

## Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales en una celda de combustible microbiana

GARCÍA-NAVARRO, Josefina†\*, BAUTISTA-VARGAS, María Esther, HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán y ZUMAYA-QUIÑONES, Rocío

*Universidad Politécnica de Altamira. Nuevo Libramiento Altamira Km. 3, Santa Amalia, 89602 Altamira*

Recibido 17 de Julio, 2017; Aceptado 8 de Septiembre, 2017

### Resumen

En los últimos años se ha visto como la demanda de energía eléctrica en México ha ido incrementando y con ella el uso de combustibles fósiles para su generación. La forma en que se ha enfrentado a esto es, aprovechando fuentes de energías renovables o buscando alternativas a métodos convencionales de generación de electricidad. El objetivo de esta investigación es generar energía eléctrica aprovechando la bioenergía contenida en aguas residuales, la forma en que se obtiene la energía es usando una celda de combustible microbiana, que aprovecha la materia orgánica y los microorganismos que contienen las muestras de agua residual. Se analizaron muestras de agua de diferente origen: domésticas, pluviales y de criaderos de peces. La energía producida en éstas, se midió con el voltaje eléctrico (milivolts/mV). Se obtuvieron voltajes de energía de 302mV a 931 mV, resultando con valores más altos de voltaje eléctrico el agua residual de criadero de peces. Se concluye que todos los tipos de agua residual analizados, presentaron potencial para suministrar energía a sistemas electrónicos de bajo consumo y que las celdas de combustible microbianas son una alternativa a métodos convencionales de generación de electricidad, para aplicaciones a pequeña escala.

**Generación de energía, bioenergía, aguas residuales.**

### Abstract

In recent years it has been seen how the demand for electric power in Mexico has been increasing and with it the use of fossil fuels for its generation. The way it has faced this is by taking advantage of renewable energy sources or by looking for alternatives to conventional methods of generating electricity. The objective of this research is to generate electricity using bioenergy contained in wastewater, the way the energy is obtained is using a microbial fuel cell, which takes advantage of the organic matter and microorganisms that contain the wastewater samples. Samples of water of different origin were analyzed: domestic, rainwater and fish farms. The energy produced in these, was measured with the electrical voltage (millivolts / mV). Energy voltages were obtained from 302mV to 931mV, resulting in higher values of electrical voltage from the fish farm waste water. It is concluded that all types of wastewater analyzed have the potential to supply energy to low-consumption electronic systems and that microbial fuel cells are an alternative to conventional methods of generating electricity for small-scale applications.

**Energy generation, waste water, bioenergy**

**Citación:** GARCÍA-NAVARRO, Josefina, BAUTISTA-VARGAS, María Esther, HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán y ZUMAYA-QUIÑONES, Rocío. Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales en una celda de combustible microbiana. Revista de Operaciones Tecnológicas 2017. 1-3:48-56

† Investigador contribuyendo como primer autor.

\*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: josefina.garcia@upalt.edu.mx

## Introducción

En los últimos años se ha visto como la demanda de energía en México ha ido incrementando y con ella el uso de combustibles fósiles para su generación. Su manejo ha creado diversos problemas de contaminación ambiental, desde el incremento de la acidez del suelo y agua hasta el calentamiento global, provocando que la calidad de vida disminuya (Ramos-Gutiérrez y Montenegro-Fragoso, 2012). Una de las formas en que se ha enfrentado a esta problemática, es por medio del uso racional y eficiente de fuentes de energía renovable (Estrada Gasca y Samperio Islas, 2010).

Una fuente de energía renovable y limpia, es la bioenergía, que es la energía obtenida a partir de la biomasa (Masera-Cerutt *et al* 2011) y puede ser aprovechada para generar energía eléctrica usando una Celda de Combustible Microbiana (CCM).

Las células de combustible microbianas (CCMs) son dispositivos electroquímicos que utilizan la actividad metabólica de los microorganismos para oxidar los combustibles, generando corriente eléctrica por transferencia de electrones directa a los electrodos (Rabaey *et al.*, 2007). Las fuentes más comunes de microorganismos electroactivos los contienen las aguas residuales domésticas, los lodos activados y anaeróbicos y los sedimentos marinos (Erable *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2004; Rezaei *et al.*, 2007).

Las células de CCMs se han utilizado para producir electricidad a partir de diferentes compuestos, acetato, lactato y glucosa. Es posible producir electricidad en una celda de éste tipo a partir de aguas residuales domésticas, al mismo tiempo que se realiza un tratamiento biológico de aguas residuales (Liu *et al.*, 2004).

