

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

Edwin Alonso Monje

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
alonso.201116878@gmail.com

Beatriz E. Graniel García

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
beatriz.graniel@correo.buap.mx

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de un modelo de canal de flujo inspirado en la naturaleza para una Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC). Éste canal se diseñó utilizando la derivación de la ley de Murray que está basada en el sistema circulatorio biológico. El comportamiento del gas (oxígeno) en este modelo de canal de flujo se comparará con el modelo paralelo-serpentin. Los análisis de simulación presentados para ambos modelos de canales son: velocidad, presión y temperatura del gas. Tanto el diseño de los modelos como los análisis fueron realizados en el software SolidWorks.

Palabra(s) Clave: Celdas de combustible PEM, Diseño de canales de flujo, Leyes de Murray, Simulación de fluidos.

Abstract

In this work a design of a flow-field channel inspired in the nature for a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) is presented. This flow-field channel was designed using a derivation of the Murray's Law, which is based on the biological circulatory system. The performance of the gas (oxygen) in this flow-field channel model will be compared with the parallel-serpentine flow-field model. The simulation analyzes for both flow-field channel models presented are: speed,

pressure and gas temperature. The models and analyzes were made using SolidWorks software.

Keywords: Flow-field channel design, Flow Simulation, Murray law, PEM fuel cells.

1. Introducción

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 primera celda de combustible fue construida en 1839 por Sir William Grove, el cual demostró que se podía generar corriente eléctrica a partir de la reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno, su trabajo consistía en celdas electroquímicas compuestas por un electrodo con hidrógeno y el otro con oxígeno, separados por un electrolito líquido como se muestra en la figura 1.

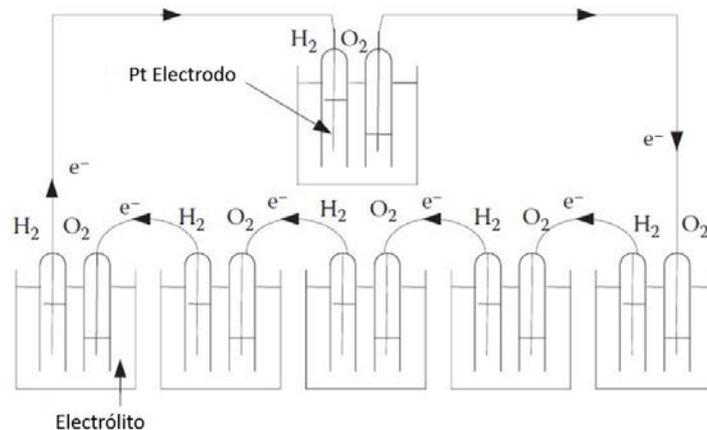


Figura 1 Celda diseñada por Sir William Grove (Revankar & Majumdar, 2014).

Celda de combustible tipo PEM

El nombre se originó a partir del uso de la *membrana de electrolito polimérico* debido a la migración de iones (protones). La PEMFC fue desarrollada por

General Electric en la década de los 60's, en esta tecnología se unen el ánodo, cátodo y electrólito, a la unión de estas tres capas se le conoce como *ensamble membrana electrodo* (MEA). 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 & Dicks A., 2003).

En el ánodo se suministra el hidrógeno y en el cátodo se suministra oxígeno o aire. El hidrógeno con la ayuda del catalizador de platino se disocia en *iones de hidrógeno (H^+) o protones y electrones (e^-)*. Los protones se transportan a través de la membrana hacia el cátodo, los electrones viajan a través de un circuito externo, el oxígeno reacciona electroquímicamente con los electrones del ánodo y los protones del electrólito, para formar agua en el cátodo. Las reacciones que ocurren son las siguientes: (Spiegel, 2007; Revankar & Majumdar, 2014)

- Reacción en el ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Reacción en el cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
- Reacción general: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

Placas distribuidoras de gas

Las placas distribuidoras de gas, son un componente clave dentro de la celda de combustible, debido a que sus funciones principales son: proporcionar el combustible y el oxidante a las superficies de los electrodos respectivamente, proporcionar canales de flujo para la eliminación de agua generada por la reacción electroquímica, proporcionar soporte mecánico a los electrodos, sirve como colector de corriente, conecta eléctricamente una celda a otra en el caso de un stack, funge como barrera física entre el combustible, oxidante y el refrigerante, y como disipador de calor. Ya que éste componente influye en el desempeño de las celdas, es importante el desarrollo de diseños que optimicen sus funciones principales.

