



**Utilización de desechos  
municipales y lixiviados para  
generación de electricidad a  
partir de celdas microbianas**

**Dra. Gladis Guadalupe Suarez Velázquez**  
Universidad Politécnica de Altamira

**Dr. Francisco Manuel García Reyes**

**Dr. Luis Alberto García Reyes**

**C.P. Rubén Francisco Turriza González**

Instituto Tecnológico Nacional de México

Campus Cd. Madero

## Abstract

This work presents a review of the characteristics of microbial fuel cells known as MFC. Such as its topology, operation, materials, and electrical parameters of interest. A focus on the use of municipal wastewater in MFC developed in the last 5 years is shown. This work focuses on the comparison of energy generation based on the combination of materials used in the reported works.

**Keywords:** bacteria, microbial fuel cell, municipal waste.

## Resumen

En este trabajo se presentan una revisión sobre las características de las celdas de combustible microbianas conocidas como CCM. Tales como su topología, funcionamiento, materiales y parámetros eléctricos de interés. Se muestra un enfoque sobre el uso de aguas residuales municipales en CCM desarrolladas en los últimos 5 años. Con un enfoque en la comparación de la generación de energía en base a la combinación de los materiales utilizados en los trabajos reportados.

**Palabras clave:** bacterias, celda de combustible microbiana, residuos municipales.

## Introducción

Con el agotamiento de los combustibles fósiles, diversas alternativas han sido propuestas para la generación de energía verde. Además del interés en la reducción de desechos por medio de reciclaje o valorización y disminución de la contaminación.

Se estima que a nivel mundial los desechos municipales superan los 2 millones de toneladas anuales, previendo que en el 2050 esta

cifra alcanzará los 3400 billones. La composición de los desechos municipales generalmente consiste en los residuos domésticos, los cuales son enviados por lo general a tiraderos municipales donde cada entidad se encarga de tratarlos. Mientras que los lixiviados son líquidos que pueden ser tóxicos y son provenientes de los vertederos. Desgraciadamente, la generación de estos desechos conlleva a grandes cantidades de  $CO_2$  y metano, contribuyendo negativamente al cambio climático. Aunado a esto, se tiene el problema de la contaminación de cuerpos de agua que terminan convirtiéndose en aguas residuales debido a desechos domésticos, municipales en combinación con desechos industriales o en descomposición (Fotografía 1).

Dependiendo de la contaminación de las aguas residuales, pueden ser encontrados microorganismos, bacterias y hasta metales pesados. Los cuales pueden ser utilizados positivamente en celdas de combustible microbiana, y de manera general, son capaces de producir energía eléctrica a través de su descomposición.

En este trabajo, se describen las características y parámetros principales de una CCM.

Además de una revisión de los trabajos que han reportado el uso de residuos municipales junto con lixiviados en la elaboración de las mismas. Con lo cual se busca localizar las combinaciones que permitan obtener mejor rendimiento eléctrico.

## Celdas de combustible microbianas (CCM)

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son dispositivos que convierten la



Fotografía 1. Cuerpo de agua contaminado, situado en el sur de Tamaulipas.

energía bioquímica generada por el metabolismo de desechos orgánicos o actividad catalítica de los microorganismos, en energía eléctrica (Palmore and Whitesides, 1994). Este tipo de celdas de combustible han recibido mucho interés por la comunidad científica, ya que no solo representa una fuente alterna de generación de energía sino también la utilización de materiales de desecho, lo cual representa bajo costo.

### **Elementos constitutivos de una CCM**

De manera general, una CCM está constituida por un separador, sustrato o lixiviado (que es la sustancia que se degrada) y por una cámara anódica y una catódica. Donde son localizados los electrodos conocidos como ánodo y cátodo. El material utilizado para ánodo debe tener propiedades conductivas, no corrosivas, de alta porosidad y gran área superficial. Además, debe presentar las ventajas de ser económico, de fácil fabricación y tener la capacidad para ser escalado a dimensiones mayores. (Logan and Wiley, 2008).

