



## Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

### **Establecimiento de la generación basal de electricidad en una celda de combustible microbiana a escala piloto operando con microorganismos presentes en composta**

### **Basal electricity generation in a pilot microbial fuel cell operating with microorganisms from compost**

Cupil-Ulloa, L.M.<sup>a</sup>, Hernández-Hernández, D.<sup>a</sup>, Contreras-Bustos, R.<sup>b</sup>, Cercado, B.<sup>b</sup>.

<sup>a</sup>Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco, Tabasco.

<sup>b</sup>Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S. C.

Correo de autor en correspondencia: [bcercado@cideteq.mx](mailto:bcercado@cideteq.mx) (B. Cercado)

Parque Tecnológico Querétaro s/n Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro. CP 76703. México.

**Innovación tecnológica:** Generación de electricidad por microorganismos de composta.

**Área de aplicación industrial:** Generación de energía alternativa a partir de efluentes industriales. Remoción de materia orgánica en efluentes. Reducción del consumo de energía requerida en plantas de tratamiento de aguas.

#### **Resumen**

El objetivo del presente trabajo fue determinar la potencia base de una celda de combustible microbiana (CCM) a escala piloto, mediante el uso de microorganismos electroquímicamente activos presentes en lodos de composta. Se utilizó una celda rectangular de 218 L en volumen útil con electrodos de carbono de 0.25 m<sup>2</sup>. La celda fue inoculada y alimentada con lodos de composta, el desempeño en potencia se determinó por curvas de polarización. El voltaje máximo de circuito abierto fue 42.7 mV, mientras que la máxima potencia producida con la materia orgánica presente en el lodo de composta fue de 23.6 x 10<sup>-6</sup> W con una resistencia de 33 Ω. La celda operó durante 12 días sin alimentación de combustible o nutrientes para los microorganismos. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de utilizar microorganismos provenientes de composta para generar electricidad en una CCM, la cual puede ser alimentada con aguas residuales de origen industrial para la remoción simultánea de materia orgánica.

**Palabras clave:** biotecnología, celda de combustible microbiana, electricidad, energías alternativas.

## Abstract

The aim of the present work was to determine the basal power in a pilot scale microbial fuel cell (MFC) by using electrochemically active microorganisms present in compost sludge. A 218 L rectangular electrochemical cell, equipped with 0.25 m<sup>2</sup> carbon electrodes, was used. The electrochemical cell was inoculated and fed with compost sludge; the power performance was determined by polarization curves. The maximum open circuit voltage was 42.7 mV, and the maximum power output from the organic matter in the compost leachate was 23.6 x 10<sup>-6</sup> W with an external resistance of 33 Ω. The cell was operated for 12 days with no addition of fuel or nutrients for the microorganisms. The results show the feasibility of using microorganisms from compost to operate a MFC, which in turn could be fed with industrial wastewater for simultaneous organics removal.

**Key Words:** alternative energies, biotechnology, electricity, microbial fuel cell

## 1. Introducción

El constante crecimiento poblacional así como las diversas actividades humanas han resultado en un incremento de los requerimientos energéticos. El suministro de energía se ha convertido en un reto con matices para cada región del mundo. Entre las diversas alternativas tecnológicas para obtener energía distinta de la que suministra el petróleo, se encuentra la explotación de la energía química contenida en la materia orgánica de desecho.

Los efluentes y los residuos sólidos orgánicos provenientes de procesos industriales han sido utilizados para producir biogás en digestores anaerobios, hidrógeno por fermentaciones, y en los últimos años se ha propuesto una tecnología híbrida que acopla reactores biológicos con celdas electroquímicas para obtener electricidad.

Los sistemas bioelectroquímicos microbianos son alimentados con aguas residuales, y la materia orgánica es oxidada por microorganismos que se encuentran adheridos en forma de biopelícula sobre electrodos. Durante la oxidación de la materia orgánica se generan electrones y

protones; los electrones recorren un circuito externo desde el ánodo hacia el cátodo para generar una corriente eléctrica. Mientras que los protones atraviesan una membrana selectiva para combinarse sobre el cátodo con un oxidante como el oxígeno resultando en la formación de agua.