Las configuraciones de canales principales utilizadas en las celdas de combustible son las de paralelo, serpentín, espiral o caracol y paralelo-serpentín como se

muestra en la figura 2: A) Serpentin, B) Paralelo, C) Caracol, D) Paralelo-Serpentin; cada uno de los modelos presentan ventajas y desventajas tales como pérdidas de presión, acumulaciones de agua entre otras (Li & Sabir, 2004).

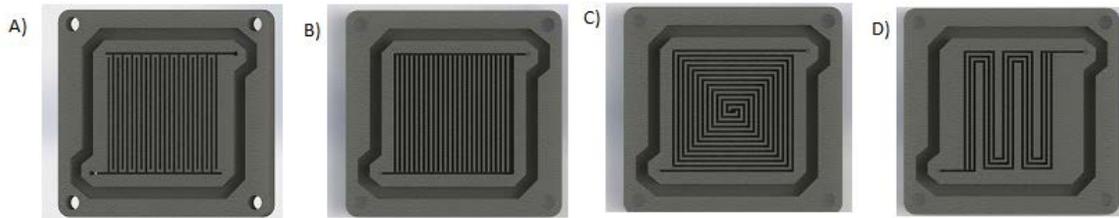


Figura 2 Placas con diversos canales de flujo (Revankar & Majumdar, 2014).

El modelo tipo paralelo-serpentin o múltiple serpentin (figura 3) ofrece como ventajas una menor pérdida de presión con respecto al serpentin, también presenta una adecuada remoción de agua, mayor contacto de área activa y alto desempeño. Aunque si bien presenta grandes ventajas, también tiene desventajas como caídas de presión debido a la longitud de los canales y desabasto de los gases a lo largo de los canales (Kahraman & Orhan, 2017).

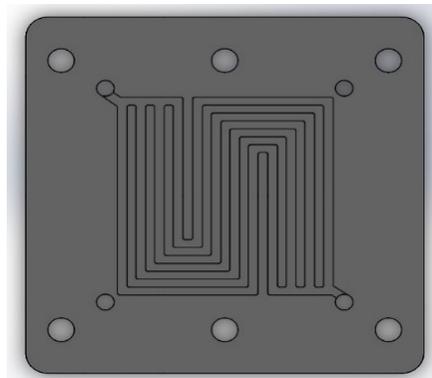


Figura 3 Modelo tipo paralelo-serpentin (Spiegel, 2007).

Actualmente, una alternativa a los modelos convencionales de placas distribuidoras de gases son los diseños basados en la naturaleza (figura 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 (P. Kloess,

Wang , Liu, Shi, & Guessous, 2009) (Arvay, French, Wang, Peng, & Kannan, 2013) (Nannan, Ming, & Umit, 2014).



Figura 4 Modelo inspirado en la naturaleza (Nannan, Ming, & Umit, 2014).

2. Métodos

Descripción de las leyes de Murray

Las leyes de Murray están basadas en el mínimo consumo de energía en las estructuras biológicas, la distribución de la masa en el sistema circulatorio y en el proceso de metabolismo. Esto implica que un sistema de ramificación que obedece estas leyes presenta menos resistencia al flujo.

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.

Si Q denota el flujo volumétrico y Δp representa la caída de presión a lo largo de un segmento, entonces el potencial viscoso requerido por unidad de longitud P_v para superar las pérdidas viscosas, se puede definir como se representa en la ecuación 1.

$$P_v = \left(\frac{\Delta p}{L}\right) Q \quad (1)$$

El flujo volumétrico para un flujo laminar completamente desarrollado en una tubería se puede encontrar a partir de la fórmula de Hagen-Poiseville (ecuación 2).

