

GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA TIPO PEM

LILIANA ALZATE-GAVIRIA, CARMEN FUENTES-ALBARRÁN, ALBERTO ÁLVAREZ-GALLEGOS y P. J. SEBASTIAN

RESUMEN

Se empleó una celda de combustible microbiana (CCM) a escala de laboratorio para la generación de electricidad. La celda consistió de dos cámaras separadas por una membrana de intercambio protónico (PEM). Se utilizaron electrodos de papel carbón y un catolito acuoso burbujeado con aire para proveer O_2 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 (ARS) como sustrato. Se determinó la influencia de la temperatura y el pH sobre el rendimiento de la CCM, encontrando que la mayor densidad de potencia fue generada a temperatura mesofílica de $35 \pm 5^\circ C$ y pH entre 5 y 6. Empleando resistencias de 600 y 1000Ω se obtuvieron densidades de 640 y $336 mW \cdot m^{-2}$, respectivamente. La eficiencia coulombica obtenida fue de 59,8%. Este tipo de sistemas resultan atractivos para la generación de electricidad y a la vez para la degradación de la fracción orgánica.

El concepto de microorganismos usados como catalizadores en celdas de combustibles microbianas (CCM) fue explorado desde los años 70 y 80 (Suzuki, 1976; Roller *et al.*, 1984). La CCM utilizada para tratar agua residual doméstica fue introducida por Habermann y Pommer (1991). Sin embargo, recientemente han vuelto a ser dispositivos atractivos para generar electricidad desarrollando oportunidades para aplicaciones prácticas (Schröder, 2003; Liu y Logan, 2004; Liu *et al.*, 2004).

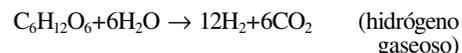
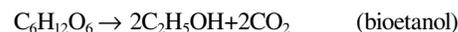
Una CCM convierte un sustrato biodegradable directamente a electricidad. Esto se consigue cuando las bacterias, a través de su metabolismo, transfieren electrones desde un donador, tal como la glucosa, a un aceptor de electrones. En una CCM las bacterias no transfiere-

ren directamente los electrones producidos a su aceptor Terminal, sino que éstos son desviados hacia el ánodo (Figura 1). Esta transferencia puede ocurrir de varias formas, bien sea a través de la membrana celular o a partir de un mediador soluble, y los electrones fluyen a través de un circuito externo (Rabaey *et al.*, 2003).

Las CCM tienen ventajas sobre otras tecnologías usadas para la generación de energía a partir de materia orgánica. Primero, la conversión directa de sustrato a electricidad permite altas eficiencias de conversión. Segundo, operan eficientemente a temperatura ambiente, incluidas bajas temperaturas. Tercero, no requieren del tratamiento del biogás generado en la celda. Cuarto, no requieren de energía extra para airear el cátodo, pues éste puede ser aireado pasivamente. Quinto, tienen aplicación potencial en lugares

alejados con ausencia de infraestructura eléctrica, convirtiéndose en una opción más de energía renovable para los requerimientos de energía a nivel mundial.

A partir de la biomasa orgánica presente en residuos sólidos y líquidos se puede obtener una variedad de biocombustibles y subproductos, siendo la glucosa la principal fuente de carbono (Logan, 2004; Alzate *et al.*, 2007; He y Angenent., 2006). Entre las reacciones estequiométricas principales del metabolismo fermentativo microbiológico están:



PALABRAS CLAVE / Celda de Combustible Microbiana / Generación Eléctrica / Inóculo Mixto / Metabolismo Fermentativo /

Recibido: 28/02/2008. Modificado: 10/06/2008. Aceptado: 11/06/2008.

Liliana Alzate-Gaviria. Doctora, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua, México. Investigador, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México. Dirección: Calle 43 N° 130, Col. Chuburná de Hidalgo C.P 97200, Mérida, Yucatán, México, e-mail: lag@cicy.mx

Carmen Fuentes-Albarrán. M.C. y Candidata Doctoral en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), México.

Alberto Álvarez-Gallegos. Ph.D., University of Southampton, RU. Investigador, UAEM, México.

P. J. Sebastian. Ph.D., Indian Institute of Technology, Madras, India. Investigador, Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Politécnica de Chiapas, México.

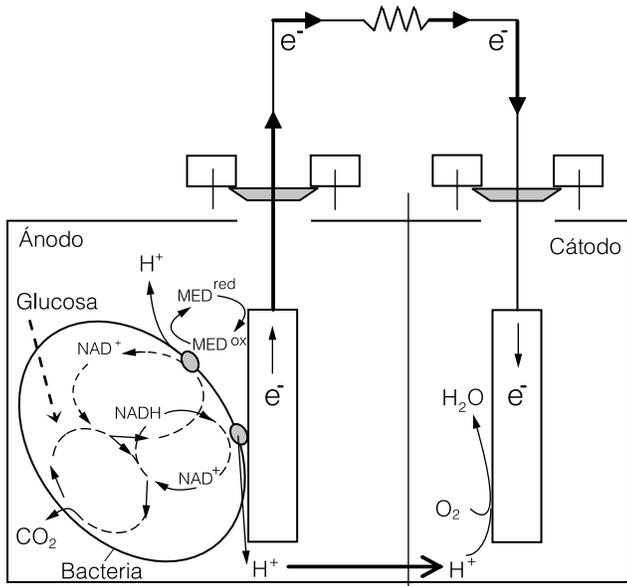


Figura 1. Funcionamiento de una celda de combustible microbiana (CCM). El sustrato es metabolizado por las bacterias y los electrones resultantes son transferidos al ánodo. Este proceso ocurre a través de la membrana o de un mediador redox.