Cuando la distancia entre los dos electrodos es elevada, no se requiere una membrana selectiva pues las reacciones que ocurren en cada electrodo están suficientemente separadas para diferenciarse en oxidación y reducción. Este principio se aplica en las CCMs instaladas en sedimentos marinos, pero también puede aplicarse a celdas de volumen mayor al utilizado a escala laboratorio bajo ciertas restricciones.

En CCMs a escala laboratorio en operación sin membrana, la potencia de salida se ve disminuida porque al no estar separados el ánodo y el cátodo, o los compuestos que se oxidan y se reducen, las reacciones ocurren indistintamente sobre los electrodos y no hay una corriente neta. A fin de mantener las reacciones redox diferenciadas, se han utilizado estrategias que promueven la reducción del oxígeno en el cátodo, tales como el uso de películas conductoras y catalizadores metálicos. En una celda de 170 mL se ha llegado a producir 86 mW m<sup>-2</sup> a

partir de agua residual de la industria cervecera (Zhuang 2009).

Otra estrategia es la aireación forzada del cátodo. Una celda de 10 cm de diámetro, 100 cm de altura total y alimentada a una tasa de  $1.83 \text{ mL min}^{-1}$  con agua residual sintética recibió una aireación de  $100 \text{ mL min}^{-1}$  en la zona del cátodo. La aireación provocó aumento de corriente de 1.25 a 2.5 mA ( $62.5 \mu\text{W}$ ) (Jang et al. 2004).

Por otra parte, la separación entre los electrodos es un factor crítico en las CCMs sin membrana ya que además de permitir la diferenciación de las reacciones redox, debe mantener un campo eléctrico homogéneo, el cual a su vez es resultado de la cercanía entre los electrodos. Existen reportes del efecto de la distancia que separa a los electrodos en el desempeño de la CCM.

Du et al. (2008) en una celda de 10 cm de diámetro y 60 cm de altura total, observaron que una disminución de la distancia entre los electrodos de 30 cm a 10 cm provocó una reducción en el potencial de 190 mV a 130 mV. Esta observación se atribuyó a un mayor gradiente de oxígeno disuelto entre el ánodo y el cátodo con aireación forzada, lo cual a su vez afectó negativamente el metabolismo de microorganismos anaerobios en el ánodo y desvió el flujo de electrones de ser transferidos al electrodo a ser capturados por el oxígeno.

No obstante, un comportamiento contrario fue observado por Ghangrekar et al. (2007). En una celda de 15 cm de diámetro, 65 cm de altura efectiva y alimentada con agua sintética se encontró que la distancia entre electrodos fue inversamente proporcional a la potencia generada. Distancias de 28, 24 y 20 cm resultaron en densidades de potencia de 7.4, 8.6 y  $10.9 \text{ mW m}^{-2}$  respectivamente.

Las capas de materiales que se utilizaron como separadores para substituir la membrana selectiva y la mayor distancia entre electrodos posiblemente perturbaron el campo eléctrico y aumentaron la resistencia óhmica de la celda.

Otros diseños de celdas electroquímicas microbianas sin la instalación de membrana selectiva han sido reportados en volúmenes de 50 mL hasta 10 L (Gil Carrera et al. 2013). Sin embargo, los reportes de celdas a escala piloto son escasos, lo cual refleja la necesidad de generar resultados experimentales que permitan posteriormente el modelado de CCMs a esta escala.

Aún cuando es un reto cubrir los requisitos técnicos de una CCM sin membrana, las ventajas de esta configuración recaen en la reducción de la resistencia interna, la eliminación de los costos de instalación, y la substitución de catalizadores metálicos en el cátodo por la formación de biocátodos.