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

donde μ es la viscosidad dinámica, que es una medida de la resistencia del fluido al flujo. Sustituyendo $\Delta p/L$ de la ecuación 1 en la ecuación 2 y despejando el potencial viscoso requerido por unidad de longitud P_v se obtiene la ecuación 3.

$$P_v = \frac{8\mu Q^2}{\pi r^4} \quad (3)$$

De acuerdo con los términos propuestos por Murray, el potencial metabólico requerido por unidad de longitud P_m , puede definirse como se presenta en la ecuación 4.

$$P_m = K_m \pi r^2 \quad (4)$$

donde K_m es una constante metabólica. Por lo tanto, combinando las ecuaciones 3 y 4 la potencia total requerida para operar el sistema, ecuación 5.

$$P = P_v + P_m = \frac{8\mu Q^2}{\pi r^4} + K_m \pi r^2 \quad (5)$$

La dimensión óptima del canal que minimiza la potencia se puede encontrar derivando con respecto al radio e igualando a cero la ecuación 5, obteniendo la ecuación 6.

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{32\mu Q^2}{\pi r^5} + 2\pi K_m r = 0 \quad (6)$$

Para condiciones óptimas la relación volumétrica y el caudal están relacionados con el diámetro óptimo por medio de la ecuación 7.

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

Donde $M = \frac{\pi}{32} \sqrt{\frac{K_m}{\mu}}$ y es constante. La relación óptima entre el diámetro principal y los secundarios pueden derivarse utilizando el principio de bifurcación, ecuación 8.

$$Q_0 = Md_0^3 = Q_{1a} + Q_{1b} + Q_{1c} = Md_{1a}^3 + Md_{1b}^3 + Md_{1c}^3 \quad (8)$$

Obteniendo la ecuación 9, conocida como la ley de Murray, para una bifurcación simétrica.

$$d_0^3 = d_{1a}^3 + d_{1b}^3 + d_{1c}^3 + \dots \quad (9)$$

Para el diseño de los canales de flujo en una placa de una celda de combustible, se debe utilizar el diámetro hidráulico rectangular, el cual está definido como se presenta en la ecuación 10.

$$d^H = \frac{4A_c}{P} = \frac{2WD}{W + D} \quad (10)$$

Donde A_c es el área transversal del canal, P es el perímetro, W es al ancho del canal y D es la profundidad del canal. Mientras el diámetro sea el mismo, la resistencia al flujo en el canal será independiente del ancho y la profundidad del canal (Nannan, Ming, & Umit, 2014).

3. Resultados

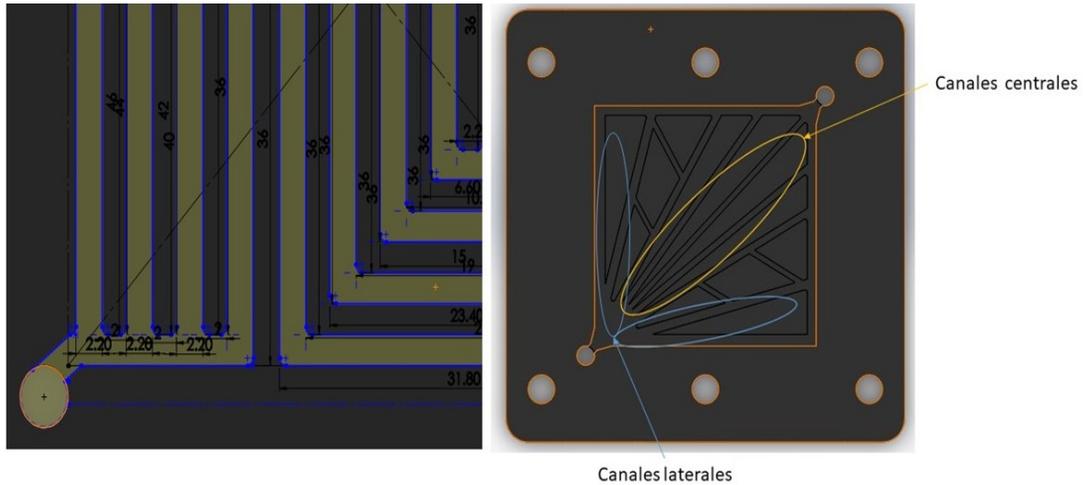
Simulación de los modelos de canales de flujo

Se realizaron pruebas de análisis de fluidos para observar el comportamiento de los gases en los canales de distribución de los modelos propuestos, los cuales son paralelo-serpentín y el propuesto inspirado en la naturaleza (*FFnature*). Las pruebas fueron realizadas en el programa de SolidWorks 2015 con su complemento Flow Simulation. Los parámetros utilizados son: Presión = 1 atm., Velocidad= 20 m/s y Temperatura = 293.2 K (20 °C), el material utilizado en las simulaciones es el grafito C y el fluido utilizado es oxígeno.