Existen dos tipos de diseño de CCMs: las de dos compartimentos, que tienen una cámara anódica, una cámara catódica y un separador de Membrana de Intercambio Protónico (PEM), debido a que la energía utilizada para bombear el agua es mayor a la que produce, éstas son preferibles para el tratamiento de agua que a la generación de electricidad; y las de un solo compartimento, donde ya no es necesaria la cámara catódica, el cátodo se expone al aire (Du, Li y Gu, 2007).

Las CCMs pueden generar energía eléctrica directamente a partir de sedimento marino, lodos activados, aguas residuales domésticas entre otras fuentes de materia orgánica (Logan y Regan, 2006).

Las ventajas de usar la tecnología de las Celdas de Combustible Microbianas es que pueden generar electricidad y a la vez realizan un tratamiento de aguas residuales. La capacidad de este tipo de celdas dependerá del tipo de reactor y de la fuente de materia orgánica que se utilice (Logan y Regan, 2006).

El tipo de agua que se analizó en éste trabajo son aguas residuales municipales. Cabe mencionar que para la preservación y administración del agua en México, se cuenta con la Comisión Nacional del Agua, que clasifica las descargas de aguas residuales en dos categorías: municipales e industriales. Las municipales corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado urbanos y rurales, las segundas son aquellas descargadas a los cuerpos receptores de propiedad nacional (Comisión Nacional del Agua, 2015).

La importancia de aprovechar la bioenergía contenida en el agua residual y que como resultado se realice una biorremediación del agua es debido a que en los últimos años en México se recolectaron  $211 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas residuales municipales, y solamente se tratan  $111.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , es decir, sólo se trató el 52.8 %. También se trataron  $65.6 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas residuales industriales, de donde se destaca que Tamaulipas solo trató  $7.72 \text{ m}^3/\text{s}$  (Comisión Nacional del Agua, 2015).

Las CCMs no solo sirven para producir electricidad, sino que también se le puede usar en procesos de biorremediación, que es la remoción de contaminantes por medio de microorganismos, de suelos y aguas subterráneas. Las bacterias al ser también capaces de aceptar electrones, éstas reproducen reacciones para remover o degradar contaminantes (Falcon *et al.*, 2009).

Por la importancia que representa utilizar una tecnología alternativa para la generación de energía eléctrica en México, aunado a que del uso de las CCMs se podría dar un tratamiento a las aguas residuales, éste trabajo sirve para identificar en qué tipo de agua residual es más factible el uso de una CCM para generar energía que alimente sensores ambientales de baja potencia eléctrica y además que se pretende dar continuidad, para determinar en un futuro, el nivel de biorremediación del agua residual.

### Justificación

En México se está impulsando el desarrollo y uso de las energías renovables e invirtiendo en los procesos de producción de energías sostenibles, ya que el consumo de energía eléctrica es una necesidad cada día más imperante. A pesar de las diferentes formas de producirla, sigue siendo un reto disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y los impactos ambientales que causan cada una de las distintas formas de producción.

Por lo tanto, es innegable la necesidad de desarrollar, adaptar tecnologías alternativas de generación de energía menos contaminantes. Tales tecnologías deben tener la capacidad de operar con combustibles no convencionales, que no estén relacionados con el petróleo. Por lo anterior, en este trabajo se propone la generación de energía eléctrica a partir de la bioenergía contenida en aguas residuales, usando una tecnología alternativa (CCM), que utiliza la biomasa como combustible.

### Problema

El incremento en la demanda de la energía eléctrica en México, trae como resultado que se busquen otras alternativas a los métodos convencionales de generación de electricidad, ya que el uso de los combustible fósiles ha creado diversos problemas de contaminación ambiental. Por lo anterior es muy importante generar energía eléctrica a partir de otras alternativas que no utilicen combustibles derivados del petróleo. Una opción para resolver esta problemática es aprovechar la bioenergía contenida en las aguas residuales para generar energía usando la tecnología de una celda de combustible microbiana.

### Hipótesis

Aprovechando la bioenergía contenida en aguas residuales se usará una CCM, para generar energía eléctrica, ya que son una alternativa a métodos convencionales de generación de electricidad.

### Objetivos

#### Objetivo General

Generar de energía eléctrica a partir de aguas residuales usando una celda de combustible microbiana.

### Objetivos específicos

- Construir una celda de combustible microbiana de un solo compartimiento.
- Muestrear aguas residuales de diferentes actividades antropogénicas.
- Medir el voltaje eléctrico al agua residual.

