por el uso de los combustibles fósiles. Dentro de las fuentes de generación de energía alternativas se encuentran también las celdas de combustible, las cuales se consideran como una fuente de generación limpia, ya que su único material de desecho es vapor de agua y calor, Spiegel (2007).

Algunos de los beneficios que presenta esta fuente de generación de energía son: el doble de eficientes que los motores de combustión interna, reducción de emisión de contaminantes, acoplamiento a necesidades de suministro, silenciosas, confiables y admiten diversos tipos de combustibles, Kloess et al. (2009).

Las placas bipolares son un componente clave dentro de las celdas tipo PEM, debido a que distribuyen de forma uniforme el combustible y el aire, a su vez conducen la corriente eléctrica de una celda a otra. Por otra parte disipan el calor producido en el área activa y evitan fugas

de los gases Hermann et al. (2005).

Las placas bipolares también contribuyen significativamente al volumen, peso y costo dentro de las celdas tipo PEM. Por lo que se actualmente se desarrollan placas bipolares las cuales aumenten la densidad de potencia para reducir costos y aumentar la potencia Middelman et al. (2003), (Kloess et al., 2009).

Los productos y reactantes dentro de una PEMFC son cruciales ya que afectan el óptimo rendimiento y durabilidad, Por ello el diseño de los canales en las placas bipolares son un factor. La distribución homogénea de la corriente y la temperatura a lo largo de los canales requieren un buen diseño de los canales en la PEMFC Arvay et al. (2013), (Guo et al., 2014).

Celda de combustible tipo PEM

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía producida por medio de una reacción química de oxidación-reducción a energía eléctrica. A diferencia de las baterías, las celdas de combustibles no almacenan energía, por ello la implementación de éstas tienen ventaja sobre las baterías, ya que mantienen un suministro constante de electricidad con respecto al suministro del combustible, Spiegel (2007).

La celda de hidrógeno de intercambio protónico (PEMFC) funciona a partir del suministro de hidrógeno en el ánodo

y oxígeno en el cátodo como se muestra en la Fig. 1. El hidrógeno se distribuye por los canales de flujo y al estar en contacto con el catalizador de platino se separa en protones (H^+) y electrones libres (e^-), los protones pasan a través de la membrana de intercambio protónico y los electrones viajan a través del circuito externo, en el cátodo los electrones y los protones se combinan con el oxígeno del aire para producir vapor de agua y calor. Al arreglo de ánodo-membrana- cátodo se le conoce como ensamble membrana electrodo (MEA), Spiegel (2007). Las reacciones generales son las siguientes:

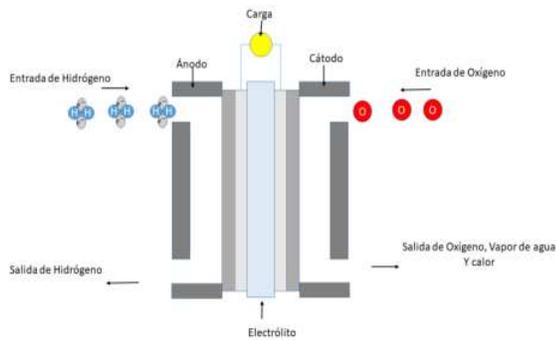
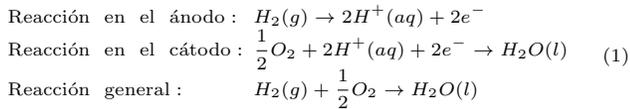


Figura 1. Funcionamiento de una celda de combustible.

El diseño compacto y su capacidad de ser escalable con alta salida de voltaje y potencia, le confiere un amplio rango de aplicaciones que abarcan desde los sistemas portátiles, de transporte y estacionario, Spiegel (2007), Larminie et al. (2003).