La producción de electricidad en una CCM depende de múltiples factores, no obstante se ha observado que las CCMs han sido aplicadas en el tratamiento de aguas de diversos orígenes, obteniendo densidades de potencia entre  $0.5$  a  $3 \text{ W m}^{-2}$  y voltajes de hasta 800 mV (Logan y Rabaey, 2012).

Para que la tecnología de las CCMs pueda acoplarse a trenes de tratamiento de agua, se requiere realizar pruebas de concepto en escalas mayores a las de laboratorio que permitan determinar la factibilidad de operación y las limitaciones a resolver durante la instalación y operación.

El objetivo del presente trabajo fue establecer el nivel basal de electricidad producida por una CCM, a escala piloto, inoculada y alimentada con lodos de composta, para realizar estudios futuros de alimentación con efluentes industriales. La

importancia de esta investigación radica en la generación de antecedentes prácticos de escalamiento de CCMs para su futuro desarrollo y mejoras.

## 2. Materiales y equipo

La celda electroquímica fue construida en fibra de vidrio, con dimensiones de 0.9 m x 0.7 m x 0.58 m de largo, ancho y alto respectivamente. El volumen total de la celda fue de 369 L y el volumen útil fue de 218 L. El ánodo y el cátodo fueron conformados por placas de carbón grafito tipo GSP-250 de ½ in y 50 cm x 50 cm (Brunssen, México). Los electrodos fueron sometidos a un procedimiento de limpieza previo a la operación de la celda, el cual consistió en la remoción de partículas gruesas con lima del No. 0 y lavado en una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 M en agua destilada, seguido de varios enjuagues con agua destilada hasta que el pH del agua de lavado fuera cercano a 7.

Los electrodos fueron conectados externamente entre sí mediante pinza de cobre y alambre de cobre (16 AWG, 1.31 mm<sup>2</sup>, 600 V), evitando el contacto con el medio líquido de la celda. Los electrodos se colocaron en las paredes de la celda separados por una distancia de 0.88 m.

A fin de favorecer la presencia de oxígeno en el cátodo se colocó un distribuidor de aire entre la pared de la celda y la placa de carbón que conformaba el electrodo.

La fuente de microorganismos electroquímicamente activos fue composta de jardín (Nutrigarden 50% tierra negra, 50% abono de borrego), la cual fue mezclada con agua de la llave en proporción 2:3. Se utilizó NaCl como electrolito base en concentración 0.1 M en el medio.

El voltaje generado por la celda y las variaciones de voltaje durante los cambios de resistencias externas se midieron con un multímetro de alta impedancia MUL-600 (Steren).

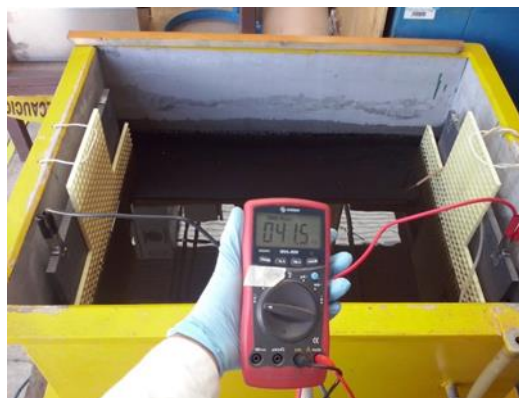
## 3. Métodos experimentales

La CCM fue operada a temperatura ambiente, con pulsos de aireación de 30 minutos cada 24 h. Se realizó una agitación manual del medio cada 24 h.

El voltaje de circuito abierto de la CCM se midió cada 24 h y se realizaron curvas de polarización con resistencias externas en el intervalo de 1 a 33200 Ω. El tiempo de estabilización entre cada valor de resistencia externa fue de 2 min.

La resistencia interna de la celda y sus variaciones en el tiempo fueron estimadas por el cálculo de la pendiente en las curvas E vs I, donde E es el potencial de celda e I es la corriente generada a un valor determinado de resistencia externa.

