

# MONTAJE Y ESTUDIO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA PARA LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD CON DEPURACIÓN SIMULTÁNEA DE AGUAS RESIDUALES

HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ Francisco José, PÉREZ DE LOS RÍOS Antonia, LARROSA GUERRERO Amor, SÁNCHEZ SEGADO Sergio, LOZANO BLANCO Luis Javier, GODÍNEZ SEOANE Carlos. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

## RESUMEN

Las pilas de combustible microbianas (MFCs, Microbial Fuel Cells) son una biotecnología emergente que podría contribuir a afrontar dos de los problemas más acuciantes a los que se enfrenta la sociedad actual: la crisis energética y la disponibilidad de agua. Una pila de combustible microbiana es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química contenida en un combustible en energía eléctrica. Esto es posible cuando bajo condiciones adecuadas determinadas bacterias electroactivas pasan los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo en lugar de a un aceptor de electrones (como oxígeno o nitrato tal y como ocurre en los procesos de depuración naturales). La viabilidad técnica de este concepto ha sido demostrada en trabajos recientes de manera que se han creado grandes expectativas en la comunidad científica de poder producir una energía “verde” mediante la explotación de la biomasa contenida en las aguas residuales domésticas e industriales. Al utilizarse la materia orgánica contenida en las aguas residuales como combustible, paralelamente a la producción de energía se consigue la depuración de las aguas contaminadas.

En el sistema descrito pueden realizarse un importante número de actividades experimentales. Las prácticas que se proponen se enmarcan dentro de las asignatura *Ampliación de Tecnología de Combustibles*, asignatura perteneciente a la titulación de *Ingeniero Técnico en Recursos Energéticos, Combustibles y Explosivos* impartida en la Universidad Politécnica de Cartagena. Los descriptores del Plan de Estudios de la asignatura *Ampliación de Tecnología de Combustibles* sobre las aplicaciones de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, junto con otros temas relacionados con la seguridad e impacto ambiental en su aplicación. Al ser una práctica que engloba tanto aspectos relacionados con la producción de energía a partir de biomasa residual como la aplicación de esta tecnología para la reducir el impacto ambiental de efluentes acuosos, se ajusta en gran medida a los descriptores de la asignatura. Por otra parte, atendiendo el grado de conocimiento previo de los alumnos, es posible su adaptación a otras asignaturas que se encuentren dentro del ámbito científico-tecnológico.

A continuación se presenta una de las posibles experiencias que pueden realizarse con el dispositivo pila de combustible microbiana. Inicialmente se describen los conceptos y dispositivos más importantes utilizados en el desarrollo de la misma. Posteriormente se procede a la descripción de la práctica y finalmente se propone una serie de ejercicios que los alumnos deben resolver a partir de los datos experimentales obtenidos.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Descripción de la tecnología

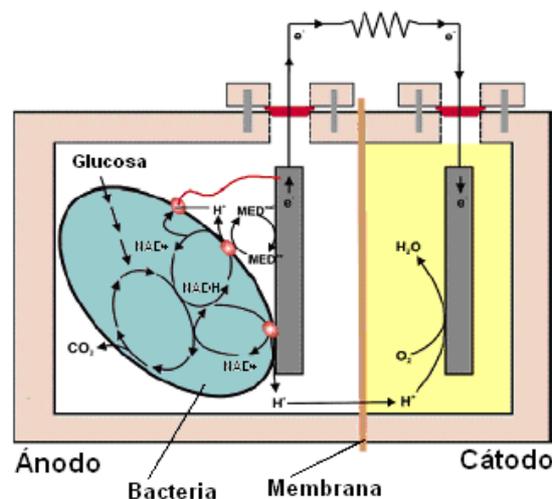
Una pila de combustible microbiana (MFC) es un dispositivo en el que se convierte energía química en energía eléctrica por la acción biocatalítica de microorganismos que oxidan sustratos biodegradables tales como glucosa, acetatos o materia orgánica presente, por ejemplo, en las aguas residuales.

Una MFC típica consiste en dos semipilas separadas por una membrana selectiva de protones (**Fig.1**).