### Marco Teórico

Liu, *et al* en el 2004, produjeron energía eléctrica durante el tratamiento de aguas residuales usando una celda de combustible microbiana de una sola cámara de material plexiglas, teniendo como ánodo ocho electrodos de grafito, un cátodo de carbón/platino y como catalizador una Membrana de Intercambio Protónico (PEM).

Du, Z., Li, H. and Gu, T., 2007, realizaron un estado del arte de revisión de las Celdas de Combustible Microbianas, considerándolas como una tecnología para el tratamiento de agua residual y aprovechamiento de bioenergía. Estos autores presentan que la cantidad de energía producida por las celdas, es afectada por diversos factores como: el tipo de microorganismos en la cámara anódica, por el diseño de configuración de la celda y por las condiciones de operación.

Sacco, *et al.*, 2008, obtuvieron generación de electricidad en una Celda de Combustible Microbiana, utilizando Micro-ánodos Descartables, ya que eran de un diminuto tamaño de 27 microlitros, y se diseñó utilizando materiales de bajo costo; las bacterias que se utilizaron fueron *Escherichia coli*.

Alzate-Gaviria, *et al.*, 2008. emplearon una celda de combustible microbiana a escala de laboratorio para la generación de electricidad. La celda consistió de dos cámaras separadas por una membrana de intercambio protónico (PEM).

Utilizaron electrodos de papel carbón y un cátodo acuoso burbujeado con aire para proveer O<sub>2</sub> disuelto al electrodo. La generación de potencia en la CCM, se debió a la presencia de bacterias como biocatalizadores en la cámara del ánodo. Las bacterias fueron obtenidas de un inóculo mixto anaerobio de tipo entérico, empleando agua residual sintética como sustrato.

Sathish-Kumar *et al* 2009, realizaron pruebas de desempeño de ciertas bacterias para generar electricidad usando una CCM. Demostraron que las bacterias: *acetobacter acetii* y *gluconobacter roseus*, no necesitan un mediador para transferir electrones.

Cercado, *et al.*, 2010, obtuvieron electricidad a partir de residuos alimenticios e industriales, usando una CCM. El origen de los residuos eran de jugo de manzana fermentado, de la industria del vino y del yogurth, éstos se combinaron con dos fuentes de inóculos: lodos anaeróbicos y composta de jardín.

Buitrón y Pérez, 2011, hicieron un trabajo de producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual, estudiando el efecto de la distancia entre electrodos y la eliminación de la materia orgánica en el agua residual usando una CCM.

Li, 2013, realizó un estudio experimental de las CCMs para generar de electricidad, revisando diversas características de las muestras que se analizaban y el tamaño de las cámaras anódicas y catódicas de la celda. Encontró que a mayor cantidad de materia orgánica en las muestras contenidas en las cámaras, mayor generación de energía se obtenía, concluyendo que la producción de electricidad en éste tipo de celdas, puede incrementar si se selecciona correctamente el tipo de muestra, la temperatura y el tamaño de las cámaras.

Revelo, *et al.*, 2013, presentan y discuten los aspectos más importantes que inciden en el desempeño de una celda de combustible microbiana, tales como su arquitectura, la función microbiana y el tipo de sustratos, además determinan que las Celdas de combustible microbianas, son un reto para la remoción de materia orgánica (biorremediación) y para la generación de energía eléctrica.

### Metodología

#### Origen de las muestras de agua residual

Se midió la energía eléctrica generada en tres tipos de agua residual de diferente origen: domésticas (Universidad), pluviales y de criaderos de peces. La energía producida en éstas, se midió con el voltaje eléctrico (milivolts/mV), en una CCM de una sola cámara anódica con grafito como ánodo. Los tipos de agua residual estudiados, entran en la clasificación de aguas residuales municipales.

#### Agua residual doméstica

La muestra se tomó del agua residual proveniente de los laboratorios de la Universidad Politécnica de Altamira, en Tamaulipas.

#### Agua residual pluvial

El agua de este origen se recolecta en un canal pluvial ubicado en la colonia solidaridad, voluntad y trabajo, se encuentra en la división de los municipios de Tampico y Altamira, Tamaulipas.

#### Agua residual de criadero de peces

Ésta agua proviene de un criadero de peces, ubicado en Tampico, y la muestra se tomó en un punto de desagüe del estanque del criadero de peces.

### Colecta y preservación de las muestras

Se tomaron de 1.5 L de las muestras de agua en botellas de plástico y posteriormente se mantuvieron a temperatura de 3°C (Cercado, *et al.*, 2010).

### Diseño y elaboración de las celdas de combustible microbianas

Se usó el diseño de una CCM de un solo compartimento, de cámara anódica con material de arcilla (ya no es necesaria la cámara catódica, el cátodo se expone al aire) y se tomó como referencia los diseños descritos por Du, *et al.*, 2007 y Liu, *et al.*, 2004.