Entre las CCM con membrana de intercambio protónico (PEM, siglas del inglés *proton exchange membrane*) existen tres configuraciones típicas (Figura 2). i. Bioreactor desacoplado de la CCM: los microorganismos generan H_2 que se emplea como combustible en una celda de combustible. ii. Bioreactor integrado a la CCM: los microorganismos generan H_2 que se convierte a electricidad en una única celda. iii. CCM con transferencia

produzcan energía bajo un metabolismo fermentativo.

Metodología

Microorganismos y sustrato

Los biocatalizadores empleados en la generación de energía se obtuvieron a partir de un inóculo mixto entérico previamente estabilizado en un reactor anaerobio de manto de lodos (RANMAL) anaerobio, ubicado en el laboratorio del Centro de Investigación en Energía (CIE-UNAM, Morelos, México) siguiendo el procedimiento que se detalla en Alzate *et al.* (2007).

La fuente de sustrato fue agua residual sintética (ARS; Poggi *et al.*, 2005) cuya fuente de carbono fue glucosa grado reactivo marca Sigma®. El ARS tuvo un pH entre 5 y 6, y la siguiente composición (por litro): 4g glucosa; 310mg NH_4Cl ; 130mg KCl ; 4,97g NaH_2PO_4 ; y 2,75g $Na_2HPO_4 \cdot H_2O$ (Lovley and Philips, 1998).

Celda de combustible microbiana

Se construyó una CCM de vidrio con volumen útil de trabajo, tanto del ánodo como del cátodo, de 350ml. El compartimiento del ánodo fue burbujeadado con N_2 para desplazar el O_2 presente previo al cierre del ánodo. El electrodo empleado fue papel carbón sin tratar distribuido por Fuelcell (Toray carbon paper®).

La celda tipo PEM constó de dos compartimientos, uno del

ánodo y otro del cátodo, unidos por una membrana intercambiadora de protones llamada Nafion® 117, película de 183µm reforzada a base de un copolímero de PTFE (teflón)/ácido perfluorosulfónico). Su estructura molecular posibilita que absorba agua y una vez húmedo, conduce selectivamente iones de carga positiva, bloqueando los de carga negativa. Esta característica es asociada con la inactividad química, resistencia mecánica y estabilidad conocidas de las resinas Teflon® (Fuelcell Internacional, EEUU). La membrana fue activada antes de usar con H_2SO_4 1N a 45°C por 24h (Kim *et al.*, 2005).

En el compartimiento del cátodo se empleó un catolito acuoso con burbujeo de aire para utilización del O_2 y como electrodo papel carbón sin tratar con Pt (0,5mg de Pt 10% por cm^2), mientras que en el ánodo se utilizó inóculo mixto de tipo floculento anteriormente seleccionado y estabilizado. A este último electrodo no se le aplicó ningún catalizador, ya que esa función la llevaron a cabo los microorganismos contenidos en dicho inóculo. Los electrodos de papel carbón empleados en cada compartimiento fueron de 1,7×1,6cm, con un área de 2,72 cm^2 .

El arranque de la CCM consistió en colonizar el electrodo con el consorcio microbiano contenido en el inóculo, con el propósito de formar un biofilm; es decir, una comunidad compleja de microorganismos que se adhieren al electrodo y producen un polímero celular como recubrimiento que les ayuda a retener el alimento y a protegerse de agentes tóxicos, para finalmente producir electricidad.

Durante este proceso se realizaron tres transferencias secuenciales de inóculo hasta obtener una respuesta electroquímica de voltaje constante; además, el patrón del voltaje se reprodujo a la tercera adición del inóculo mixto en el ánodo. Es de anotar que para el cambio del inóculo no se tuvo condiciones estrictas anaerobias. Los experimentos se efectuaron a temperaturas mesofílicas, colocando la celda en un baño termostático.

Para el circuito de la celda tipo PEM se emplearon dos resistencias externas, una de 1000Ω durante un período de 102 días y una segunda de 600Ω durante los días restantes. Basados en previas experimentaciones (Liu *et al.*, 2004; Logan *et al.*, 2004) se operó la CCM por un período no superior a 155 días, sin incluir el arranque. Los cambios que ocurrieron en la comunidad microbiana durante éste tiempo fueron monitoreados mediante seguimiento electroquímico.

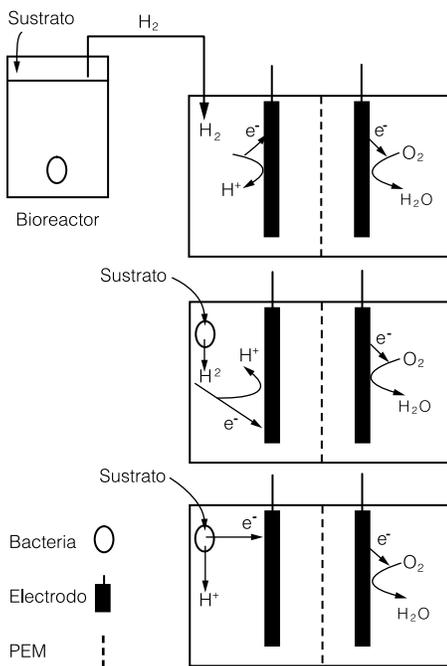


Figura 2. Diferentes configuraciones en una celda de combustible microbiana tipo PEM. Ver texto.

