

# ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UNA SOFC ALIMENTADA MEDIANTE DIFERENTES COMPOSICIONES DE BIOGÁS UTILIZANDO CFD CONSIDERANDO REFORMADO INTERNO

Lira Reyes Gustavo Ulises (1), Ramírez Minguela José de Jesús (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | [gu.lirareyes@ugto.mx]

2 [Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | [minguelarjj@gmail.com]

## Resumen

La celda de combustible es un dispositivo que produce energía eléctrica a partir de reacciones electroquímicas utilizando principalmente hidrógeno y oxígeno como reactantes. Utilizando el tipo de celda SOFC teniendo en cuenta que las altas temperaturas permiten el reformado interno se pueden suministrar diferentes tipos de combustibles para generar dentro de la celda el hidrógeno que es requerido en las reacciones electroquímicas. A partir de una geometría plana simple para una SOFC usando simulaciones numéricas por medio de CFD fue alimentada la celda con diferentes tipos de biogás obtenido de diferentes de desechos, cada tipo de biogás tiene su propia composición. Se modeló de acuerdo con las ecuaciones de transferencia de masa, transferencia de calor, transporte de especies, reacciones químicas y electroquímicas, las cuales son sus ecuaciones gobernantes, todo ello para el estudio interno de la celda. Los resultados arrojan que el biogás que genera un mayor rendimiento de la celda de combustible es el obtenido de lodos locales alcanzando una potencia cercana a los 1900 W/m<sup>2</sup>, al contrario de la potencia obtenida con el biogás de fermentación de metano que apenas alcanzó una potencia de aproximadamente 700 W/m<sup>2</sup>.

## Abstract

Cell fuel is a device that produce electric energy through electrochemical reaction, used principally hydrogen and oxygen like reactants. Using a SOFC taking into consideration high temperatura that allow internal reforming it can supply diferent types of fuels to produce into the cell hydrogen that is requeret in electrochemical reaction. From simple planar geometry for a SOFC using a CFD numerical simulation was feeding a cell with differents type of biogas obtained of differents waste, each type of biogas have its own composition. It was modeled agree to mass transfer equation, heat transfer equation, species transport, chemical and electrochemical reaction, which are its governing equation. results give that the biogas that have major performance is obtained of local sludges achieved near to 1900 watts of potency, unlike of biogas obtained of methane fermentation that barely achieved aproximaly 700 watts of potency.

**Palabras Clave** |

Biogás; SOFC; Reformado; CFD

## INTRODUCCIÓN

### SOFC

Las celdas de combustible de óxidos sólidos son dispositivos que generan energía eléctrica a partir de reacciones electroquímicas que se llevan a cabo dentro de estas, debido a su alta eficiencia y bajo impacto medio ambiental son una alternativa como fuente de energía limpia en el futuro [1]. Las SOFC constan principalmente de 7 partes: 2 colectores de corriente, dos canales por donde se introduce el combustible y el aire, ánodo, cátodo y un electrolito. Estos materiales deben ser resistentes a las temperaturas en las que operan este tipo de celdas de combustible que van de 500 a 1000 °C, lo que las hace costosas actualmente, a su vez, estas temperaturas permiten que la celda sea versátil en el combustible que le es alimentado, puesto que puede trabajar con hidrocarburos, bio alcoholes, biogás e hidrógeno, a diferencia de las celdas que trabajan a temperaturas bajas que necesitan un reformado anterior para convertir los hidrocarburos en H<sub>2</sub> para evitar que el catalizador se dañe [2]. En las SOFC el reformado ocurre internamente evitando un gasto mayor en equipos si son comparadas con las celdas de baja temperatura de operación.

### Biogás

En este artículo se busca que las simulaciones que se lleven a cabo en la celda tengan una variación en la composición del biogás, recordando que el biogás está compuesto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Y. Shiratori y T. Ijichi manejan una variación de la composición tomando en cuenta condiciones fijas de fermentación lo que genera una variación mínima en la composición del gas [3], mientras que en la investigación de V. Chiodo y A. Galvagno, se tiene un reformado previo a la alimentación lo que genera que la variación de la composición de metano para cada condición de salida del reformado sea despreciable [4]. Por lo tanto, es necesario acercarse más a la realidad teniendo en cuenta la variación de los desechos que generarán el biogás, así como la variación en las condiciones del digestor, Doreen Zirkler y Andre Peters presentan en su trabajo la obtención de biogás y la variación de la composición según el tipo de desecho con el cual se genera y la

variación de las condiciones en una digestión anaerobia [5].

