

# ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LOS FLUJOS DE ENTRADA DE UNA SOFC EN LA GENERACIÓN DE ENTROPÍA MEDIANTE CFD CONSIDERANDO BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE

Santoyo Saavedra, Carla Pamela (1), Ramírez Minguela, José de Jesús (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [cp.santoyosaavedra@ugto.mx]

2 [Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jdj.ramirezminguela@ugto.mx]

## Resumen

En este trabajo se analiza la generación de entropía en una celda de combustible tipo SOFC a partir de la variación de la temperatura en los flujos de entrada, empleando un modelo tridimensional en CFD que considera los fenómenos que ocurren en el interior de la celda, tales como la transferencia de masa, transferencia de calor, transporte de especies, reacciones químicas y electroquímicas. El estudio se basa en la comparación de la temperatura promedio obtenida a lo largo de la celda y las diferentes contribuciones de entropía, las cuales corresponden a las pérdidas óhmicas, de activación y de concentración, de acuerdo con las temperaturas propuestas en la entrada de la celda tanto para el aire como para el biogás usado como combustible. Los resultados muestran que las irreversibilidades termodinámicas son afectadas por la temperatura media de la celda, de modo que a altas temperaturas se generan menos pérdidas dentro de la celda de combustible.

## Abstract

This paper analyzes the generation of entropy in a fuel cell type SOFC from the variation of the temperature in the inflows, using a three-dimensional model in CFD that considers the phenomena that occur inside the cell, such as mass transfer, heat transfer, species transport, chemical and electrochemical reactions. The study is based on the comparison of the average temperature obtained throughout the cell and the different contributions to entropy, which correspond to the ohmic, activation and concentration losses, according to the temperatures proposed at the entrance of the cell for both air and biogas used as fuel. The results show that the thermodynamic irreversibilities are affected by the average temperature of the cell, so that at high temperatures less losses are generated in a fuel cell.

## Palabras Clave

SOFC; CFD; Biogás; Geometría de mono bloque; Generación de entropía

## INTRODUCCIÓN

La mayor parte de la energía eléctrica proviene de combustibles fósiles, los cuales constituyen una parte de los recursos no renovables que se han ido agotando en los últimos años, por lo que debido a la demanda energética, actualmente han surgido numerosas investigaciones en la generación de energías limpias, buscando que su uso sea fácil y sobretodo su producción sea eficiente con la intención de cuidar el medio ambiente y evitar comprometer el futuro de la población.

De este modo, las celdas de combustible han sido estudiadas, siendo dispositivos capaces de transformar la energía química en energía eléctrica. Básicamente están compuestas por un ánodo, un cátodo, un electrolito y además emplean colectores de corriente para separar el ánodo del cátodo y que de esta manera sea posible conectar una serie de celdas para un mayor rendimiento. Como ventaja y a diferencia con las baterías, las celdas de combustible no son dispositivos de almacenamiento de energía si no que generan energía siempre que sea suministrado combustible [1].

### Celdas de combustible tipo SOFC (Solide Oxide Fuel Cell)

Este tipo de celdas se caracteriza por emplear un electrolito de óxido sólido (cerámico), no poroso y con altas conductividades iónicas, por tal motivo las temperaturas alcanzadas en este tipo de celda son relativamente altas, encontrándose en un rango entre 500-1000°C [2]. Algunas de sus ventajas son su alta eficiencia, baja producción de NOx, la posibilidad de emplear metano y ser reformado, así como la opción de ser integradas en plantas de turbina de gas [3].

El objetivo de este trabajo es mostrar las aportaciones en la generación de entropía que causan ineficiencias en la celda y que se deben a los fenómenos que ocurren dentro de ella. El trabajo se realiza a partir de un modelo en CFD para diferentes temperaturas propuestas para el aire y el biogás, concluyendo en que condición de temperatura promedio de la celda se generan menos pérdidas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Geometría del modelo

La presente investigación está hecha para una celda tipo SOFC con geometría planar (MOLB) como se muestra en la Imagen 1, que consiste en canales trapezoidales donde los electrodos están separados por medio de un electrolito. El combustible se alimenta por la sección interna del canal (ánodo) y el aire por la externa (cátodo) [3] para una celda de combustible con los siguientes parámetros geométricos.