El monitoreo se llevó a cabo mediante mediciones de densidad de potencia generados por la CCM, utilizando un multímetro marca Fluke®. Para obtener los datos de corriente se fijó una resistencia para el circuito. La corriente (I) en amperios se obtuvo como $I = V \times R^{-1} = Q \times t^{-1}$, donde V es el voltaje (voltios), Q es la carga (coulombs) y t es el tiempo (segundos). La potencia (P; vatios) de la celda se midió como $P = I \times V$ y la producción de energía se midió en joules empleando la expresión $E = P \times t$.

Las eficiencias se expresan con base en la eficiencia coulombica experimental respecto a la teórica y variando de acuerdo al tipo de sustrato empleado en la CCM (Rabaey *et al.*, 2004).

Análisis

El electrodo se monitoreó realizando mediciones de ácidos grasos volátiles por titulación, potencial de hidrógeno (pH), temperatura y demanda química de O₂ (DQO) soluble en la corriente líquida. Dichos parámetros fueron determinados de acuerdo a APHA (1998). Finalmente, las mediciones de corriente y voltaje se realizaron mediante un multímetro y la eficiencia coulombica se calculó como $E_c = \frac{C_p}{C_{ti}} \times 100\%$, donde C_p es el

total de coulombs calculados por la integración de la corriente en el tiempo y C_{ti} es la cantidad teórica de coulombs, calculada a partir de $C_{ti} = \left[\frac{F \times b \times S \times v}{M} \right]$, donde

F: constante de Faraday, b: número de moles de electrones producido por mol de sustrato, S: concentración de sustrato, V: volumen del líquido, y M: peso molecular del sustrato empleado en la CCM.

F: constante de Faraday, b: número de moles de electrones producido por mol de sustrato, S: concentración de sustrato, V: volumen del líquido, y M: peso molecular del sustrato empleado en la CCM.

Resultados y Discusión

Aclimatación de la celda

Cuando la CCM fue inoculada con el cultivo bacteriano de tipo entérico hubo una fase de latencia de 30h seguida de un rápido incremento en el voltaje en las siguientes 40h, alcanzando un voltaje de 0,4V (Figura 3). Posteriormente el voltaje disminuyó gradualmente a medida que la materia orgánica contenida en el inóculo fue consumida. Al adicionar la tercera transferencia de inóculo a la CCM el comportamiento tiende a ser similar, produciéndose un intervalo de estabilidad de 0,37 ± 0,03V,

constituyendo la última etapa en el patrón de crecimiento bacteriano. Una vez que el sustrato fue consumido cesó el crecimiento y ocurrió muerte celular, viéndose afectada la generación de voltaje.

Después de 120h de operación se reemplazó parte del inóculo por ARS, conservando únicamente 10% del inóculo. Se observó que se generó inmediatamente electricidad en la CCM previamente inoculada (Figura 4), alcanzando un voltaje máximo de 1,05V y manteniéndose en un intervalo de 0,90 ± 0,1V en las siguientes 55h.

Efecto de la concentración del sustrato

La producción de voltaje en la CCM (Figura 5) siguió una cinética de saturación; es decir, de utilización del sustrato en sistemas biológicos en función de la concentración y la velocidad de transporte (Liu y Logan, 2004). Como se puede observar en la figura, el voltaje incrementó a medida que la concentración de glucosa aumentó, manteniéndose constante a partir de una concentración de 1000ppm en 1,15 ± 0,05V. Así, el máximo radio de utilización del sustrato ocurre en altas concentraciones del mismo (Metcalf y Eddy, 2003).

Generación de electricidad en medición continua

En esta etapa se monitoreó la generación de electricidad durante un período de 130 días. En la Figura 6 se observa que con una resistencia de 1000Ω el voltaje se mantuvo en 0,88 ± 0,17V durante los primeros 102 días, mientras que la generación de corriente osciló en un intervalo de 80 ± 20μA. Después de 102 días se empleó una resistencia de 600Ω, registrándose valores de 0,91 ± 0,08V, en tanto que la corriente incrementó rápidamente hasta alcanzar un máximo de 170 ± 18μA. Con las dos resistencias utilizadas se comprobó, como se esperaba, que con una resistencia menor se registra una mayor corriente. Esto se debe a que con bajas resistencias, los electrones se mueven más fácilmente a través del circuito. A mayor oxidación del combustible por los microorganismos se espera altos índices de oxidación de los transportadores de electrones en el cultivo a bajas resistencias. Adicionalmente, una CCM puede ponerse en marcha a bajas resistencias

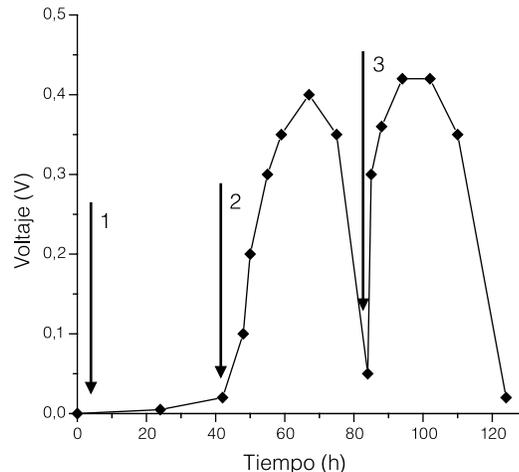


Figura 3. Aclimatación de la CCM con tres aplicaciones sucesivas de inóculo.