Para el caso del cátodo se utilizan materiales conductores como el carbón con catalizadores de Pt (más utilizado) o catalizadores sin Platino que resultan más económicos. En el caso de los

catalizadores sin Pt se utiliza grafito, o fierro y níquel, de carbono simple o recubiertos de carbono tubular.

El separador es el componente que divide la cámara anódica y catódica. Y permite pasar iones a la otra cámara sin dejar pasar electrones. Dicho separador debe poseer alta calidad de transferencia de protones, baja permeabilidad de gas, buena estabilidad térmica and buena resistencia contra la bioincrustación (adherencia de microorganismos) (Liu and Logan, 2004; Zhao, 2009). Los tipos de membranas más utilizados en la actualidad son: Membrana de intercambios de protones (PEM), Membrana porosa de polímero compuesto, Nafion®, Membrana de intercambio de cationes (CEM), Membrana de intercambio de aniones (AEM) y Membrana bipolar que consiste de la unión de membrana de aniones y cationes (BPM).

El sustrato es el material capaz de degradarse (desecho utilizado). El cual puede ser agua residual de la industria láctea, residuos animales y vegetales. Mientras el inóculo es el microorganismos o bacterias encargadas de la degradación del sustrato. Las cuales pueden encontrarse en dichos residuos o bien agregarse a estos. Entre

los microorganismos reportados destacan: *Clostridium butyricum*, *Escherichia coli*, *Bacillus sp.*, *Enterococcus faecalis*, *Bacillus subterraneus*, *Klebsiella pneumonia*, y *Enterobacter cloaca* (Kamel *et al.*, 2020).

### Topologías de CCM

Entre los tipos de topologías propuestas para las CCM se encuentran las celdas simples, las celdas dobles, y multiceldas. Las celdas simples pueden o no contener membrana, pero solo poseen una cámara en donde se encuentran ubicados el

ánodo y cátodo.

La carencia de una cámara catódica radica en que el cátodo se encuentra en contacto directo con el aire. La característica principal de las celdas de cámara doble es que el ánodo y cátodo se encuentran en su cámara anódica y catódica respectivamente y utilizan separadores. Entre las variantes de estas celdas se pueden mencionar las celdas tipo H, el tipo U y cilíndricas (Figura 1). Así como también reactores que han sido propuestos utilizando biorremediación.

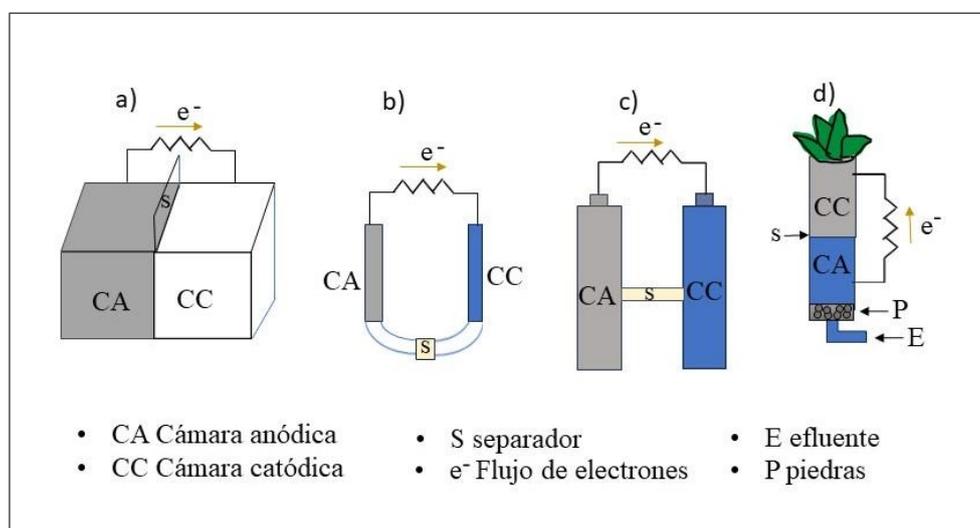


Figura 1: a) Celdas con doble cámara, b) tipo U, c) tipo H y d) con humedales

Las celdas de cámara múltiples como su nombre lo indica son formadas por más de 1 celda conectadas en serie o en paralelo como lo harían las celdas en una pila de combustible. Esto con el fin de alcanzar parámetros eléctricos mayores como la conexión en paralelo que proporciona más potencia.