### Reacciones

Dentro de la celda de combustible ocurren reacciones químicas y electroquímicas, para el reformado interno se consideran dos reacciones químicas las que producen hidrógeno, las cuales con descritas a continuación [6,7]:



Valores  $k = 4274 \text{ molm}^{-2}\text{bar}^{-1}$   $E_a = 82000 \text{ J mol}^{-1}$  [8,9] para la reacción de reformado de metano que es llevada a cabo en la superficie del ánodo.



Valores para calcular las constantes de equilibrio para la gasificación de vapor de agua.  $k_{\text{WGS}}^b = 0.0203$ ;  $\Delta G_{\text{shif}}^0 = 103191$  [10,11].

Para las reacciones electroquímicas, en el cátodo por donde pasa el aire tenemos la siguiente:



En el lado del ánodo por donde entra el combustible tenemos la siguiente reacción:



Estas reacciones electroquímicas son llevadas a cabo en la interfaz de los electrodos y el electrolito [12].

La reacción general es, por lo tanto, la siguiente:



### Ecuaciones gobernantes

Para este estudio se tienen en cuenta ecuaciones que resolverán el comportamiento de la celda: transferencia de masa, transferencia de calor, modelos de reacciones químicas y electroquímicas, transporte de especies [6,7,13].

TABLA 1. PARÁMETROS DE POROSIDAD MEDIA [14,15].

POROSIDAD	Ánodo	0.3
	Cátodo	0.3
TORTUOSIDAD	Ánodo	3
	Cátodo	3
PERMEABILIDAD (M2)	Ánodo	1.00E-12

	Cátodo	1.00E-12
	Ánodo	6.23
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	Cátodo	9.6
	Electrolito	2.7
	Colector	13
	Ánodo	5300
INTERCAMBIO DE DENSIDAD DE CORRIENTE	Cátodo	2300
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA B	Ánodo	0.5
	Cátodo	0.5
CONDUCTIVIDAD	Ánodo	333330
	Cátodo	7937

## DESCRIPCIÓN Y CONDICIONES DE FRONTERA

El análisis es hecho en una geometría plana simple. La celda de combustibles mostrada en la Imagen 1 está constituida en dos partes, la catódica que contiene el canal del aire, colector de corriente y cátodo. La parte del anódica que está constituida por el canal de combustible, colector de corriente y ánodo. La longitud de la celda es de 100mm. Para esta geometría no se considera el electrolito debido a que este es agregado cuando se activa el modelo de la SOFC en el software.

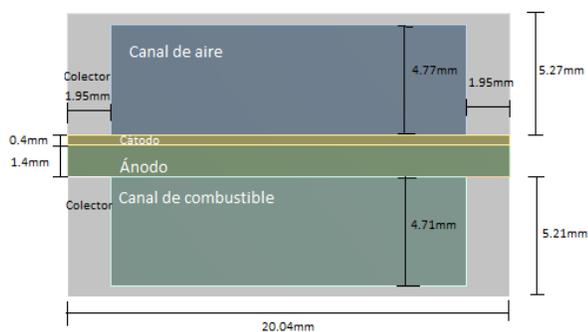


Imagen 1. Geometría de SOFC plana simple con dimensiones [13].

La celda es alimentada con aire con un flujo másico de  $8.66e-5$  kg/s con una temperatura de entrada del 873 K. Para la alimentación de combustible se maneja un flujo de 4.78 kg/s con una temperatura de 873 K. Para este estudio se consideran varios tipos de biogás con diferentes composiciones las cuales se muestran en la Tabla 2. La tabla es un arreglo que se hizo para evitar la

formación de depósitos de carbón en la celda, por lo que fue añadido agua a la mezcla de biogás original [13].

TABLA 2. COMPOSICIÓN DE BIOGÁS PARA EVITAR DEPÓSITOS DE CARBONO [13].