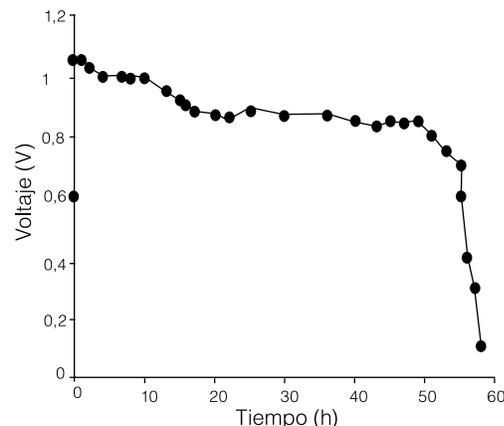


Figura 4. Generación de voltaje a partir de glucosa como sustrato.

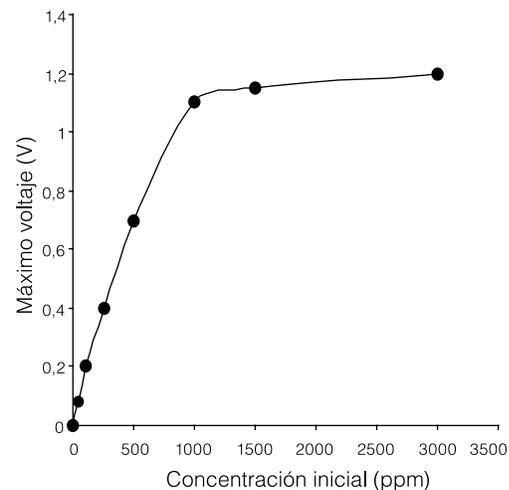


Figura 5. Voltaje máximo obtenido a partir de la concentración de glucosa.

para remover contaminantes de altos índices orgánicos (Jang *et al.*, 2004).

Generación de potencia en la CCM

La densidad de potencia generada por la CCM se midió en

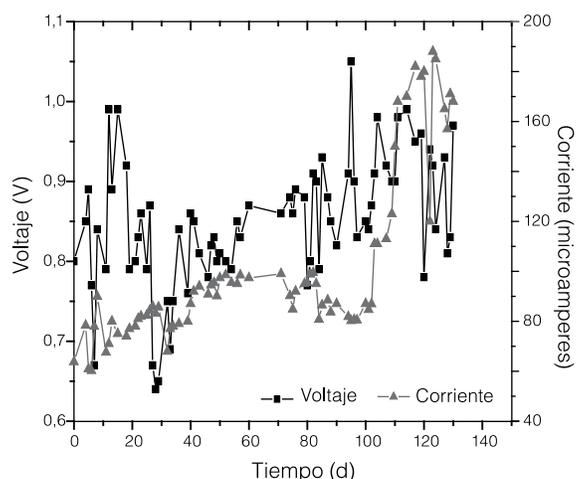


Figura 6. Generación de electricidad en la etapa de medición continua, utilizando resistencias externas de 1000 y 600Ω.

mW·m⁻², y para los cálculos se empleó la ecuación de la potencia. La producción de la densidad de potencia se muestra en la Figura 7. Al emplear una resistencia de 1000Ω la máxima potencia generada fue de 335mW·m⁻² (263 ±72mW·m⁻²) con un voltaje de 1,05V. Cuando se utilizó una resistencia de 600Ω se obtuvo una máxima densidad de potencia de 640mW·m⁻² (515 ±125mW·m⁻²) con 0,99V, es decir, la potencia fue cerca del 50% mayor que la obtenida con una resis-

tencia de 1000Ω. De igual forma, la remoción de materia orgánica expresada en DQO fue de 65 y 82%, respectivamente, con 1000 y 600Ω.

Los resultados muestran que operar con resistencias externas más bajas aumenta la producción de densidad de potencia y conlleva una mayor remoción de materia orgánica (Jang *et al.*, 2004). Los valores obtenidos se encuentran en

un intervalo medio alto con respecto a otros trabajos reportados en la literatura (Tabla I).

El presente sistema empleó un catolito acuoso para proveer O₂ disuelto al electrodo, sin emplear mediadores externos. Los consorcios microbianos generan mayor densidad de potencia que los cultivos puros (Rabaey y Verstraete, 2005; Pham *et al.*, 2006; Rittmann, 2006).

La densidad de potencia más alta que reporta la literatu-

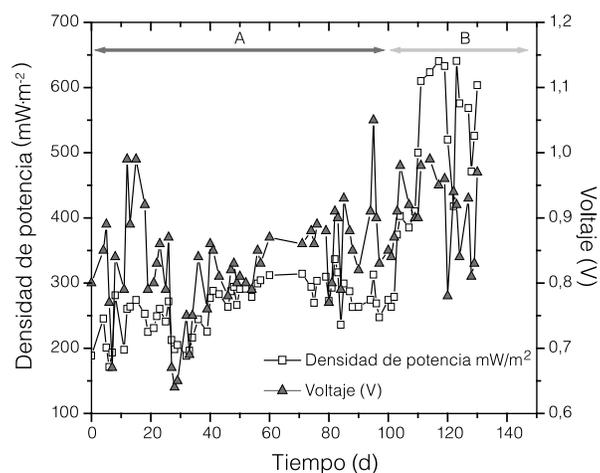


Figura 7. Generación de potencia en la CCM, empleando una resistencia de 1000Ω (a) y una resistencia de 600Ω (b).