### Funcionamiento

La cámara anódica además del ánodo contiene el sustrato y el inóculo y la cámara catódica contiene el cátodo y una membrana encargada de separar las dos cámaras. Tal como lo muestra la Figura 2. La cámara anódica es alimentada con un medio de crecimiento o agua residual

como analitos y mediador redox (no requerido en caso de CCM sin mediador). En esta cámara son liberados electrones y protones derivados de la acción de descomposición que el inóculo realiza sobre el sustrato orgánico (catabolismo del sustrato). Los electrones liberados viajan a través de un circuito externo formado por un conductor y una resistencia hacia el cátodo. Mientras que los protones migran a través de la membrana. Así, los electrones, protones y oxígeno procedentes de la cámara anódica, son combinados con el oxígeno de la cámara catódica para formar agua (Das, 2018).

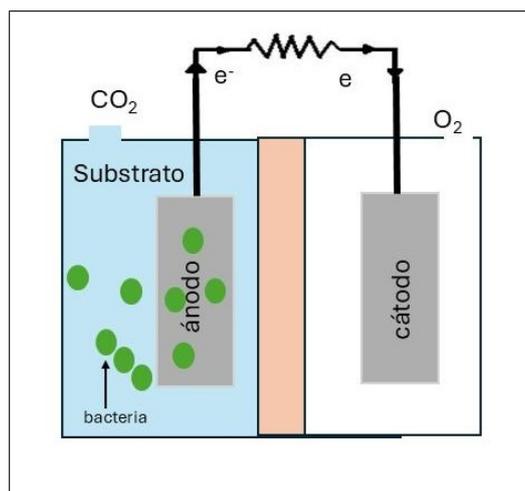


Figura 2: a) Celdas con doble cámara, b) tipo U, c) tipo H y d) con humedales

### Desempeño de CCM

Determinados parámetros como materiales, inóculos, membranas, temperatura, pH y arquitectura de las CCM influyen directamente en el desarrollo y mejoramiento de dichos dispositivos. De esta manera con la modificación o combinación de algunos de estos parámetros se busca la eficiencia y la sustentabilidad de la CCM a un menor costo. La Demanda química de oxígeno, la eficiencia coulombica, densidad de corriente y densidad de potencia permiten evaluar el desempeño de cada dispositivo.

### Demanda química de oxígeno

En una muestra en estado líquido, como las aguas residuales, se encuentran partículas disueltas o suspendidas que tienden a ser oxidadas. La cantidad de oxígeno que se requiere para la descomposición de esta materia orgánica se obtiene por medio de la medición demanda química de oxígeno. Esta prueba resulta útil para el análisis de aguas de residuos industriales.

### Densidad de corriente

La corriente generada por una CCM se denota por  $I_d$  y se mide en Amperes (A). La densidad de corriente se denota

por la corriente por área superficial del electrodo  $A_{ele}$  o por unidad de volumen  $Vol$  de la cámara anódica siendo sus unidades  $A/cm^2$  y  $A/cm^3$ , respectivamente (Sun *et al.* 2016).