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.

La profundidad de los canales de flujo para los modelos a emplear es de 1.5 mm. Para el caso del modelo paralelo-serpentín (figura 5a) se emplea un ancho de 2.2

mm y separación entre ellos de 2 mm. Para el modelo *FFnature* (ver figura 5b) los canales centrales son de un ancho menor que los laterales de acuerdo a las leyes de Murray para mejor distribución del fluido (gas).



a) Modelo paralelo-serpentín.

b) Modelo FFnature.

Figura 5 Descripción de las medidas de los canales de flujo.

Análisis de velocidad

En el análisis de velocidad del fluido, como se muestra en la figura 6 se puede apreciar que en la entrada y salida existen mayores velocidades las cuales pueden llegar a los 39 o 78 m/s.

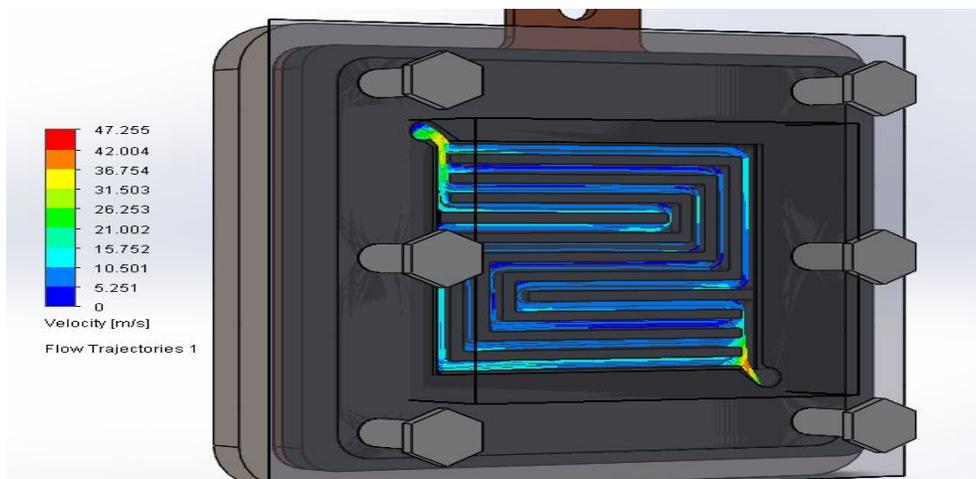


Figura 6 Análisis de velocidad fluido en el modelo Paralelo-Serpentín.

En la figura 7 se muestra el análisis de flujo en la placa final del *FFnature*, en el cual se puede notar que la velocidad con la que el flujo pasa por los canales es de aproximadamente 17 m/s en los canales centrales y de 8 m/s en los canales laterales lo cual en comparación con el modelo paralelo-serpentín presenta una mejor distribución de velocidad del fluido.

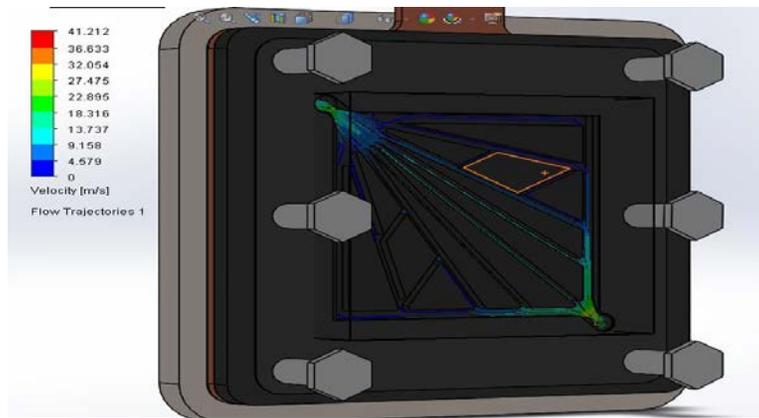


Figura 7 Análisis de distribución de flujo del modelo FFnature.