ra es de 3600mW·m⁻² en un estudio (Rabaey *et al.*, 2003) donde utilizaron glucosa como sustrato y hexacianoferrato de potasio para optimizar el rendimiento del cátodo. El ferrocianuro es muy popular como aceptor de electrones en experimentos con CCM y pueden alcanzarse voltajes mayores que utilizando O₂. La gran ventaja del ferrocianuro es el bajo sobrepotencial utilizando cátodos de carbón plano; sin embargo, la generación de potencia con ferrocianuro

TABLA I
COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE DIFERENTES CONFIGURACIONES EN CELDAS DE COMBUSTIBLES MICROBIANAS TIPO PEM

Sustrato	Cultivo	Tipo de electrodo	Mediador redox	Densidad de potencia (mW·m ⁻²)	Eficiencia coulombica (%)	Referencia
Lactato	<i>Shewanella oneidensis</i>	Carbón reticulado vítreo	Ferrocianuro potásico	24	2,4	Ringeisen <i>et al.</i> (2006)
Agua residual doméstica	Bacterias presentes en aguas residuales	Grafito	No	24	3-12	Liu <i>et al.</i> (2004)
Glucosa	Cultivo mixto	Grafito plano	Hexacianoferrato de potasio	3600	89	Rabaey <i>et al.</i> (2003)
Acetato	Bacterias presentes en agua residual doméstica	Papel carbón	No	286 ±3	65	Min y Logan (2004)
Glucosa	Bacterias presentes en agua residual doméstica	Papel carbón	No	494	9-12	Liu y Logan (2004)
Acetato	<i>Geobacter metallireducens</i>	Papel carbón	No	40 ±1	19	Min <i>et al.</i> (2005)
Peptona	Bacterias contenidas en agua residual doméstica	Papel carbón	No	269 ±14	6	Heilmann y Logan (2006)
Acetato	Lodos activados	Papel carbón	No	0,097	63-78	Oh <i>et al.</i> (2004)
Glucosa	Bacterias contenidas en agua residual	Papel carbón	No	262	40-55	Liu y Logan (2004)
Acetato	Lodos activados	Grafito plano	Ferrocianuro en cátodo y Mn ⁴⁺ ánodo de grafito y Fe ³⁺ cátodo de grafito	788	No reportó	Park y Zeikus (2003)
Glucosa	Bacterias contenidas en agua residual	Fibra de carbón	No	1430	23	Logan <i>et al.</i> (2007)
Glucosa	Cultivo mixto	Papel carbón	No	336 y 640	60	Este estudio

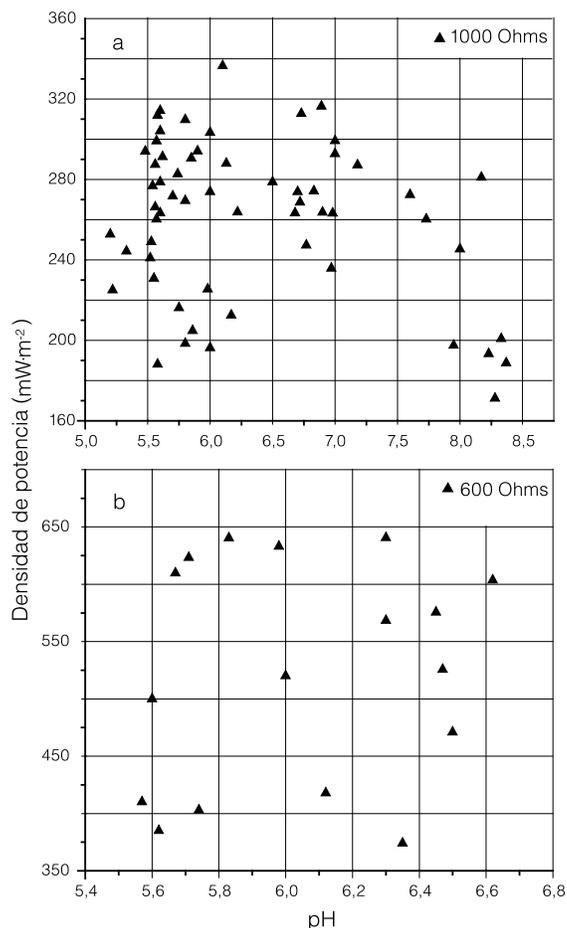


Figura 8. Efecto del pH en la densidad de potencia, con una resistencia de 1000Ω (a) y una resistencia de 600Ω (b).

no es sustentable debido a la insuficiente reoxidación por O₂, lo cual requiere que el catolito sea reemplazado regularmente. Además, largos términos de desempeño del sistema pueden ser afectados por la difusión de ferrocianuro a la cámara del ánodo (Logan *et al.*, 2006b).