Una celda de combustible produce muy poca potencia, por lo que para poder energizar los dispositivos se tiene que realizar un arreglo de celdas a lo que se le conoce como banco de celdas o stack, en donde las celdas se apilan una sobre otra. Los componentes de un stack son similares a los de una celda como se muestra en la Fig. 2, sólo que en este caso las placas son llamadas *placas bipolares*, las cuales tienen la característica de que ambas caras de la placa tienen canales de flujo que se interconectan entre sí. La utilización de placas bipolares reduce la dimensión del stack.

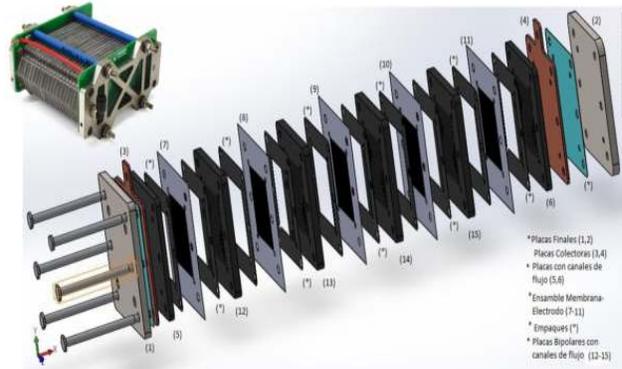


Figura 2. Componentes de un stack tipo PEM.

En el diseño de un stack se deben considerar la potencia máxima que se desea obtener y su aplicación. Ya que con ello se puede cuantificar el material y el número de celdas necesarias para obtener la potencia requerida; considerando que una celda provee un voltaje de aproximadamente 0.6 V o 0.7 V y una densidad de corriente de 300-1000 mA/cm^2 , Spiegel (2007).

Placas Bipolares

En el diseño ideal de una placa bipolar se debe considerar tener una alta eficiencia en la transportación del gas sobre los canales de distribución, debe integrar canales de enfriamiento para remover el calor generado durante la operación, el material debe tener alta conductividad y baja resistencia, así como resistir vibraciones y corrosiones, además de ser ligero y compacto, Ravishankar and Prakash (2014).

Las configuraciones de canales principales utilizadas en las placas bipolares son las de paralelo, serpentin y el espiral o caracol como se muestra en la Fig. 3, cada uno de los modelos presentan ventajas y desventajas tales como pérdidas de presión, acumulaciones de agua entre otras, Li and Sabir (2005).

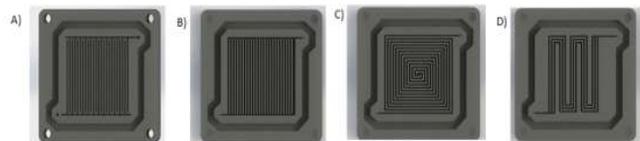


Figura 3. Placas con diversos canales de flujo A) Serpentin, B) Paralelo, C) Caracol, D) Paralelo-Serpentin .

Actualmente, una alternativa a los modelos convencionales de placas distribuidoras de gases son los diseños basados en la naturaleza (ver Fig. 4), los cuales se han estado investigando obteniendo mejores desempeños en las celdas. En éstos nuevos diseños se pretende imitar el comportamiento de la naturaleza en el proceso de fotosíntesis y en la distribución de agua en las hojas,

Kloess et al. (2009), Arvay et al. (2013), Monje and García (2018).

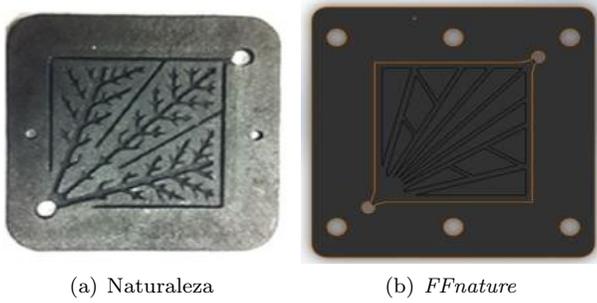


Figura 4. (a) Canales de flujo inspirado en la naturaleza, (b) Canal de flujo *FFnature*

2. LEYES DE MURRAY

Murray determinó que existen dos términos energéticos los cuales contribuyen a mantener el flujo en cualquier sección del canal: (1) la energía requerida para superar la resistencia viscosa en un fluido que obedece a la ley de Poiseville y (2) la energía metabólicamente requerida para mantener el volumen en el canal.