COMPOSICIÓN	Desecho agrícola (%)	Lodo local (%)	Desecho industrial (%)	Fermentación de metano (%)
H <sub>2</sub> O	32	33	30	34.0787
CH <sub>4</sub>	39.1	40.2	36.75	41.942
CO <sub>2</sub>	27.2	23.45	31.5	23.919
H <sub>2</sub>	0.68	1.675	0.7	0
CO	0.34	0.335	0.35	0
N <sub>2</sub>	0.34	1.005	0.35	0.0603
O <sub>2</sub>	0.34	0.335	0.35	0

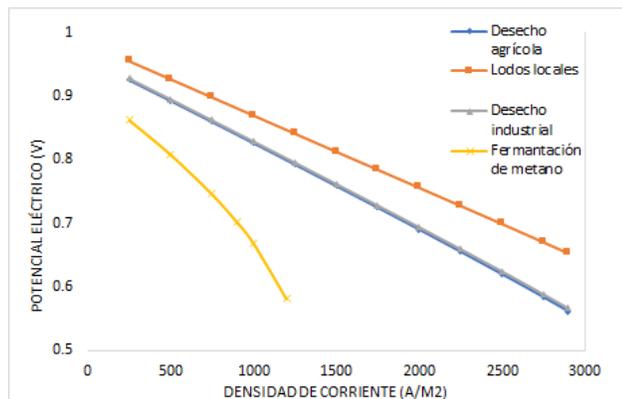
## APROXIMACIÓN NÚMÉRICA

Las herramientas de modelado acoplan métodos de cálculo electroquímico con un código CFD comercial de simulación. Las ecuaciones de Navier-Stokes de volumen finito y ecuaciones de transporte son resueltas para obtener la concentración de especies y usando ecuaciones electroquímicas se obtiene posteriormente la densidad de corriente y el potencial eléctrico de la celda. La red computacional fue refinada hasta obtener una malla que contiene 140,000 celdas que son suficientes para resolver este caso de estudio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

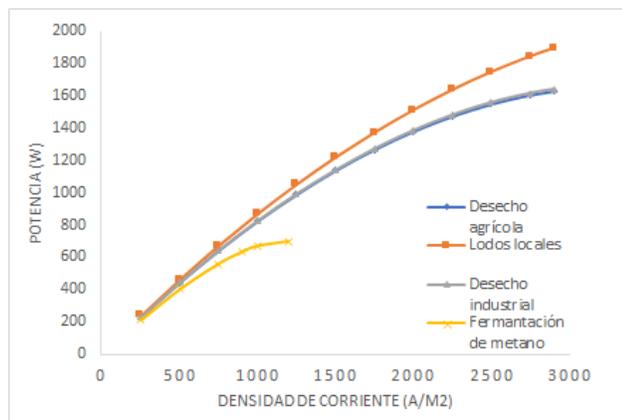
Una curva de polarización es usada para comprender el rendimiento de la celda para cada tipo de biogás alimentado. En la imagen 2 vemos el comportamiento de cada caso, el que tiene un mejor rendimiento es el biogás obtenido de lodos locales, mientras que para el caso de desechos agrícolas e industriales el comportamiento es muy parecido y por último cuando se alimenta a la

celda el biogás obtenido mediante fermentación de metano el rendimiento de la celda es el peor. Vemos también que para 3 de los casos el mínimo potencial eléctrico producido el menor que 0.6 v, mientras que para lodos locales el menor potencial eléctrico está un poco abajo de 0.7 v.