Influencia del pH

Otro parámetro importante en el desempeño de la CCM es el pH del compartimiento anódico. Durante la experimentación se mantuvo el pH del anolito en 5.95 ± 0.75 . La Figura 8 muestra la relación entre la producción de potencia de la CCM y el pH. Como puede apreciarse, las más altas densidades de potencia ocurrieron en valores de pH entre 5,5 y 6,0 obteniéndose resultados que oscilaron entre 280 y 335mW·m⁻² para el caso de 1000 (Figura 8a). La densidad de potencia disminuyó ligeramente a medida que el pH aumentó hasta 6,8; sin embargo, cuando el pH fue >7,0 la densidad de potencia registrada se redujo, manteniéndose en 225 ± 45 mW·m⁻². Estos últimos resul-

tados demostraron que es recomendable operar la CCM a un pH entre 5,5 y 6,0. En las mediciones efectuadas empleando una resistencia de 600 (Figura 8b), se alcanzó a pH entre 5,8 y 6,3 una densidad de potencia máxima de 640mW·m⁻².

Las condiciones de pH son un factor clave en el crecimiento de los microorganismos. La mayoría de las bacterias entéricas no toleran niveles de pH arriba de 7,5 o debajo de 4,0. Además, valores de pH por debajo de 6,8 inhiben la actividad metanogénica (Metcalf y Eddy, 2003).

Para este proceso se requirió que durante el metabolismo de fermentación anaerobia se inhibieran algunos microorganismos, como los homoacetogénicos los cuales requieren H₂ para la producción de acetato y los metanogénicos que utilizan el H₂ para la producción de metano. Es por ello que la operación de los sistemas se realiza a bajos niveles de pH (Angenent *et al.*, 2004).

Efecto de la temperatura en el rendimiento de la CCM

La CCM operó bajo temperatura mesofílica de $35 \pm 5^\circ\text{C}$ los primeros 102 días. Durante este período la máxima densidad de potencia que se alcanzó fue $30 \pm 6\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($336\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$) empleando 1000Ω a 37°C (Figura 8a). Los siguientes días se mantuvo una temperatura constante de 40°C, obteniéndose una densidad de potencia máxima de $61 \pm 7\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($640\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$) con 600Ω. Bajo este último esquema se aumentó la temperatura en 5°C, obteniendo $63 \pm 5\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$; observándose que al incrementar la temperatura a 45°C no se registran incrementos sustanciales en la densidad de potencia, puesto que el resultado obtenido es muy similar al que se alcanzó a una temperatura de operación de 40°C (Figura 9). Estos resultados reflejan la gran influencia de la resistencia externa utilizada, aunada a una temperatura óptima de operación (Rozendal *et al.*, 2006).

Una ventaja importante de las CCM es que pueden producir electricidad a partir de materia orgánica, operando a temperaturas moderadas, como son 20-40°C (Min y Logan, 2004; Niessen *et al.*, 2004; Oh *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2005; Aelterman *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2006; Logan *et al.*, 2007; Oh y Logan, 2007).

Eficiencia obtenida en la CCM

La eficiencia de corriente se determinó con base a la eficiencia coulombica (EC), la cual se define como la cantidad de materia orgánica que se recupera como electricidad.

$$Ec = \frac{C_p}{C_{ti}} \times 100\%$$

Para determinar C_p se utilizó la gráfica de la corriente en función del tiempo de operación de la CCM. Al integrar el área bajo la curva desde (t= 0 hasta 130 días) se obtiene la carga to-

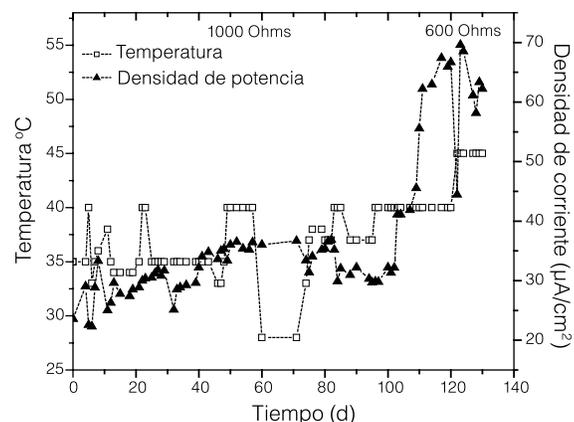


Figura 9. Relación de la temperatura de operación sobre la densidad de corriente, utilizando 1000 y 600Ω.

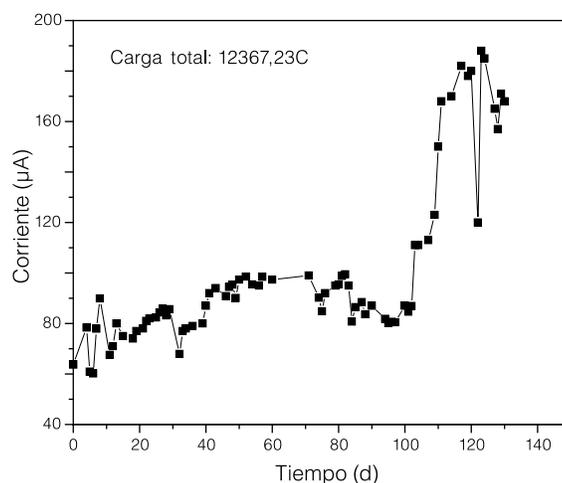


Figura 10. Corriente registrada en función del tiempo.

tal (q) en coulombs, que fue $C_p=12367,23$ (Figura 10). El sustrato empleado fue glucosa. Para el cálculo de la cantidad teórica de coulombs que pueden ser producidos por la glucosa se emplea la ecuación anteriormente descrita (Liu *et al.*, 2005) para C_{ii} ,

$$C_{ii} = \left[\frac{F \times b \times S \times v}{M} \right]$$

donde F: constante de Faraday ($98485C \cdot mol^{-1}$ de electrones), b: número moles de electrones producidos por mol de sustrato (para glucosa como sustrato $b=24$), S: concentración del sustrato ($g \cdot l^{-1}$), v: volumen del líquido, y M: peso molecular del sustrato (glucosa, 180). De esa manera se obtiene $C_{ii}=20681,85$. Por su parte, la eficiencia coulombica de la CCM es

$$EC = \left[\frac{12367,23}{20681,85} \right] \times 100 = 59,79\%$$

Las EC calculadas para celdas de combustibles microbianas que registra la literatura varían pero, en general, incrementan con la densidad de potencia porque hay menos tiempo para que se pierda sustrato durante la competencia en procesos físicos y biológicos (Logan y Regan, 2006a).