Tabla 1: Parámetros geométricos

Ánodo	Espesor (mm)	1.4
	Longitud axial (mm)	12.9
Cátodo	Espesor (mm)	0.4
	Longitud axial (mm)	12.9
Electrolito	Espesor (mm)	0.1
	Longitud axial (mm)	12.9
Canal de combustible	Longitud (mm)	100
Canal de aire	Longitud (mm)	100

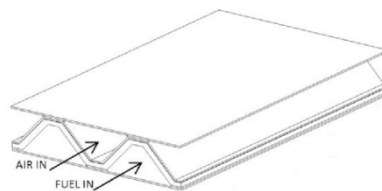


IMAGEN 1. Geometría de la SOFC tipo MOLB [3].

### Reacciones en el interior de la celda

El combustible empleado (biogás), es una mezcla compuesta principalmente por CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Las reacciones electroquímicas se producen debido a un intercambio de electrones, donde el oxígeno del aire se reduce a iones oxígeno que posteriormente pasan a través del electrolito al ánodo y reaccionan con el hidrogeno del combustible en su forma oxidada para formar agua [4,5]. Las reacciones dentro de la celda de combustible son las siguientes:

Reacción en el cátodo:



Reacción en el ánodo:



Reacción global:



### Ecuaciones gobernantes

En el modelo se asumen condiciones como: estado estacionario, gas ideal para la mezcla de gases, fluido laminar e incompresible y electrodos porosos y uniformes. El modelo considerado resuelve por medio de iteraciones las distintas ecuaciones diferenciales que toman en cuenta los fenómenos de transporte que ocurren en la celda de combustible, entre ellas se encuentra la conservación de momento, masa, transporte, energía, la ecuación del balance de entropía, entre otras. Las ecuaciones pueden revisarse en la bibliografía reportada.

### Parámetros del modelo

Los parámetros tomados en cuenta en el modelo se resumen en la tabla siguiente:

**Tabla 1: Parámetros del modelo**

Porosidad	Ánodo	0.5
	Cátodo	0.5
Tortuosidad	Ánodo	3.0
	Cátodo	3.0
Conductividad térmica	Ánodo	6.23 W K <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>
	Cátodo	9.6 W K <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>
	Electrolito	2.7 W K <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>
	Interconector	13 W K <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>
Coeficiente de transferencia β	Ánodo	0.5
	Cátodo	0.5
Velocidad de entrada	Ánodo	3 m s <sup>-1</sup>
	Cátodo	5 m s <sup>-1</sup>

### Casos de estudio

Con el fin de comparar la entropía producida en la celda de combustible se plantean y simulan 5 diferentes casos para una potencia fija de  $890\text{W/m}^2$ , usando ANSYS FLUENT v.16.0 como herramienta de cálculo.

Tabla 2: Temperaturas en la entrada de la celda de combustible

Caso	Temperatura del aire (K)	Temperatura del combustible (K)
1	873	873
2	873	973
3	873	1073
4	973	873
5	1073	973

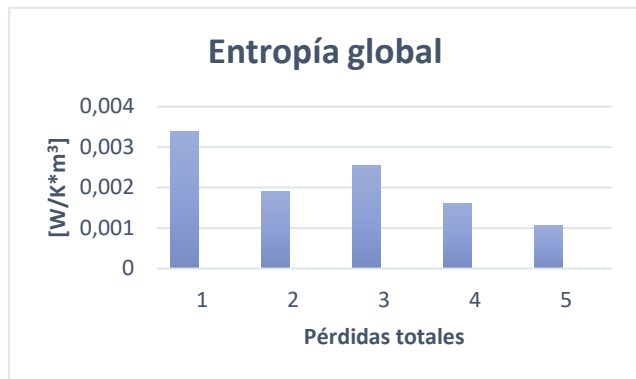
Como resultado se obtiene la generación de entropía en el interior de la celda, así como la temperatura promedio y el voltaje de operación de acuerdo con la temperatura en la entrada de los fluidos a la celda.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta parte se muestran las contribuciones a la entropía global debido a la transferencia de calor ( $S_h$ ), fuerzas viscosas ( $S_v$ ), transferencia de masa ( $S_m$ ), pérdidas óhmicas ( $S_{ohm}$ ) y pérdidas por activación ( $S_{act}$ ), de acuerdo con los fenómenos de transporte ocurridos en la celda y a partir de la variación de la temperatura considerada para 5 casos en un rango de 873K a 1073K contemplando la máxima temperatura de operación de la celda.