**Imagen 1. Curva de polarización para cada caso de biocombustible.**

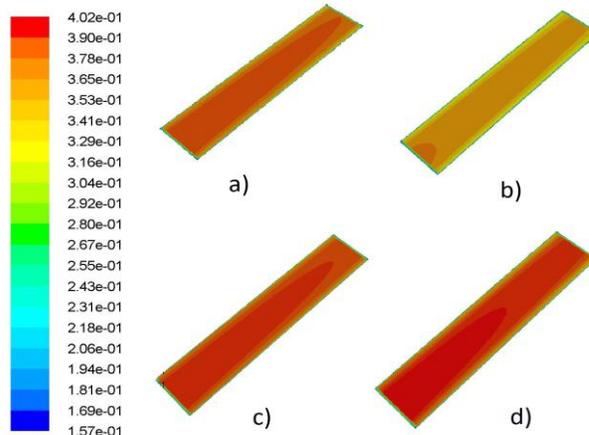
Hacemos después un análisis de la potencia generada de la celda, en la imagen 3 podemos apreciar que la mayor potencia generada de la celda es cuando se suministra el biogás de lodos locales alcanzando cerca de 1900 W/m<sup>2</sup>, por otro lado, la potencia alcanzada cuando es suministrado el biogás de fermentación de metano se acerca a los 700 W/m<sup>2</sup>.



**Imagen 1. Curva de potencia para cada caso de biocombustible.**

Se procede a hacer un análisis de cada caso tomando como referencia la potencia máxima generada por el biogás de fermentación de metano para poder analizar el porqué del comportamiento diferente de este caso. Usando los contornos de concentración para el metano en el lado del ánodo

obtenemos la imagen 3, podemos apreciar que para el caso de fermentación de metano la concentración de metano es mayor a lo largo de la celda, lo que quiere decir que el metano empieza a reaccionar hacia el final de su paso por la celda.

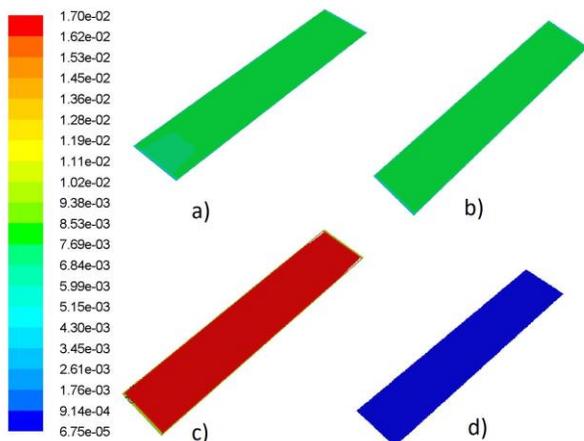


**Imagen 3. Contornos de concentración de metano en el ánodo. a) caso desecho agrícola, b) desecho industrial, c) lodos locales, d) fermentación de metano.**

En este caso hay dos tipos de biogás con mayor concentración al momento de entrar en la celda, los lodos locales y la fermentación de metano, pero en lodos locales podemos observar que hay una mayor disminución de la concentración con respecto al a fermentación de metano. Para todos los casos es visible la disminución de la concentración de metano por las orillas del ánodo por lo que podemos decir que en esas zonas es donde se lleva a cabo la reacción de reformado.

Se hace un segundo análisis ahora con la concentración de hidrógeno en la imagen 4 podemos ver claramente el porqué la celda alimentada con biogás de fermentación de metano no alcanza las potencias que los otros casos si, pues aunque haya producción de hidrógeno debido al reformado, no es una cantidad con la que pueda sostenerse de manera adecuada las reacciones electroquímicas, esto también explicaría el comportamiento de este caso en la imagen 1, ya que el efecto de la poca concentración de hidrógeno hace que alcancemos en la curva de polarización la zona de pérdida por transferencia de masa; también podemos apreciar que para el caso de lodos locales tenemos la mayor concentración de hidrógeno a lo largo de la celda esto nos hace entender el la razón que el

caso en el que este es alimentado la celda alcance la mayor potencia.



**Imagen 3. Contornos de concentración de hidrógeno en el ánodo. a) caso desecho agrícola, b) desecho industrial, c) lodos locales, d) fermentación de metano.**

Por último, para el caso de desecho industrial y agrícola las concentraciones de hidrógeno son similares y con ello podemos decir que a este resultado tenemos las curvas de polarización y potencia tan parecidas.