En este estudio se obtuvo una EC del 59,79%. La Tabla I, muestra las eficiencias reportadas por otros estudios y se puede observar como de acuerdo al tipo de sustrato empleado varían las eficiencias producidas. Por ejemplo, con acetato se obtuvieron eficiencias de 65% (Min y Logan, 2004) y 63-78% (Oh *et al.*, 2004). Con glucosa, las EC fueron de 89% empleando hexacianoferrato de potasio en su cátodo (Rabaey *et al.*, 2003), mientras que Liu y Logan obtuvieron 40-55% empleando una PEM y 9-12% sin el uso de membrana, pero utilizando un cátodo de aire, observándose que la mayor desventaja de este sistema fue la pérdida de sustrato debido a la oxidación aerobia en el ánodo, es decir, en la ausencia de una PEM existe una mayor difusión de O_2 de la cámara del cátodo al ánodo. Con aguas residuales las EC fueron de 3-12% (Liu *et al.*, 2004), con proteínas la eficiencia fue de 6% (Heilman y Logan, 2006) y, finalmente, empleando lactato y ferrocianuro de potasio la eficiencia fue de 2,4% (Ringeisen *et al.*, 2006).

Conclusiones

- Un dispositivo de celda de combustible microbiana tipo PEM puede generar electricidad y a la vez depurar agua residual, lo que lo hace atractivo para tratamientos *in situ* o para la modificación de las actuales plantas de tratamiento convencionales.

- Un aspecto a mejorar en futuros estudios es aumentar el área del ánodo para compensar las pérdidas por muerte y espacio ocupado por otras bacterias no generadoras de electricidad en el biofilm.

- La eficiencia coulombica en un electrodo acuoso se puede mejorar empleando para el circuito una menor resistencia.

- Se demostró como teniendo un aceptor de electrones externo la presencia de conductividad es inminente en el anolito de la CCM.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de CONACYT mediante beca posdoctoral a Liliana Alzate Gaviria. Parte del financiamiento para este proyecto provino del proyecto SEMARNAT 23405 y del proyecto Fomix-Yucatán 66140.

REFERENCIAS

Aelterman P, Rabaey K, Pham T, Boon N, Verstraete W (2006) Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Env. Sci. Technol.* 40: 3388-3394.

Alzate-Gaviria L, Sebastian P, Pérez-Hernández A (2007) Comparison of two anaerobic systems for hydrogen production from the organic fraction of municipal solid waste and synthetic wastewater. *Int. J. Hydrogen Energy* 32: 3141-3146.

Angenent L, Karim K, AL-Dahhan M, Wrenn B, Domingues-Espinosa R (2004) Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends Biotechnol.* 22: 477-485.

APHA (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998). 18th ed. APHA, AWWA, WEF. Washington, DC, EEUU. 1170 pp.

Cheng S, Liu H, Logan B (2006) Increased Power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Env. Sci. Technol.* 40: 2426-2432.

Haberman W, Pommer E (1991) Biological fuel cells with sulphide storage capacity. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 35: 128-133.

He Z, Angenent L (2006) Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells. *Electroanalysis* 18: 2009-2015.

Heilmann J, Logan B (2006) Production of electricity from proteins using a single chamber microbial fuel cell. *Water Env. Res.* 78: 531-537.

Jang J, Pham T, Chang I, Khan K, Moon H, Cho K, Kim B (2004) Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. *Proc. Biochem.* 39: 1007-1012.

Kim J, Min B, Logan B (2005) Evaluation of procedures to acclimate a microbial fuel cell for electricity production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 68: 23-30.

Liu H, Logan B (2004) Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Env. Sci. Technol.* 38: 4040-4046.

Liu H, Ramnarayanan R, Logan B (2004) Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Env. Sci. Technol.* 38: 2281-2285.

Liu H, Cheng S, Logan B (2005) Production of electricity from acetate or butyrate in a single chamber microbial fuel cell. *Env. Sci. Technol.* 39: 658-662.

Logan B (2004) Extracting hydrogen and electricity from renewable resources. *Env. Sci. Technol.* 38: 160A-167A.

Logan B, Regan J (2006a) Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends Microbiol.* 14: 512-518.

Logan B, Regan J (2006b) Microbial fuel cells - challenges and applications. *Env. Sci. Technol.* 40: 5172-5180.

Logan B, Cheng S, Watson V, Estadt G (2007) Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells. *Env. Sci. Technol.* 41: 3341-3346.

Lovley D, Phillips E (1998) Novel of microbial energy metabolism: Organism carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron and manganese. *Appl. Env. Microbiol.* 54: 1472-1480.