Resultado de la oxidación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas se produce  $\text{CO}_2$ , protones y electrones, mientras que en condiciones aeróbicas únicamente se produciría  $\text{CO}_2$  y agua. Por ello resulta de interés mantener condiciones anaeróbicas para la generación de electrones:



Los electrones generados son transferidos hacia el electrodo negativo, el ánodo. Esta transferencia puede ocurrir de dos maneras, a través de proteínas conductoras de la membrana celular o bien a través de mediadores. Los mediadores (también conocidos como lanzadores de electrones) son sustancias con propiedades redox que actúan como intermediarios entre la membrana celular y el ánodo. Pueden ser añadidos externamente o bien ser excretados como resultado del propio metabolismo microbiano. De aquí, los electrones pasan por un circuito eléctrico externo hacia el electrodo positivo, el cátodo, donde son transferidos hacia un aceptor de electrones de alto potencial como puede ser el oxígeno. Una vez reducido el oxígeno, éste se combina con protones procedentes del compartimiento anódico a través de la membrana semipermeable, formando agua.



*Figura 1. Principio de funcionamiento de una MFC [1].*

Las MFCs hacen posible por tanto la producción de una energía “verde” mediante la explotación de la biomasa contenida en las aguas residuales doméstica e industrial a la vez que se consigue la depuración de las mismas [2-6]. El potencial de las MFCs es enorme dado que esta novedosa tecnología aporta importantes ventajas funcionales y operativas sobre las tecnologías actualmente utilizadas para la generación de energía y para la depuración de aguas a partir de biomasa:

- La conversión de energía desde sustrato a electricidad es directa, permitiendo altas eficiencias.

- Las MFCs operan eficientemente a temperatura ambiente, e incluso a muy bajas temperaturas distinguiéndose de todos los demás procesos bio-energéticos actuales [5].

- Una MFC no requiere tratamiento de gases debido a que los gases de escape están enriquecidos en  $\text{CO}_2$  (de origen no fósil) y no tienen valor energético residual.

- Las MFCs no tienen partes móviles y por tanto no necesitan aporte de energía siempre que el cátodo sea aireado pasivamente [3].

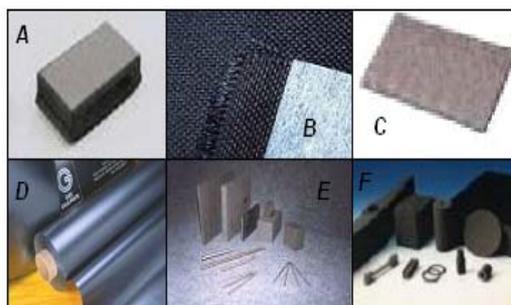
- Las MFCs tienen una amplia aplicación potencial en localizaciones donde se carece de infraestructura eléctrica, así como para ampliar la diversidad de combustibles que utilizamos para satisfacer nuestra demanda energética.

- Comparativamente con otras tecnologías de depuración de aguas tradicionales (digestión anaerobia), las MFCs generan menor cantidad de fangos con el consiguiente ahorro en los costes de deshidratación que tienen estos materiales.

## 1.2. Componentes de las pilas de combustible microbianas: ánodos, cátodos y membranas

### Ánodo

Los materiales anódicos deben ser conductores, biocompatibles, y químicamente estables en el medio con que se alimenta la cámara en la que se encuentran. El acoplamiento metálico utilizado para dar consistencia al ánodo debe ser consistente y no susceptible de corrosión en el medio en que se sumerge. Así, por ejemplo, podría usarse acero inoxidable, pero no cobre debido a que la presencia de iones de cobre en la disolución, efecto de la posible corrosión del mismo, puede resultar tóxica para las bacterias. Y por otra parte, esta reacción electroquímica no deseada enmascararía aquella(s) que son de interés para el estudio que se realiza. El material más versátil del electrodo es el carbón, disponible como placas compactas de grafito, barras, o gránulos, como material fibroso (tela, fieltro, paño, papel, fibras, espuma), y como carbón vídrioso. Existen numerosas empresas en el mercado que distribuyen carbón internacionalmente, por ejemplo, E\_TEK y Electrosynthesis Co. Inc.(USA), GEE Graphite Limited, Dewsbury (Reino Unido), Morgan, Grimbergen (Bélgica), y Alfa-Aesar (Alemania). En la **Fig. 2** se muestran fotografías de las diferentes formas de carbón utilizadas como ánodos en las MFCs.