El potencial viscoso requerido por unidad de longitud P_v para superar las pérdidas viscosas, se puede definir como:

$$P_v = \left(\frac{\Delta p}{L} \right) Q \quad (2)$$

El flujo volumétrico se puede encontrar a partir de la fórmula de Hagen-Poiseville

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \mu L} \quad (3)$$

donde μ es la viscosidad dinámica, que es una medida de la resistencia del fluido al flujo. Sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (3) se obtiene:

$$P_v = \frac{8 \mu Q^2}{\pi r^4} \quad (4)$$

De acuerdo con los términos propuestos por Murray, el potencial metabólico requerido por unidad de longitud P_m , puede definirse como:

$$P_m = K_m \pi r^2 \quad (5)$$

donde K_m es una constante metabólica. Por lo tanto, ocupando las ecuaciones (4) y (5), la potencia total requerida para operar el sistema es:

$$P = P_v + P_m = \frac{8 \mu Q^2}{\pi r^4} + K_m \pi r^2 \quad (6)$$

La dimensión óptima del canal que minimiza la potencia se puede encontrar derivando con respecto al radio e igualando a cero la ecuación (6). Para condiciones óptimas la relación volumétrica y el caudal están relacionados con el diámetro óptimo por medio de la siguiente ecuación

$$Q = \frac{\pi}{32} \sqrt{\frac{K_m}{\mu}} d_{opt}^3 = M d_{opt}^3 \quad (7)$$

La relación óptima entre el diámetro principal y los secundarios pueden derivarse utilizando el principio de bifurcación.

$$Q_o = M d_o^3 = Q_{1a} + Q_{1b} + Q_{1c} = M d_{1a}^3 + M d_{1b}^3 + M d_{1c}^3 \quad (8)$$

El procedimiento completo se encuentra en (Monje and García, 2018).

Considerando esta ley se obtuvo el modelo de canal de flujo inspirado en la naturaleza mostrado en la Fig. 4(b).

3. SIMULACIÓN DE LOS MODELOS DE CANAL DE FLUJO EN STACK

Un problema que se tiene en la parte del cátodo es que en las reacciones se genera vapor de agua y ésta puede condensarse apareciendo acumulaciones de agua, afectando el desempeño del stack. Por lo tanto, se decidió evaluar y comparar los resultados obtenidos entre el canal de flujo inspirado en la naturaleza (*FFnature*) y el modelo convencional (Paralelo-Serpentín) mostrados en las Fig. 3 (d) y Fig. 4 (b) respectivamente.

Las pruebas fueron realizadas en el programa de Solid-Works 2015 con su complemento Flow Simulation, el stack cuenta con 5 celdas conectadas en serie con área activa de $5 \times 5 \text{ cm}^2$, los parámetros utilizados se presentan en la Tabla 1. La geometría de los canales de flujo del modelo Paralelo-Serpentín y del modelo *FFnature* son rectangulares, debido a que es la más usada en el diseño de las placas, y las acumulaciones de agua se presentan en las esquinas de la base lo que hace que éstas no tengan contacto con la MEA.

Tabla 1. Parámetros de simulación

Parámetro	Valor	Unidad
Presión	1	atm.
Velocidad	20	m/s
Temperatura	293.2	K
Grafito	C	

3.1 Análisis de Velocidad

Los análisis del stack se realizaron en el cátodo en los modelos Paralelo-Serpentín y el *FFnature*, obteniendo los siguientes resultados:

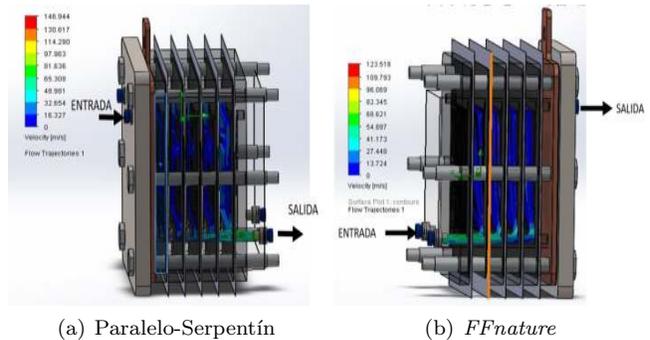


Figura 5. (a) Análisis de distribución de flujo en el modelo Paralelo-Serpentín, (b) Análisis de distribución de flujo en el modelo *FFnature*

En la Fig. 5(a) se muestra el análisis de flujo del modelo Paralelo-Serpentín, en el cual se aprecia que la distribución del flujo se concentra más en la última placa y ésta disminuye conforme se acerca a la entrada del fluido (oxígeno). Si bien la distribución del flujo es menor las velocidades en cada placa relativamente es similar 16.32 m/s .

En el análisis de flujo para el modelo *FFnature* se muestra en la Fig. 5(b), se puede observar que el flujo es continuo en todas las placas y éste no varía en ninguna en comparación con el Paralelo-Serpentín, lo cual nos asegura que en todas las celdas exista un máximo aprovechamiento del fluido. La velocidad con la que el fluido circula en las celdas es de 13 m/s en el centro de las celdas y en las salidas alcanza una velocidad de 27 m/s .

3.2 Análisis de Presión

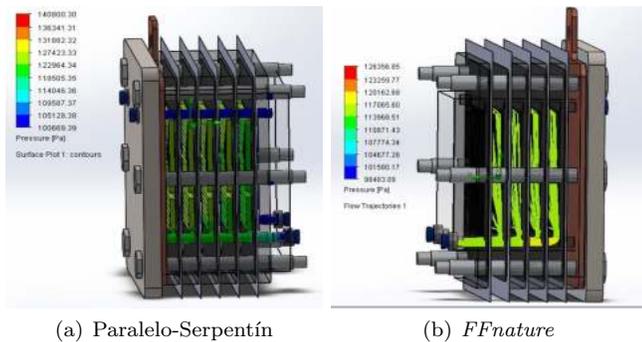


Figura 6. (a) Análisis de distribución de presión en el modelo Paralelo-Serpentín, (b) Análisis de distribución de presión en el modelo *FFnature*

En la Fig. 6(a) se muestra el análisis de presión, donde se aprecia que la presión es mayor en la última placa, esto se debe a que existe mayor concentración del flujo como ya se mencionó anteriormente. Si bien la presión en la última placa es mayor ésta no sobrepasa los 1.27 bar .

En la Fig. 6(b) se muestra el análisis de presión para el modelo *FFnature*, en el cual se puede observar que la presión del fluido en los canales es la misma para todas las celdas y tiene un valor aproximado de 1.17 bar . Lo que hace que el flujo de gases sea el mismo en todas las MEA's.

3.3 Análisis de Temperatura

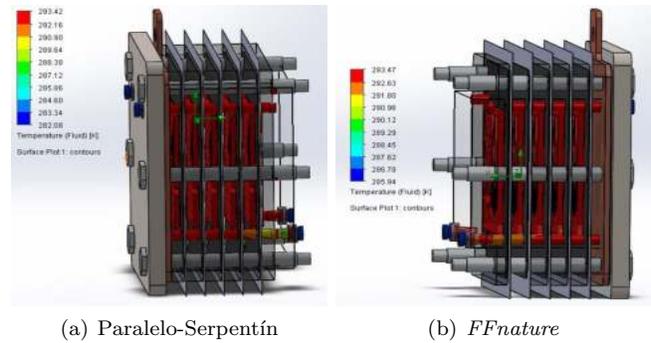


Figura 7. (a) Análisis de distribución de temperatura en el modelo Paralelo-Serpentín, (b) Análisis de distribución de temperatura en el modelo *FFnature*

La Fig. 7(a) muestra el análisis de temperatura, se observa que la temperatura en todas las placas es similar y tiene un valor de 293.44 K ($20.29 \text{ }^\circ\text{C}$) lo cual nos indica que si existe deshidratación en las MEA's ésta es la misma en todas. Ya que la temperatura es alta en comparación con la de la entrada del fluido se recomienda el empleo de un sistema de enfriamiento para minimizar la posible deshidratación de las MEA's.