IMAGEN 2: Pérdidas en la celda de combustible para cada conjunto de temperaturas.



**IMAGEN 3:** Entropía global para cada caso estudiado.

Es posible apreciar en la Imagen 2 para cada caso en particular, que las pérdidas por activación son las que predominan y que, por el contrario, las que se deben a la transferencia de masa ( $S_m$ ) así como las de fricción del fluido ( $S_v$ ) son despreciables con respecto al resto que se producen, esto se debe principalmente a que se asumió un flujo en régimen laminar. El caso 1 en el que el aire y el combustible entran a las temperaturas de operación más bajas e iguales (873K) es el que presenta el mayor aporte de cada una de las pérdidas y es el que genera menor voltaje siendo 0.33 V, así como la menor temperatura promedio de la celda (955.57 K).

La Imagen 3 muestra las pérdidas globales para cada caso, en donde el caso 5 tiene las menores pérdidas que conducen a tener temperaturas (988.73 K) y voltajes más altos de operación en la celda (0.66 V). El caso 2 comparado con el caso 4 muestra un similar comportamiento, sin embargo, las pequeñas diferencias en las pérdidas reflejan la influencia del aire respecto del combustible en la generación de entropía, esto puede deberse a que el flujo másico de entrada del aire es mayor que el del combustible resultando menores pérdidas con una  $T=988.73K$ . Para el caso 3, la temperatura de entrada de los flujos es mayor que para los casos 2 y 4, sin embargo, la temperatura promedio en la celda es menor (973.77K) y por lo tanto las pérdidas son mayores.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza la generación de entropía en una celda de combustible tipo SOFC de acuerdo con la temperatura a lo largo de la celda a partir de la temperatura de los flujos de entrada usando como herramienta la dinámica de fluidos computacional (CFD) y con ayuda de un modelo tridimensional que toma en cuenta los diferentes fenómenos de transporte. Se tomaron en cuenta las contribuciones por transferencia de calor, transferencia de masa, fricción del fluido, pérdidas óhmicas y las pérdidas de activación. De acuerdo con las variaciones de temperatura de entrada del aire y del combustible, la pérdida con mayor influencia es la de activación para los diversos casos. El manejo de una mayor temperatura de operación en el dispositivo garantiza menores pérdidas, por lo que es lo más recomendable para una mejor conversión de energía, lo que a su vez implica un mayor voltaje en la celda.

## REFERENCIAS

- [1] Rangel-Hernández, V.H., Niño-Avendaño, A.M., Ornelas-Jacobo, R. (2017). Panorama general de las celdas SOFC en la generación de energía eléctrica. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*. 2017; 3: 61-73.
- [2] Hikosaka-Behling, N. (2012). *Fuel Cells: Current Technology Challenges and Future Research needs* (1 st ed.). Elsevier.
- [3] Ramírez-Minguela, J.J., Uribe-Ramírez, A.R., Mendoza-Miranda, J.M., Pérez-García, V., Rodríguez-Muñoz, J.L., Minchaca-Mojica, J.I., Alfaro-Ayala, J.A. (2016). Study of the entropy generation in a SOFC for different operating conditions. *Science Direct*. 2016; 41: 8978-8991.
- [4] Ramírez-Minguela, J.J., Mendoza-Miranda, J.M., Muñoz-Carpio, V.D., Rangel-Hernández, V.H., Pérez-García, V., Rodríguez-Muñoz, J.L. (2014). Internal reforming of methane in a mono-block-layer build solid oxide fuel cell with an embedding porous pipe: Numerical analysis. *Energy Conversion and Management*. 2014; 79: 461-469.
- [5] Ramírez-Minguela, J.J., Rangel-Hernández, V.H., Alfaro-Ayala, J.A., Uribe-Ramírez, A.R., Mendoza-Miranda, J.M., Belman-Flores, J.M., Ruiz-Camacho, B. (2018). Energy and entropy study of a SOFC using biogas from different sources considering internal reforming of methane. *International Journal*. 2018; 120: 1044-1054.