Análisis de presión

El análisis de presión del modelo tipo Paralelo-Serpentín, como se muestra en la figura 8 existen zonas donde la concentración de presión es mayor, debido a que en éstas la velocidad del fluido es menor por los cambios de dirección, como se aprecia esto sólo se ocurre en el centro de la placa donde la presión puede elevarse a 109,933.89 Pa (1.09 bar).

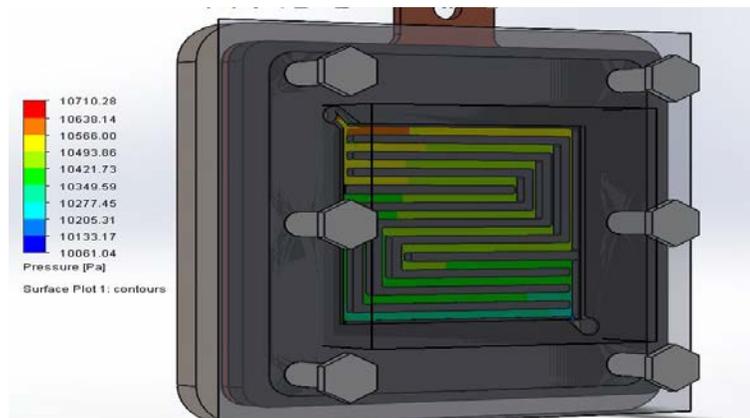


Figura 8 Análisis de presión en el modelo Paralelo-Serpentín.

En el análisis de la presión para el modelo *FFnature*, mostrado en la figura 9 se puede notar que la distribución de la presión en los canales es homogénea y sólo en la salida presenta una pérdida de presión de 0.03 bar, la cual no afecta en el desempeño de la celda de combustible.

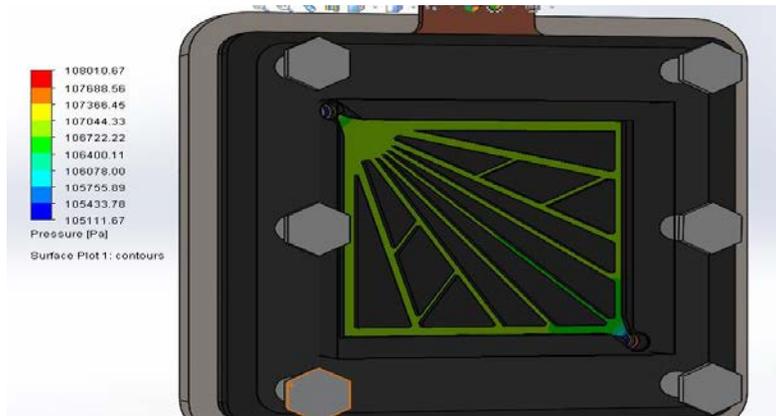


Figura 9 Análisis de distribución de presión del modelo FFnature.

Análisis de temperatura

El análisis de temperatura en el modelo tipo Paralelo-Serpentín, como se muestra en la figura 10 existen zonas donde se concentra la temperatura debido a que en estas zonas existe mayor concentración de presión. La temperatura en estas zonas se incrementa de los 293.05 K (19.90 °C) a los 293.45 K (20.30 °C).

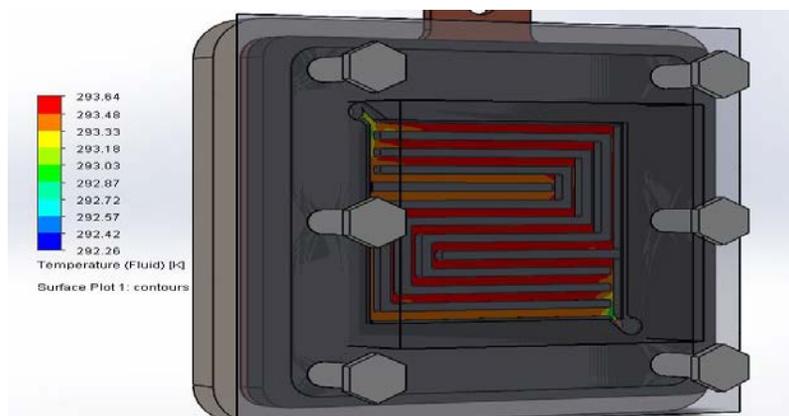


Figura 10 Análisis de temperatura en el modelo Paralelo-Serpentín.