El análisis de temperatura (ver Fig. 7(b)), se observa que la temperatura en todas las placas es similar, teniendo un valor de 293.47 K ($20.32 \text{ }^\circ\text{C}$) como máxima y una mínima de 292.63 K ($19.48 \text{ }^\circ\text{C}$), se puede apreciar que existe una pequeña disminución de temperatura la cual influye en la reducción de la deshidratación de las MEA's, lo cual implica un mejor rendimiento del stack.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos de la comparación de los modelos de canales de flujo Paralelo-Serpentín y *FFnature* se muestran en la Tabla 2, como se observa en el caso de la velocidad se nota que la diferencia en los rangos de la salida es notable en ambos modelos. En el modelo Paralelo-Serpentín si existe una mayor presión en el rango de salida y en el modelo *FFnature* la presión no tiene tanta variación con respecto al rango de salida. Por último, las temperaturas son similares en ambos modelos. Por lo tanto, podemos inferir que el canal de flujo *FFnature* presenta mejor ventaja en la velocidad con la que se distribuye el fluido y la presión del fluido en los canales de distribución, lo cual podría contribuir a mejorar el desempeño del stack.

Tabla 2. Comparación de los modelos utilizados en este trabajo para un stack

Modelo	Velocidad (m/s)	Presión (Pa)	Temperatura (K)
Paralelo- Serpentín	42-65	114046- 127423	293.42
<i>FFnature</i>	27-54	110871- 117065.6	293.47

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo para la realización de este trabajo de investigación a través del proyecto PRODEP con número de folio BUAP-PTC-406.

REFERENCIAS

- Arvay, A., French, J., Wang, J.C., Peng, X.H., and Kannan, A.M. (2013). Nature inspired flow field designs for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of hydrogen energy*, 38(9), 3717–3726.
- Guo, N., Leu, M.C., and Koylu, U.O. (2014). Bio-inspired flow field designs for polymer electrolyte membrane fuel cells. *International Journal of hydrogen energy*, 39(36), 21185–21195.
- Hermann, A., Chaudhuri, T., and Spagnol, P. (2005). Bipolar plates for pem fuel cells: A review. *International journal of hydrogen Energy*, 30(12), 1297–1302.
- Kloess, J.P., Wang, X., Liu, J., Shi, Z., and Guessous, L. (2009). Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 188(1), 132–140.
- Larminie, J., Dicks, A., and McDonald, M.S. (2003). *Fuel cell systems explained*, volume 2. J. Wiley Chichester, UK.
- Li, X. and Sabir, I. (2005). Review of bipolar plates in pem fuel cells: Flow-field designs. *International journal of hydrogen energy*, 30(4), 359–371.
- Middelma, E., Kout, W., Vogelaar, B., Lenssen, J., and De Waal, E. (2003). Bipolar plates for pem fuel cells. *Journal of Power Sources*, 118(1-2), 44–46.
- Monje, E.A. and García, B.E.G. (2018). Simulación de los canales de flujo para una celda tipo pem inspirado en la naturaleza (simulation of the flow-field channels inspired in the nature for a pem fuel cell). *Pistas Educativas*, 40(130).
- Ravishankar, S. and Prakash, K.A. (2014). Numerical studies on thermal performance of novel cooling plate designs in polymer electrolyte membrane fuel cell stacks. *Applied Thermal Engineering*, 66(1-2), 239–251.
- Spiegel, C. (2007). *Designing and building fuel cells*, volume 87. Citeseer.