La CCM operó durante 12 d con única fuente de carbono y nutrientes la materia orgánica presente en el lodo de composta (Figura 1).

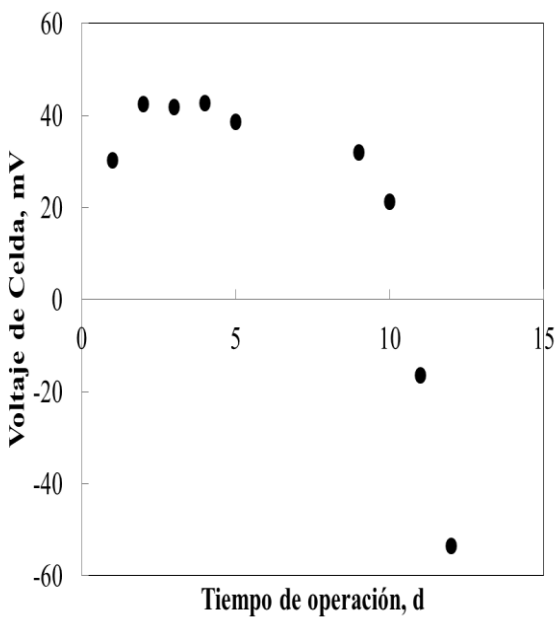


**Figura 1.** Celda de combustible microbiana a escala piloto operada con ánodo y cátodo de carbón grafito, inoculada y alimentada con lodos de composta.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

El potencial de la CCM a resistencia de  $33200 \Omega$  fue tomado como valor representativo del potencial de circuito abierto. El voltaje alcanzó un valor estable dentro de los primeros cinco días de operación, sin embargo posteriormente disminuyó hacia valores negativos. Este comportamiento indicó que las reacciones de oxidación en el ánodo y de reducción en el cátodo se invirtieron de forma que el voltaje de la celda fue negativo (Figura 2).

Debido a este comportamiento, la descripción detallada del desempeño de la celda se reporta del día 1 al 10 únicamente.



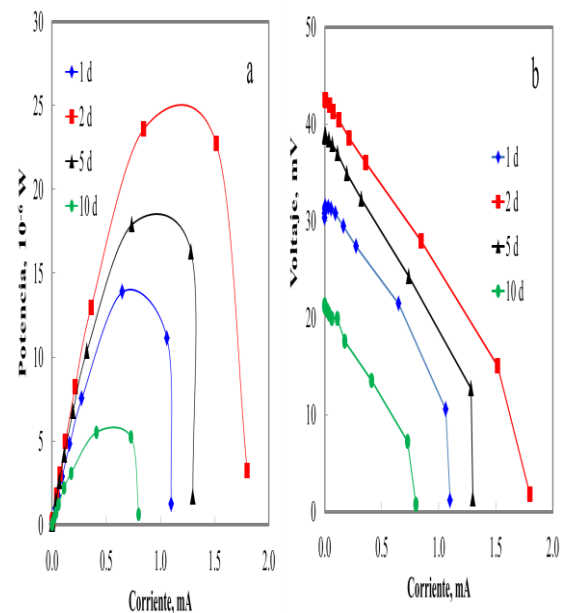
**Figura 2.** Evolución del voltaje de la CCM inoculada y alimentada con lodos de composta a lo largo de 12 días de operación.

El cambio de resistencia interna de la celda en el tiempo fue originado por la formación de biopelícula sobre los electrodos y por el cambio en la composición del medio. La resistencia de la celda varió de  $20 \Omega$  en el

día 1 a  $17.5 \Omega$  en el día 3. Posteriormente la resistencia tuvo variaciones sin relación evidente con el desempeño general de la celda.