*Figura 2. Diferentes formas de carbón utilizadas para MFCs. A. esponja o espuma de carbón. B. Manta, tela o paño de carbón activo (carbon-cloth). C. Fieltro de carbón. D. Papel de carbón. E. Placas o barras de grafito. F. Carbón vítreo (RVC) en diferentes geometrías.*

Ejemplos de materiales adecuados para los electrodos del ánodo son placas o barras del grafito pues son relativamente baratas, fáciles de modelar, y tienen un área superficial definida. El área superficial más grande se obtiene con los electrodos de fieltro del grafito que pueden llegar a tener áreas superficiales de  $0,47 \text{ m}^2/\text{g}$  (GF series, GEE Grafito Limited, Dewsbury, Reino Unido). También se han utilizado como electrodos fibra, papel, espuma y paño o manta de carbón (Toray).

La mayor área superficial ha sido alcanzada usando un material compacto como el carbón vítreo reticulado (RVC; ERG Materials y Aerospace Corp., Oakland, California, USA) disponible con diversos tamaños de poro, o usando capas de gránulos de carbón empaquetados (Le Carbone, Grimbergen, Bélgica) o granos.

### Cátodo

El oxígeno es el aceptor de electrones más adecuado para una MFC debido a su alto potencial de oxidación, su disponibilidad, bajo coste (gratis en el aire), la sostenibilidad y la no formación de productos contaminantes (el agua es el único producto final formado). La elección de los materiales catódicos afecta en gran medida al rendimiento y es muy diversa según el tipo de pila. El uso de cátodos en los que el único catalizador es carbono presenta una cinética para la reducción de oxígeno muy lenta, y sólo pueden ser utilizados en sistemas en los que la cinética anódica sea lenta también, de modo que la lentitud de la reducción de oxígeno en el cátodo no limite el sistema. Para aumentar la tasa de reducción de oxígeno se usa en general platino como catalizador, para oxígeno disuelto en el catolito o al aire libre (gas de difusión) en el cátodo. Para disminuir el coste de la MFC la carga en platino en el cátodo puede reducirse hasta niveles del orden de  $0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2$ . Como cátodos alternativos para las MFCs han sido propuestos catalizadores libres de metales nobles que utilizan hierro (II) pirolizado, ftalocianina, porfirinas, espinelas, piroclorinas o peroskitas.

### Membrana de intercambio protónico

La mayoría de los diseños de las MFCs requieren la separación de los compartimentos del ánodo y el cátodo por una membrana de intercambio protónico (PEM). El uso más común en PEM es el Nafion<sup>®</sup> 115 o 117 (Dupont Co, USA), que está a disposición de numerosos proveedores (por ejemplo, Aldrich e Ion Power, Inc.). Una alternativa al Nafion<sup>®</sup> es la membrana Ultrex CMI - 7000 (Membranas Internacional Incorp., Glen Rock, NJ, USA) que

tiene una mejor relación coste-eficiencia que el Nafion<sup>®</sup>. Cuando una PEM se utiliza en una MFC es importante tener en cuenta que puede ser permeable a los productos químicos utilizados, tales como oxígeno, iones, o de la materia orgánica utilizada como sustrato.

### 1.3. Determinación del rendimiento de una pila de combustible microbiana.

El rendimiento de una pila de combustible microbiana debe evaluarse tanto desde el punto de vista de la producción de energía como de la depuración simultánea de las aguas residuales empleadas. Para ello se llevan a cabo medidas periódicas de voltaje y de demanda bioquímica de oxígeno DQO. A partir del voltaje ( $E_{pila}$ ) se puede determinar la intensidad, la potencia y la eficiencia coulombica de las pilas.