La obtención de la máxima generación de electricidad depende de la comunidad bacteriana, de las aguas residuales, la demanda química del oxígeno (DQO) y el pH.

$$I_d = \frac{I}{A_{ele}}$$

### Densidad de potencia

La cantidad de potencia generada  $P_d$  por una celda es el producto del voltaje  $V$  de operación de la celda y la corriente  $I$  a una resistencia específica  $R_e$ . Esta potencia generada se puede tornar inestable debido a los cambios en el metabolismo de los microbios, disminución de actividad de catalizadores, suciedad de membrana y acumulación de residuos. Por lo cual se ha adoptado como más estable el parámetro de densidad de potencia respecto a área de superficie de electrodo o volumen de la cámara anódica.

$$P_d = \frac{V \times I}{Vol}$$

### Eficiencia Coulombica

La eficiencia Coulombica es la relación de la carga total (en Coulombs) transportada al ánodo después de la bioelectro-oxidación del sustrato y la máxima carga disponible o almacenada. Indica que fracción del sustrato fue utilizada por la bacteria para producción de corriente. La eficiencia coulombica indica que la fracción del sustrato fue utilizado por la bacteria para producción de corriente.

Es calculada por la siguiente expresión:

$$CE = \frac{MI}{Fbk\Delta COD}$$

Donde  $k$  corresponde al caudal del afluente de las aguas residuales y  $\Delta COD$  es el cambio de la demanda de química oxígeno del agua residual durante la operación de la CCM por la sustracción final a inicial COD (g/L);  $M$  es la masa molecular de  $O_2$  y  $b$  es el número de electrones requeridos para reducir oxígeno a agua y  $F$  Constante de Faraday.

El objetivo principal de todos los CCM que emplean aguas residuales es lograr una alta eficiencia coulombica para garantizar la electrogénesis. Ciertos enfoques, como la supresión de la metanogénesis en el sistema CCM, la mejora de la catálisis y el uso del colector de corriente adecuado en el reactor, mejoran la eficiencia (Das, 2018).

### CCM utilizando residuos municipales reportadas en los últimos 5 años

En este trabajo se buscaron estudios que han utilizado lixiviados para CCM en los últimos 5 años, en donde fueron encontrados 184. De los cuales, solo son mostrados los enfocados a la creación de CCM con diferentes combinaciones de materiales y sustratos. Así como la generación de energía reportada. Diversos trabajos han resaltado la diferencia de resultados en los parámetros eléctricos, que varía dependiendo de las combinaciones de pretratamientos a los sustratos, configuraciones de las celdas y materiales. De esta revisión se destaca el uso de aguas residuales municipales junto con descargas industriales (Hiegemann *et al.*, 2019), lodos (Guadarrama-Pérez *et al.*, 2019), relleno sanitario (Kamel *et al.*, 2020), aguas con desechos de lácteos (Bolognesi *et al.*, 2021) o agua de alcantarillado (Saeed & Miah, 2021). De las topologías utilizadas se encontraron mayor número de trabajos que utilizan cámara simple debido a que representa mayor simplicidad respecto a las de cámara doble. La mayor densidad de potencia encontrada fue de  $982 \text{ mW/m}^2$ , en el arreglo de humedales alimentado con salida de alcantarillado (Saeed & Miah, 2021). Sin embargo, en este arreglo no se encontró información de CE y COD. En la Tabla 1 se resumen los trabajos encontrados en la literatura de los últimos 5 años enfocados a la creación de la CCM.

Tabla 1

Trabajos /año	Lixiviado	Características estructurales de la celda	Densidad de Potencia ( $P_D$ ), Eficiencia Coulumbica (CE%), Demanda química de oxígeno (COD)
(Martínez and Di Lorenzo, 2019)	Digestato fresco	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara simple</li> <li>▪ Ánodo y cátodo de fieltro de grafito</li> <li>▪ Sin membrana</li> <li>▪ Cámara catódica de aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 51 mW/m<sup>3</sup></li> <li>▪ COD 9945.81 ± 0.28 mg /L</li> </ul>
(Hiegemann <i>et al.</i> , 2019)	Aguas residuales municipales con descargas industriales	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara simple cilíndrica</li> <li>▪ Ánodo de cepillo de fibra de grafito</li> <li>▪ Cátodos de acero inoxidable/carbón activado</li> <li>▪ Cámara catódica de aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 317 mW/m<sup>3</sup></li> <li>▪ CE: 41+16 %</li> <li>▪ COD: 29.5 ± 14 %</li> </ul>
(Guadarrama-Pérez <i>et al.</i> , 2019)	Lodos granulares anaerobios con sedimentos pretratados térmicamente	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reactor de cámara simple productor de hidrógeno. (sMER-<math>H_2</math>)</li> <li>▪ Ánodo: fieltro de carbon</li> <li>▪ Cátodo de aire</li> <li>▪ Membrana de intercambio catiónico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 46 mW/m<sup>2</sup> y 6.4 W/m<sup>3</sup></li> <li>▪ COD: 33 %</li> </ul>