Los valores de resistencia interna observados se encuentran en el intervalo bajo reportado para CCMs. Este comportamiento se atribuyó a la adición del electrolito soporte que facilitó la movilidad de iones en el medio reduciendo así la resistencia óhmica pero principalmente por la ausencia de membrana de intercambio de iones (Leong et al. 2013).

Las curvas de polarización mostraron que la máxima potencia alcanzó un valor de  $23.6 \times 10^{-6} \text{ W}$  con  $33 \Omega$  de resistencia externa. De forma general, la potencia de la CCM aumentó rápidamente en los primeros dos días, y posteriormente fue disminuyendo de forma paulatina. En la Figura 3 se muestran como ejemplo las curvas de polarización para los días 1, 2, 5 y 10.



**Figura 3.** Evolución del desempeño de la CCM inoculada y alimentada con lodos de composta. a) Curvas de potencia, b) Curvas de polarización. Anodo y cátodo en placa de carbón grafito de  $A = 0.25 \text{ m}^2$ .

A fin de comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo con reportes de otros autores, se calcularon la densidad de potencia y la densidad de corriente considerando el área proyectada de las placas de electrodo. Los valores de ambos parámetros se listan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Desempeño de la CCM inoculada y alimentada con lodos de composta determinado como máxima densidad de potencia y de corriente a lo largo del periodo de operación.

Tiempo de operación (d)	Máxima densidad de potencia ( $\mu\text{W m}^{-2}$ )	Máxima densidad de corriente ( $\text{mA m}^{-2}$ )
1	56	4.4
2	91	7.2
3	88	5.2
4	88	5.7
5	72	5.2
9	55	5.2
10	22	3.2

La máxima densidad de potencia a partir de los lodos de composta sin adición de otra fuente de carbono, es decir el desempeño basal de la CCM fue de  $91 \mu\text{W m}^{-2}$  ( $104 \mu\text{W m}^{-3}$ ) se encuentra en el intervalo bajo de magnitud, aunque se debe considerar que el lodo de composta tuvo la función tanto de inóculo como de sustrato, siendo éste último el factor limitante. En caso contrario, cuando desechos con proporción mayor de nutrientes que de microorganismos son utilizados tanto como inóculo y sustrato se puede obtener un mejor desempeño.

Goud et al. (2011) reportan el uso de la fracción orgánica de residuos sólidos sin fuente de inóculo adicional en una CCM de 0.5 L. Los electrodos de la celda fueron placas de grafito de 5 cm x 5 cm. El potencial de circuito abierto fue de 100 a 280 mV y la densidad de potencia fue función de la carga orgánica, variando entre 10 y  $100 \text{ mW m}^{-2}$  medida por curva de polarización.

Por lo tanto, se puede esperar que la CCM basada en lodos de composta producirá una mayor densidad de potencia en la medida en que sea alimentada con materia orgánica presente en efluentes.

Por otra parte, las CCMs en las que se han utilizado electrodos volumétricos, por ejemplo en cámaras empacadas con electrodos tipo cepillo y carbón en forma de partículas, la potencia volumétrica se reporta desde  $0.5 \text{ W m}^{-3}$  hasta  $500 \text{ W m}^{-3}$  (Biffinger y Ringeisen, 2008). Esta información indica que la potencia de salida podría ser aumentada considerablemente al utilizar electrodos volumétricos ya que éstos proporcionan una mayor relación área de electrodo para desarrollo de biopelícula electroactiva en relación al volumen útil del reactor.

La operación prolongada de la celda sin membrana produjo una inversión de las reacciones de oxidación y reducción sobre los electrodos. Este fenómeno parece ser perjudicial para el desempeño de la CCM, sin embargo en tanto se mantenga un flujo de corriente entre los electrodos, es posible asumir que la celda cumple la función de convertir la energía de la materia orgánica en energía eléctrica.