Los materiales para la realización de la celda son:

1. Un recipiente de arcilla para la cámara anódica (grosor recomendado: 3 a 4 mm).
2. Una lija
3. Varilla de grafito
4. Malla de acero inoxidable
5. Carbón activado y polvo de grafito grado reactivo en polvo
6. Esmalte de uñas transparente de alta duración como aglutinante (80mg/cm<sup>2</sup>). Que contenga : Toluenosulfonamina
7. Cinta de aislar
8. Alambre de cobre delgado

Para la elaboración de la CCM, se realiza lo siguiente.

1. Se lija el recipiente de barro para que exista mayor superficie de contacto

2. Se cubre el recipiente con la malla de acero inoxidable con el alambre de cobre, que actuá como cátodo (Figura 1).



**Figura 1** Celda de combustible, armada con recipiente de arcilla y recubierta con malla de acero inoxidable y cobre.

Elaboración propia.

3. Se pesan el carbón activado y el grafito pulverizados. Sacar el área que ocupa el recipiente (sin considerar la base y la tapa), para determinar la cantidad de carbón y grafito a utilizar, en base a la siguiente relación  $=15\text{mg}/\text{cm}^2$ . Se utilizan como catalizador al cátodo.
4. Una vez pesado el carbón y el grafito, se realiza una mezcla agregándole el esmalte con la siguiente relación  $=80\text{mg}/\text{cm}^2$  (considerar nuevamente el área superficial del recipiente).
5. Cubrir la parte exterior del recipiente de arcilla con la mezcla anterior (Figura 2).



**Figura 2** Celda de combustible recubierta con la mezcla de aglutinante con carbón activado y grafito.

Elaboración propia.

6. Posteriormente dejar que se sequé perfectamente.
7. Utilizar como ánodo una varilla de grafito.
8. Agregar  $\frac{3}{4}$  partes del volumen del recipiente con las muestras de agua residual.

### Determinación de la generación de energía

Para la determinación de la energía sustentable producida por la CCM, se utilizaron las muestras de agua residual y la medición del voltaje eléctrico se obtuvo de manera. Para la obtención de los resultados se utilizo un multímetro UT55 que midió el voltaje eléctrico en milivolts (mV) generado en la CCM.

El procedimiento para la medición se representa en la figura 3 y se llevo acabo de la siguiente manera:

1. Identificar el ánodo y cátodo en la CCM.
2. Conectar los caimanes con la polaridad correcta.
3. Poner en contacto los caimanes con el ánodo (varilla de grafito) y el cátodo (malla de acero inoxidable con alambre).
4. Realizar la lectura en el multímetro en corriente directa en el intervalo de milivolts.



**Figura 3** Mediciones de voltaje eléctrico en la celda de combustible microbiana en las muestras de agua residual.

Elaboración propia.

### Resultados

Se obtuvo una CCM, con un diseño viable y económico, que permitió realizar las mediciones de energía de las muestras de agua residual.

Con el objetivo de obtener las mediciones de voltaje eléctrico con mayor nivel de confianza, por cada valor registrado se tomaron 5 veces las lecturas en diferentes minutos (tabla 1, 2 y 3).

t/min	V/mV
1	853
2	848
3	775
4	823
5	830
Promedio	825.8

**Tabla 1** Mediciones de voltaje eléctrico en el agua residual de la UPALT.

Elaboración propia.

t/min	V/mV
1	302
2	312
3	329
4	330
5	319
Promedio	318.4

**Tabla 2** Mediciones de voltaje eléctrico en agua residual pluvial.

Elaboración propia.

t/min	V/mV
1	913
2	917
3	922
4	928
5	931
Promedio	922.2

**Tabla 3** Mediciones de voltaje eléctrico en el agua residual de criadero de peces.

Elaboración propia.

### Conclusiones

Se obtuvieron voltajes de energía de 302 mV a 931 mV, resultando con valores más altos de voltaje eléctrico el agua residual de criadero de peces, considerando que la fuente de materia orgánica de éstas muestras proviene de los residuos de los peces y los más bajos voltajes provienen del agua residual del canal pluvial, ya que éste es un punto de captación de agua de lluvia de una colonia.