## CONCLUSIONES

Este estudio fue hecho de manera teórica en un software de simulación CFD, obteniendo que sí hay una influencia marcada de la composición del biogás sobre el voltaje y la potencia que podemos obtener de una celda de combustible. Y que para las mismas condiciones de la celda se obtuvieron resultados diferentes del reformado de metano, teniendo al biogás de fermentación de metano como el que menor hidrógeno produce con la reacción del reformado. Además, tenemos el mismo comportamiento en dos tipos diferente de biogás esta también debido a su similitud en cuanto a proporción en los componentes presentes de cada biogás. El biogás con mejor rendimiento fue el de lodos locales, ya que es en el que mayor hidrógeno se produce en el reformado el cual es aprovechado en las reacciones electroquímicas.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento para el doctor José de Jesús Ramírez Minguela por aceptarme para realizar este proyecto además de su apoyo en el transcurso de este y facilitar las herramientas para las simulaciones; para el doctor Jorge Arturo Alfaro Ayala por su apoyo en el proyecto con consejos y asesorías en la simulación.

## REFERENCIAS

- [1] Thinh X. Ho. (2016). Dynamic characteristics of a solid oxide fuel cell with direct internal reforming of methane. *Energy Conversion and Management*. 2016; 113: 44–51.
- [2] Zhang ZG, Xu G, Chen X, Honda K, Yoshida T. Process development of hydrogenous gas production for PEFC from biogas. *Fuel Process Technol*. 2004; 85:1213e29.
- [3] Y. Shiratori, T. Ijichi, T. Oshima, K. Sasaki. (2010). Internal reforming SOFC running on biogas. *ScienceDirect*. 2010; 35: 7905 e7912.
- [4] V. Chiodo, A. Galvagno, A. Lanzini, D. Papurello, F. Urbani, M. Santarelli, S. Freni. (2015). Biogas reforming process investigation for SOFC application. 2015; 98: 252-258.
- [5] Doreen Zirkler, Andre Peters, Martin Kaupenjohann. (2014). Elemental composition of biogas residues: Variability and alteration during anaerobic digestion. *ScienceDirect*. 2014; 67: 89-98.
- [6] Joonguen Park, Peiwen Li, Joongmyeon Bae. (2012). Analysis of chemical, electrochemical reactions and thermo- fluid flow in methane-feed internal reforming SOFCs: Part I e Modeling and effect of gas concentrations. *SciVerse ScienceDirect*. 2012; 37: 8512-8531.
- [7] J.J. Ramírez-Minguela, J.L. Rodríguez-Muñoz, V. Pérez-García, J.M. Mendoza-Miranda, V.D. Muñoz-Carpio, J.A. Alfaro-Ayala. (2015). Solid oxide fuel cell numerical study: modified MOLB-type and simple planar geometries with internal reforming. *Electrochimica Acta*. 2015; 159: 149-157.
- [8] Khaliq Ahmed, Karl Foger. (2000). Kinetics of internal steam reforming of methane on Ni/YSZ-based anodes for solid oxide fuel cells, *Catalysis Today* 63 (2000) 479– 487.
- [9] Wei Jiang, Ruixian Fang, Jamil A. Khan, Roger A. Dougal. (2006). Parameter setting and analysis of a dynamic tubular SOFC model, *J. Power Sources* 162 (2006) 316–326.
- [10] B. Sundén, M. Faghri. (2005). *Transport phenomena in fuel cells, Developments in Heat Transfer*. 19 (2005) ISBN: 1-85312-840-6.

[11] Pei-Wen Li, Minking K. Chyu. (2003) Simulation of the chemical/electrochemical reactions and heat/mass transfer for a tubular SOFC in a stack. *J Power Sources*. 124 (2003) 487–498.

[12] R.J. Gorte, Recent developments towards commercialization of solid oxide fuel cells, *AIChE J* 51 (2005) 2238–2377.

[13] J.J. Ramírez-Minguela, J.M. Mendoza-Miranda, V.D. Muñoz-Carpio, V.H. Rangel-Hernández, V. Pérez-García, J.L. Rodríguez-Muñoz. (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.

[14] Yang Yunzhen, Wang Guilan, Zhang Haiou, Xia Weisheng. Comparison of heat and mass transfer between planar and MOLB-type SOFCs. *J Power Sources* 2008;177:426–33.

[15] Sundén B, Faghri M. *Transport phenomena in fuel cells*. Dev Heat Transfer 2005;19. ISBN: 1-85312-840-6.