Las causas de la inversión de polaridad podrían deberse a la aireación pulsada. Se siguió esta estrategia para suministrar un aceptor de electrones en la zona del cátodo sin saturar el medio en oxígeno en la zona cercana al ánodo y crear un gradiente de concentración de oxígeno. Pero la inversión de los electrodos sugiere que las reacciones de oxidación fueron favorecidas en la zona con aireación forzada por causas que por el momento se desconocen.

Este trabajo muestra que la investigación básica y aplicada en CCMs debe cubrir aún

aspectos en electroquímica, microbiología e ingeniería, pero al mismo tiempo se demuestra la factibilidad de operar CCMs a mayores escalas que las de laboratorio para su aplicación industrial.

## 5. Conclusión

La posibilidad de obtener energía eléctrica simultáneamente a la remoción de contaminantes en CCMs, y la flexibilidad de utilizar diversas fuentes de microorganismos y materia orgánica, hacen esta tecnología altamente prometedora para formar parte de los trenes de procesos de tratamiento de aguas.

Para acercar el desarrollo de las CCMs a su aplicación real, se requieren estudios en celdas de mayor volumen al empleado en laboratorio. En este trabajo se realizó la prueba de concepto de una CCM a escala piloto con una capacidad de volumen útil de 218 L. Se mostró la factibilidad de instalar y operar una celda sin membrana utilizando microorganismos electroactivos provenientes de lodos de composta. La materia orgánica en la composta permitió una potencia basal de  $23.6 \times 10^{-6}$  W con una resistencia de 33  $\Omega$ , lo cual sugiere que la CCM es susceptible de generar una mayor potencia al ser alimentada con materia orgánica presente en aguas residuales.

La celda fue operada sin membrana selectiva, lo cual resultó en una resistencia interna de 17.5  $\Omega$ . Estos resultados serán la base para continuar el desarrollo y mejoras de CCMs para aplicación en el tratamiento de efluentes industriales y la generación simultánea de energía eléctrica.

## 6. REFERENCIAS

[1] Biffinger J.C., Ringeisen B.R. Patents engineering microbial fuel cells:

Recent Patents and new directions. Recent patents on Biotechnology. 2008;2:150-155.

[2] Du Z., Li Q., Tong M., Li S., Li H. Electricity generation using membrane-less microbial fuel cell during wastewater treatment. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2008;16(5):772-777.

[3] Ghangrekar M.M., Shinde V.B. Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production. Bioresource Technology. 2007;98(15):2879-2885.

[4] Gil-Carrera L., Escapa A., Mehta P., Santoyo G., Guiot S.R., Moran A., et al. Microbial electrolysis cell scale-up for combined wastewater treatment and hydrogen production. Bioresource Technology. 2013;130:584-91.

[5] Goud R.K., Mohan S.V. Pre-fermentation of waste as a strategy to enhance the performance of single chambered microbial fuel cell (MFC). International Journal of Hydrogen Energy. 2011;36(21):13753-62.

[6] Jang J.K., Pham T.H., Chang I.S., Kang K.H., Moon H.S., Cho K.S., Kim B.H. Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. Process Biochemistry. 2004;39:1007-1012.

[7] Leong J.X., Daud W.R.W., Ghasemi M., Ben Liew K., Ismail M. Ion exchange membranes as separators in microbial fuel cells for bioenergy conversion: A comprehensive review. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2013;28:575-87.

[8] Logan B.E., Rabaey K. Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals

by using microbial electrochemical technologies. *Science*. 2012;337(6095):686-90.

[9] Zhuang L., Zhou S.G., Wang Y.Q., Liu C.S., Geng S. Membrane-less cloth cathode assembly (CCA) for scalable microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*. 2009;24:3652–3656.

### **Agradecimientos**

L.M. Cupil-Ulloa recibió una beca de estancia de investigación otorgada por el Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco, Tabasco. D. Hernández-Hernández recibió una beca de estancia de investigación por la Academia Mexicana de Ciencias. Parte de este trabajo fue financiado por el proyecto 177441 del Fondo SEP-CONACYT.