Se concluye que todos los tipos de agua residual analizados, presentaron potencial para suministrar energía a sistemas electrónicos de bajo consumo y que las celdas de combustible microbianas son una alternativa a métodos convencionales de generación de electricidad, para aplicaciones a pequeña escala. Un factor clave en el diseño de una CCM, es la selección de la fuente que se utilizará para la alimentación de la celda (Cercado *et al*, 2010), por lo que en este trabajo se demostró que el agua residual es una buena fuente para producir energía directamente usando una CCM y respalda lo propuesto por Erable *et al*, 2009, Liu *et al* 2004 y Rezaei *et al* 2007, que las más comunes fuentes de microorganismos electroactivos de acuerdo a los estudios realizados, han sido, las aguas residuales, lodos anaerobios, activados y sedimentos marinos.

Las aguas residuales utilizadas generan energía a baja escala, lo que confirma lo descrito por Sacco, 2008, que las celdas de combustible microbianas son una alternativa a métodos convencionales de generación de electricidad, para aplicaciones a pequeña escala, en algunos trabajos se describen aplicaciones asociadas a sistemas electrónicos de bajo consumo (Du *et al*, 2007), como sensores ambientales, que podrían ser instalados en algunos puntos de las descargas de las muestras y que además de proporcionar información de parámetros físicos, también podrían biorremediar el agua residual, ya que las celdas de combustible microbianas, no solo sirven para producir electricidad, sino que también se pueden usar en procesos de bio-remediación, que es la remoción de contaminantes por medio de microorganismos, de suelos y aguas subterráneas (Falcón, Lozano y Juárez, 2009). Por lo anterior, se puede dar continuidad a éste, pero ahora determinando el nivel de biorremediación que podrían tener el agua residual.

## Referencias

- Alzate-Gaviria, L., Fuentes-Albarran, C., Álvarez-Gallegos, A., y Sebastián, P.J., (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. *Revista Interciencia*. Vol. 33. No. 7.
- Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, Volumen 14 (1), 5-11pp.
- Cercado Quezada, B. and Délia, Marie-Line and Bergel, Alain (2010) Testing various food-industry wastes for electricity production in microbial fuel cell. *Bioresource Technology* pp. 2748-2754. ISSN 0960-8524.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Estadísticas del agua en México.
- Du, Z., Li, H. and Gu, T., (2007). A state of the art: Review on Microbial Fuel Cells: A Promising Technology for Wastewater Treatment and Bioenergy". *Biotechnology Advances*, Vol. 25, No. 5, 2007, 464- 482 pp.
- Erable, B., Etcheverry, L., Bergel, A., (2009). Increased power from a two-chamber microbial fuel cell with a low-pH air cathode compartment. *Electrochem Commun.* Vol. 11, 619–622 pp.
- Estrada Gasca, C., y Samperio Islas, J., (2010). Energías alternas: propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México (Primera ed.). Academia Mexicana de Ciencias.
- Falcon, A., Lozano E., J., & Juárez, K., (2009). Bioelectricidad. *BioTecnología*, 13 (3).
- Hernández- Sampieri, R., Fernández-Collado, Carlos y Baptista-Lucio, P., (2006). *Metodología de la investigación*. 4ª Edición. Ed. Mc Graw Hill. ISBN 970-10-5753-8.

Li J., (2013). An Experimental Study of Microbial Fuel Cells for Electricity Generating: Performance Characterization and Capacity Improvement. *Journal of Sustainable Bionergy Systems*. 3: 171-178pp.

Liu, H., Ramnarayanan, R., Logan, B., (2004). Production of electricity during Wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environmental Science Technology*. Volumen 38, No.7. 2281-2285 pp.

Logan B.E. y Regan J. M., (2006). Microbial fuel cells: Challenges and applications. *Environmental Science & Technology*. 40: 5172-5180 pp.

Masera-Cerutti, O., Coralli, F., García-Bustamante, C., Riegelhaupt, E., Arias-Chalico, T., Vega-Gregg, J., Díaz- Jiménez, R., Guerrero-Pacheco, G. Y Cecotti. L., (2011). La bioenergía en México. Situación actual y perspectivas. Cuaderno Temático No.4. Red Mexicana de Bioenergía, A.C. [www.rembio.org](http://www.rembio.org).

Ramos-Gutiérrez, L., y Montenegro-Fragoso, M. (2012). La generación de energía eléctrica en México. *III* (4), 197-211 pp.

Rabaey, K., Rodriguez, J., Blackall, L.L., Keller, J., Gross, P., Batstone, D., Verstraete, W., Neelson, K.H., (2007). Microbial ecology meets electrochemistry: electricity- driven and driving communities. *ISME J*. Vol. 1, 9–18 pp.

Revelo M., D., Hurtado H., N., & Ruiz O., J. (2013). Celdas de combustible microbiana (CCMs): un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información tecnológica* , Volumen 24(6) 17-28pp.