En el análisis de temperatura del modelo *FFnature* (ver figura 11), la temperatura es distribuida uniformemente con un valor de 293.03 K (19.88 °C) con excepción de la salida en la cual la temperatura desciende a los 291.88 K (18.73 °C).

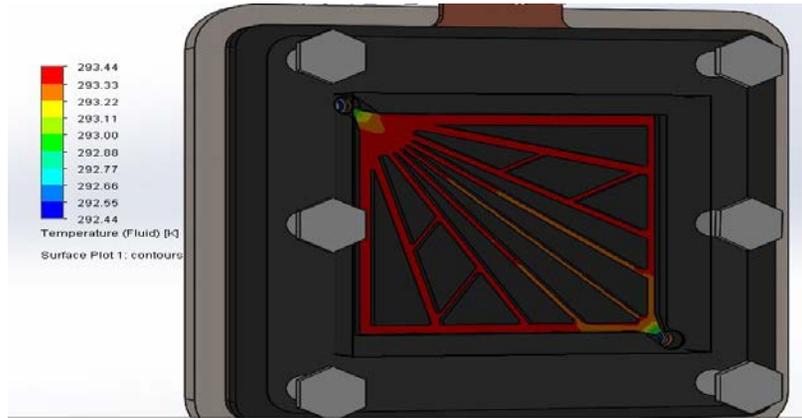


Figura 11 Análisis de distribución de temperatura en el modelo *FFnature*.

4. Discusión

En las simulaciones realizadas en los modelos, se puede observar que el modelo *FFnature* presenta mejoras en la distribución del fluido y en la presión, sin embargo, respecto a la temperatura éste no presenta alguna mejora relevante con respecto al modelo paralelo-serpentín; por lo tanto, se puede inferir que el modelo *FFnature* presentaría un mejor desempeño en la celda debido a que el producto de la reacción (vapor de agua) no tendería a acumularse en los canales.

Los resultados obtenidos en la celda (ver tabla 1) se muestra que, en los análisis de flujo, presión y temperatura, en las entradas y salidas de los modelos paralelo-serpentín y el *FFnature*, no son tan notorios; sin embargo, en el centro de las placas si existe diferencia en los tres análisis.

Tabla 1 Comparación de los modelos utilizados en este trabajo en una celda.

Modelo	Velocidad (m/s)		Presión (Pa)		Temperatura (K)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Paralelo-serpentín	20	21-36	100,000	102,770	293.15	293.33
<i>FFnature</i>	20	22-32	100,000	106,400	293.15	293.00

Agradecimiento

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.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Arvay, A., French, J. C., Wang, X. H., Kannan, A. M., (2013), Nature inspired flow field design for proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of hydrogen energy*, pp.3717-3726.
- [2] Kahraman, H., Orhan, M. F., 2017, Flow Field bipolar plate in a proton Exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling, *Energy Conversion and Management*, pp. 363-384.
- [3] Kloess, J. P., Wanq, X., Liu, J., Shi, Z. y Guessous, L., (2009), Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, pp.132-140.
- [4] Larminie, J., Dicks, A., (2003), *Fuel Cell Systems Explained*, WILEY.
- [5] Li, X., Sabir, I., (2004), Review of bipolar plate in PEM fuel cells: Flow-field designs, *International Journal of hydrogen energy*, pp. 359-371.
- [6] Revankar, S., Majumdar, P., (2014), *Fuel Cells Principles, Design and Analysis*. CRC Press.
- [7] Spiegel, C., (2007), *Designing and Building Fuel Cells*, McGraw Hill.
- [8] Nannan, G., Ming, L., Umit, O. K., (2014), Bio-inspired flow field design for polymer electrolyte membrane fuel cells, *International Journal of hydrogen energy*, pp. 21185-21195.