La potencia normalizada para el volumen del reactor se obtiene según la siguiente expresión:

$$P_V = \frac{E_{pila}^2}{VR_{ext}} \quad [1]$$

donde  $P_V$  es la potencia volumétrica ( $W/m^3$ ), y  $V$  es el volumen total del reactor.

La eficiencia coulombica,  $CC$ , se define como la relación entre el número de coulombios realmente transferidos al ánodo desde el sustrato y el número máximo posible de coulombios transferidos si todo el sustrato fuera capaz de producir corriente, es decir:

$$Y_Q = \frac{\text{coulombios totales producidos}}{\text{coulombios totales teóricos producibles}} \times 100 \quad [2]$$

El total de coulombios obtenidos se determina integrando la corriente frente al tiempo, con el fin de poder obtener la eficiencia coulombica de una MFC alimentada en modo por lotes,  $C_b$ , evaluada durante un período de tiempo  $t_b$ , que se calcula como:

$$Y_Q = \frac{M_m \int_0^{t_b} i(t) dt}{F \cdot \Delta DQO \cdot b \cdot V} \times 100 \quad [3]$$

Donde:  $M_m$  es la masa molecular de oxígeno (32 g/mol);  $i(t)$  es la intensidad de corriente ( $A = C/s$ );  $F$  es la constante de Faraday (96485 C/mol de  $e^-$ ),  $\Delta DQO$  es la variación de DQO durante el tiempo transcurrido  $t_b$  ( $DQO_{inicial} - DQO_t$ );  $b$  son los moles de electrones producidos por mol de oxígeno ( $b=4$ ) y  $V$  es el volumen de líquido en la cámara anódica (0,25 l). La integral del numerador, que equivale a la carga acumulada, se calcula por el método de los trapecios.

## 2. Práctica: MONTAJE Y ESTUDIO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA CON DEPURACIÓN SIMULTÁNEA DE AGUAS RESIDUALES

### 2.1. Objetivo

En la presente práctica se llevará a cabo el montaje de una pila de combustible microbiana y se evaluará el rendimiento de la misma tanto desde el punto de vista de la producción de energía como de la depuración simultánea de las aguas residuales empleadas.

### 2.2. Dispositivo experimental

El dispositivo experimental consta de:

#### - Cámara anódica.

Consiste en una botella de vidrio de la marca SCHOTT DURAN® (Alemania) con el cuerpo interior con un volumen aproximado de 250 mL y con camisa externa que tiene capacidad para albergar 150 mL de líquido termostático, que cubre totalmente el cuerpo interior. Estos dos cuerpos están soldados en el interior, en la parte superior de las botellas. En la parte lateral posee un cilindro fijo del mismo material también soldado que sale desde el cuerpo interior (Fig. 3).

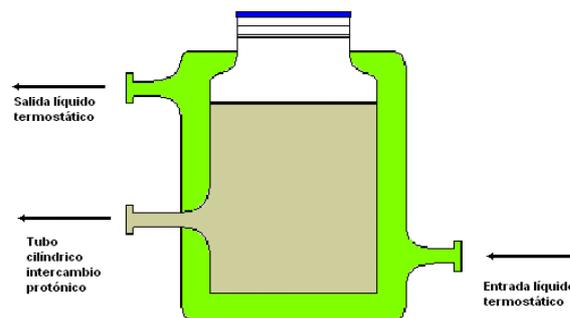


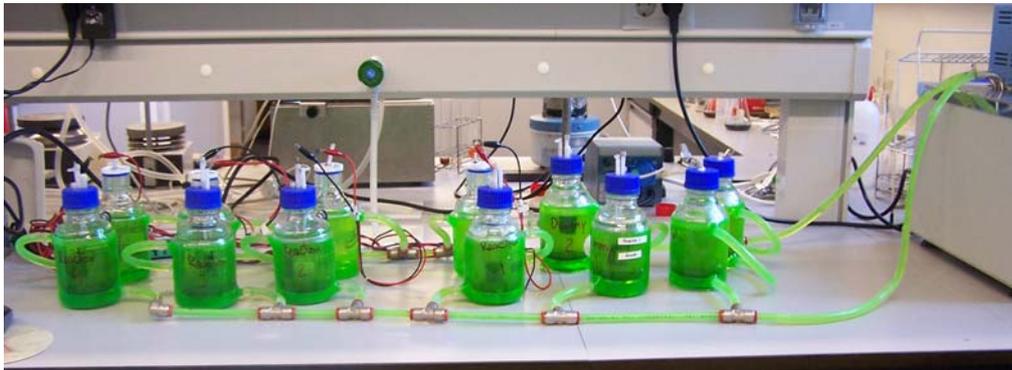
Figura 3. Esquema de una botella de las MFCs utilizadas en este TFC