(Kamel <i>et al.</i> , 2020)	Relleno sanitario con mezcla de <i>Clostridium butyricum</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Bacillus sp.</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Bacillus subterraneus</i> , <i>Klebsiella pneumonia</i> , and <i>Enterobacter cloaca</i> .	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara simple</li> <li>▪ Ánodo y cátodo: tela de carbón</li> <li>▪ Sin mediador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 134.5 mW/m<sup>2</sup></li> <li>▪ CE: 55 %</li> <li>▪ COD: 86.6 %</li> </ul>
(Lakshmidivi <i>et al.</i> , 2020)	Residuos sólidos municipales con <i>Synechococcus sp.</i> y microflora anaeróbica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Doble cámara Asistida por algas de (AAMFC).</li> <li>▪ Ánodo y cátodo electrodos de grafito</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 95,63 mW/m<sup>2</sup></li> <li>▪ COD: 76.5 %</li> </ul>
(Bolognesi <i>et al.</i> , 2021)	Relleno sanitario Aguas residuales de lácteos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara dual</li> <li>▪ Ánodo y cátodo: acero inoxidable recubierto de grafito</li> <li>▪ Separador de intercambio de cationes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 344 mW/m<sup>3</sup></li> <li>▪ CE = 6.9 %</li> <li>▪ COD: 53.6 %</li> </ul>
(Saeed and Miah, 2021)	Salida de alcantarillado local	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Humedales artificiales con planta Vetiver</li> <li>▪ Placas de acero como electrodos</li> <li>▪ Filtro de biocarbón</li> <li>▪ Separador de lana de vidrio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 982 mW/m<sup>2</sup></li> <li>▪ No especifica CE ni COD</li> </ul>

(Dordievski <i>et al.</i> , 2022)	Materia orgánica Aguas de desecho municipal y metalúrgicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reactor cilíndrico de doble cámara</li> <li>▪ Ánodo y cátodo tela de carbón con acero inoxidable</li> <li>▪ Membrana de intercambio de protones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ COD 179.2 mg/Lh</li> <li>▪ No especifica <math>P_D</math> y CE</li> </ul>
(Gao <i>et al.</i> , 2023)	Lodos floculantes de semillas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara simple</li> <li>▪ Electrodo de cepillo de carbón</li> <li>▪ Membrana de intercambio de protones (PEM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>2.40 \text{ W/m}^3</math></li> <li>▪ COD 56%</li> <li>▪ No especifica a CE</li> </ul>

## Conclusiones

Las celdas de combustible microbianas se presentan como una alternativa de generación de energía por medio del uso de aguas contaminantes. Se ha demostrado que los residuos municipales junto con lixiviados pueden ser utilizados para este fin, los cuales pueden contener desde diferentes bacterias hasta metales provenientes de alguna industria cercana. La revisión arrojó mayor generación de energía en topologías utilizando humedales, mayor uso de topología de celda simple por su ahorro en una cámara catódica. Respecto a los electrodos predominó mayormente el uso de carbón en tela, cepillo, fieltro o grafito. Las ventajas del uso del CCM radica en la utilización de desechos para generación e energía. Sin embargo, uno de sus principales inconvenientes es la degradación del ánodo que está en contacto directo con bacterias que ocasiona el reemplazo constante. Además de su baja densidad de potencia generada. La cual para poder

ser usada en aplicaciones prácticas tendría que ser escalada utilizando diversos arreglos de varias celdas apiladas requiriendo mucho espacio.