Metcalf y Eddy (2003) *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4^a ed. Mc Graw-Hill. Madrid, España. 1485 pp.

Min B, Logan B (2004) Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Env. Sci. Technol.* 38: 5809-5814.

Min B, Cheng S, Logan B (2005) Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Res.* 39: 1675-1686.

Niessen J, Schröder U, Scholz F (2004) Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation - a bacterial fuel cell operating on starch. *Electrochem. Comm.* 6: 955-958.

Oh S, Logan B (2007) Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation. *Power Sources* 167: 11-17.

Oh S, Min B, Logan B (2004) Cathode Performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Env. Sci. Technol.* 38: 4900-4904.

Park D, Zeikus J (2003) Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. *Biotechnol. Bioeng.* 81: 348-355.

Pham T, Rabaey K, Aelterman P, Clauwaert P, Schampelaire L, Boon N, Verstraete W (2006) Microbial fuel cells in relation to conventional anaerobic digestion technology. *Eng. Life Sci.* 6: 285-292.

Poggi-Varaldo HM, Alzate-Gaviria LM, Nevárez-Morillón VG, Rinderknecht-Seijas N (2005) A side by side comparison of two systems of sequencing coupled reactors for anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Waste Manag. Res.* 23: 270-280.

Rabaey K, Verstraete W (2005) Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends Biotechnol.* 23: 291-298.

Rabaey K, Lissens G, Siliciano S, Verstraete W (2003) A microbial fuel cell capable of

- converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnol. Lett.* 25: 1531-1535.
- Rabaey K, Boon N, Siciliano S, Verhaege M, Verstraete W (2004) Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *Appl. Env. Microbiol.* 70: 5373-5382.
- Rabaey K, Boon N, Hofte M, Verstraete W (2005) Microbial phenazine production enhances electron transfer in biofuel cells. *Env. Sci. Technol.* 39: 3401-3408.
- Ringeisen B, Henderson E, Wu P, Pietron J, Little B, Biffinger J, Jones-Meehan J (2006) High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10. *Env. Sci. Technol.* 40: 2629-2634.
- Rittmann BE (2006) Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology. *Trends Biotechnol.* 24: 261-268.
- Roller S, Bennetto H, Delaney G, Mason J, Stirling J, Thurston C (1984) Electron-transfer coupling in microbial fuel cells. Comparison of redox-mediator reduction rates and respiratory rates of bacteria. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 34: 3-12.
- Rozendal R, Hamelers H, Buisman C (2006) Effects of Membrane Cation Transport on pH and Microbial Fuel Cell performance. *Env. Sci. Technol.* 40: 5206-5211.
- Schröder U (2003) Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. *Phys. Chem.* 9: 2619-2629.
- Suzuki S (1976) Fuel cells with hydrogen forming bacteria. *Hosp. Hyg. Gesundheitswes. Desinfekt.* 68: 159.
- Zhao F, Harnisch F, Schröder U, Scholz F, Bogdanoff P, Herrmann I (2006) Challenges and constraints of using oxygen cathodes in microbial fuel cells. *Env. Sci. Technol.* 40: 5193-5199.

ELECTRICITY GENERATION FROM A PEM MICROBIAL FUEL CELL

Liliana Alzate-Gaviria, Carmen Fuentes-Albarrán, Alberto Álvarez-Gallegos and P. J. Sebastian

SUMMARY

A microbial fuel cell (MFC) at laboratory scale was used for the generation of electricity. The cell consisted of two compartments separated by a proton exchange membrane (PEM). Carbon paper electrodes and an aqueous catholyte supplied with air to provide dissolved O_2 to the electrode were used. The power generation in the MFC, was due to the presence of bacteria as biocatalysts in the anode chamber. The bacteria were obtained from a mixed anaerobic type enteric inoculum, using synthetic

wastewater as substrate. The influence of temperature and pH on the performance of the MFC was determined. The highest current densities, of 640 and 336mW·m⁻², were obtained at the mesophilic temperature 35 ±5°C and pH between 5 and 6, using resistances of 600 and 1000Ω, respectively. The coulombic efficiency obtained was 59.8%. Such systems are attractive for electricity generation, at the same time that they disintegrate the organic fraction of waste water.

GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL MICROBIANA TIPO PEM

Liliana Alzate-Gaviria, Carmen Fuentes-Albarran, Alberto Álvarez-Gallegos e P.J. Sebastian

RESUMO

Empregou-se uma célula de combustível microbiana (CCM) a escala de laboratório para a geração de eletricidade. A célula consistiu de duas câmaras separadas por uma membrana de intercâmbio protônico (PEM). Utilizaram-se eletrodos de papel carbono e um católito aquoso borbulhando com ar para prover ao eletrodo O_2 dissolvido. A geração de potência na CCM foi devida à presença de bactérias como biocatalizadores na câmara do ânodo. As bactérias foram obtidas de um inóculo misto anaeróbico de tipo entérico, empregando água residual sintética

(ARS) como substrato. Determinou-se a influência da temperatura e o pH sobre o rendimento da CCM, encontrando que a maior densidade de potência foi gerada com a temperatura mesofílica de 35 ±5°C e pH entre 5 e 6. Empregando resistências de 600 e 1000Ω se obtiveram densidades de 640 e 336mW·m⁻², respectivamente. A eficiência coulômbica obtida foi de 59,8%. Este tipo de sistemas resulta atrativo para a geração de eletricidade e por sua vez para a degradação da fração orgânica.