- **Ánodo:** Gránulos de grafito y varilla de carbón.

- **Cátodo:** Platino depositado sobre tela de carbón ( $0.3 \text{ mg Pt cm}^{-2}$ )

- **Membrana de intercambio protónico:** Nafion® 115. Es una membrana de intercambio protónico derivada del ácido perfluorosulfónico, sólida e insoluble en agua. Las membranas son discos de 3,5 cm de diámetro (diámetro exterior del tubo de intercambio protónico) con un espesor de 0,127 mm.

En la **Fig.4** se muestra un ejemplo del montaje experimental.



*Figura 4. Ejemplo de montaje experimental.*

### 2.3. Procedimiento experimental

- Pesar 100g de gránulos de carbón e introducirlos en la cámara anódica.
- Cerrar la cámara anódica con una tapa que tiene fijada una varilla de grafito, asegurándose de que la varilla está en contacto con los gránulos de carbón.
- Fijar la membrana y el cátodo en el cilindro central soldado a la cámara anódica empleando para ello una pinza de rótula ajustable.
- Realizar pruebas hidráulicas para comprobar la ausencia de fugas en el montaje.
- Llenar la cámara anódica con 250 mL de agua residual.
- Colocar una resistencia de 1 k $\Omega$  entre el cátodo y el ánodo cerrando el circuito externo.

### 2.4. Cuestiones

1. Una vez montada la pila realice medidas periódicas de voltaje (voltímetro) y de demanda bioquímica de oxígeno (DQO) (método fotométrico- *Test en cubetas de DQO* de MERCK). Calcule la intensidad, la potencia y la eficiencia coulombica de la pila.

2. Varíe la resistencia colocada entre el ánodo y el cátodo (1 a 10 kΩ) y complete la Tabla 1.

- a) Dibuje la curva característica VI para la pila de combustible microbiana.
- b) Dibuje el diagrama Potencia /Intensidad (PI). Recuerde que Potencia (W) = voltaje (V) • intensidad (A) para cada una de las resistencias utilizadas.

**Tabla 1.** Datos experimentales y cálculo de la potencia

RESISTENCIA (Ω)	VOLTAJE (V)	INTENSIDAD (A)	POTENCIA (W)

### 3. REFERENCIAS

[1] RABAEY, K.; VERSTRAETE, W. “Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation”. *Trends Biotechnology*. 2005, 23, 291-298.

[2] LOGAN, B.E.; HAMELERS, B.; ROZENDAL, R.; SCHRÖDER, U.; KELLER, J.; FREGUIA, S.; AELTERMAN, P.; VERSTRAETE, W.; RABAEY, K. “Microbial fuel cells: methodology and technology”. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40, 5181-5192.

[3] LIU, H.; RAMNARAYANAN, R.; LOGAN, B.E. “Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell”. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38, 2281-2285.

[4] RABAEY, K.; CLAUWAERT, P.; AELTERMAN, P.; VERSTRAETE, W. “Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation”. *Environmental Science and Technology*. 2005,39, 8077-8082.

[5] LARROSA-GUERRERO, A; Scott, K.; Head, I.M.; Mateo, F.; Ginesta, A.; Godinez, C. “Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells”. *Fuel*, 2010, 89, 3985-3994.

[6] LARROSA-GUERRERO, A; LOZANO, L.J.; KATURI, K.P.; HEAD, I.M.; Scott, K.; Godinez, C. “On the repeatability and reproducibility of experimental two-chambered microbial fuel cells”. *Fuel*, 2009, 88, 1952-1957.