## Referencias

- [1] Bolognesi, S., Ceconet, D., Callegari, A., & Capodaglio, A. G. (2021). Bioelectrochemical treatment of municipal solid waste landfill mature leachate and dairy wastewater as co-substrates. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(19), 24639–24649. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10167-7>
- [2] Das, D. (2018). *Microbial Fuel Cell. A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, Springer.
- [3] Dordievski, S., Yemendzhiev, H., Koleva, R., Nenov, V., Medić, D., Trifunović, V., & Maksimović, A. (2022). Application of microbial fuel

- cell for simultaneous treatment of metallurgical and municipal wastewater - A laboratory study. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 87(6), 775–784. <https://doi.org/10.2298/JSC211008009D>
- [4] Gao, L., Wei, D., Ismail, S., Wang, Z., El-Baz, A., & Ni, S. Q. (2023). Combination of partial nitrification and microbial fuel cell for simultaneous ammonia reduction, organic removal, and energy recovery. *Bioresource Technology*, 386(September), 129558. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129558>
- [5] Guadarrama-Pérez, O., Hernández-Romano, J., García-Sánchez, L., Gutierrez-Macias, T., & Estrada-Arriaga, E. B. (2019). Simultaneous bio-electricity and bio-hydrogen production in a continuous flow single microbial electrochemical reactor. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 38(1), 297–304. <https://doi.org/10.1002/ep.12926>
- [6] Hiegemann, H., Littfinski, T., Krimmler, S., Lübken, M., Klein, D., Schmelz, K. G., Ooms, K., Pant, D., & Wichern, M. (2019). Performance and inorganic fouling of a submersible 255L prototype microbial fuel cell module during continuous long-term operation with real municipal wastewater under practical conditions. *Bioresource Technology*, 294(July), <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122227>
- [7] Kamel, M. S., Abd-Alla, M. H., & Abdul-Raouf, U. M. (2020). Characterization of anodic biofilm bacterial communities and performance evaluation of a mediator-free microbial fuel cell. *Environmental Engineering Research*, 25(6), 862–870. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.412>
- [8] Lakshmidēvi, R., Gandhi, N. N., & Muthukumar, K. (2020). Carbon Neutral Electricity Production from Municipal Solid Waste Landfill Leachate Using Algal-Assisted Microbial Fuel Cell. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 191(2), 852–866. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03160-5>
- [9] Liu, H. & Logan B.E. (2004) Electricity Generation Using an Air Cathode Single Chambers Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane. *Environmental Science & Technology*, 38, 4040-4046. <http://dx.doi.org/10.1021/es0499344>
- [10] Logan, B.E. (2008). *Materials. Microbial Fuel Cells*, 61–84. <https://doi.org/10.1002/9780470258590.ch5>
- [11] Martinez, S. M., & Di Lorenzo, M. (2019). Electricity generation from untreated fresh digestate with a cost-effective array of floating microbial fuel cells. *Chemical Engineering Science*, 198, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.12.039>
- [12] Martinez, S. M., & Di Lorenzo, M. (2019). Electricity generation from untreated fresh digestate with a cost-effective array of floating microbial fuel cells. *Chemical Engineering Science*, 198, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.12.039>
- [13] Saeed, T., & Miah, M. J. (2021). Organic matter and nutrient removal in tidal flow-based microbial fuel cell constructed wetlands: Media and flood-dry period ratio. *Chemical*

- Engineering Journal, 411(January), 128507. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128507>
- [14] Zhao, Feng, Nelli Rahunen, John R. Varcoe, Alexander J. Roberts, Claudio Avignone-Rossa, Alfred E. Thumser, & Robert C. T. Slade. 2009. "Factors Affecting the Performance of Microbial Fuel Cells for Sulfur Pollutants Removal." *Biosensors and Bioelectronics* 24(7):1931–36. doi: 10.1016/J.BIOS.2008.09.030.