

**CELIDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS ACOPLADAS A HUMEDALES CONSTRUIDOS: una fuente de energía alternativa en desarrollo (revisión).**

**MICROBIAL FUEL CELLS COUPLED TO CONSTRUCTED WETLANDS: an alternative energy source under development (review).**

Herrera Cárdenas J. A.\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa Educativo en Paramédico. Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Prolongación Reforma 168 Barrio de Santiago Mihuacán Izúcar de Matamoros Pue. Teléfono: (243) 436 38 96

\*Correo electrónico: [jorgeahc@live.com.mx](mailto:jorgeahc@live.com.mx)

**Resumen**

Las celdas de combustible microbianas (CCM) acopladas a humedales construidos (HC), representan una tecnología novedosa, capaz de recuperar la energía liberada a partir de los procesos metabólicos de los consorcios bacterianos establecidos en la superficie del electrodo presente en la cámara anódica de estos dispositivos. En este trabajo se presentan los aspectos básicos de una tecnología que, si bien ya se ha estudiado desde hace poco mas de dos décadas, son pocas las contribuciones por parte de los países en desarrollo. Se presentan los resultados obtenidos de distintas configuraciones que se han evaluado, con la finalidad de identificar la importancia de diversos factores de diseño sobre el rendimiento energético y la capacidad de remoción de estos dispositivos. Se espera que más grupos de investigación se sumen a la tarea de evaluar el desempeño de estos dispositivos, con la finalidad de escalar tales sistemas y así poder resolver uno de los problemas de interés mundial como lo es el calentamiento global debido al uso desmedido de combustibles fósiles.

**Palabras clave:** *celdas de combustible microbianas, humedales construidos, energías renovables*

### **Abstract**

The microbial fuel cells (MFC) coupled to constructed wetlands (CW) represent a novel technology, capable of recovering the energy released from the metabolic processes of the bacterial consortia established on the surface of the electrode present in the anode chamber of these devices. This paper presents the basic aspects of a technology that, although it has already been studied for a little over two decades, there are few contributions from developing countries. The results obtained from different configurations that have been evaluated are presented in order to identify the importance of various design factors on the energy performance and removal capacity of these systems. It is expected that more research groups will join the task of evaluating the performance of these devices, in order to scale such systems and thus be able to solve one of the problems of world interest such as global warming due to the excessive use of fossil fuels.

**Key words:** *microbial fuel cells, constructed wetlands, renewable energy*

### **Introducción**

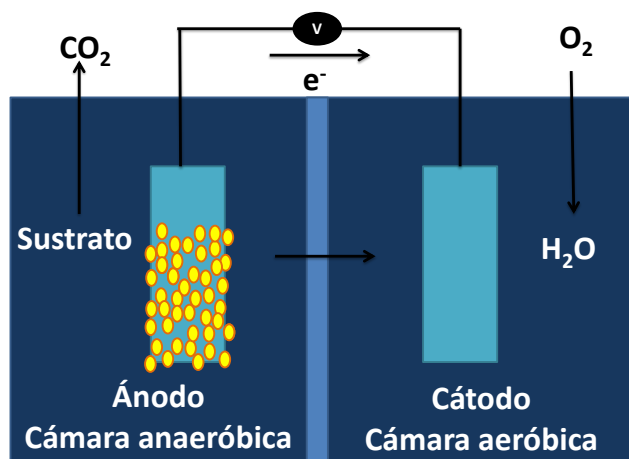
El acelerado crecimiento poblacional aunado a los cambiantes patrones de consumo ha traído consigo una serie de problemas ambientales debido al incremento en la demanda de recursos naturales. Procesos tales como: extracción, manufactura, transporte y distribución de diversos bienes y servicios han generado un severo desequilibrio ambiental debido a la creciente demanda por parte de una sociedad consumista.

Recientemente el sector energético ha captado la atención de la comunidad científica, dada la relación de la generación y uso de energía, con la generación de gases de efecto invernadero y sus consecuencias sobre el cambio climático (Velo, 2006), debido a la sobreexplotación de recursos no renovables, incluidos los combustibles fósiles utilizados como fuentes primarias de energía (Rennings et al., 2012; Ebenhack y Martínez, 2013). El agua es necesaria para generar energía, se requiere energía para entregar, limpiar y tratar el agua. Como dos recursos básicos para el desarrollo socioeconómico de la ciudad, el agua y la energía están íntimamente interrelacionadas (Stillwell et al., 2011). Lo anterior, aunado a que las escalas a las que se utilizan han ocasionado una serie de problemas ambientales tales como: contaminación del agua y calentamiento global, mismos que se deben atender urgentemente.

La continua preocupación sobre el cambio climático y el objetivo de muchos países de ser más independientes de las importaciones de energía, probablemente llevarán a un aumento en el uso de fuentes de energía renovables (Weitemeyer et al., 2015). Entre ellas se encuentran las energías eólica, solar, geotérmica, hidroeléctrica y bioenergía. La bioenergética es una rama de la biología que estudia las transformaciones y cambios de energía en sistemas vivos. En este contexto, las celdas de combustible microbianas (MFC) se han posicionado como una prometedora fuente de energía renovable (Xia et al., 2018), habiendo sido implementadas para la producción de hidrógeno y generación de energía *in situ* para la biorremediación y tratamiento de aguas residuales (Abbasy and Abbasi, 2012).

### **Celdas de combustible microbianas (CCM)**

Las CCM son una tecnología prometedora para extraer energía de diferentes fuentes y convertirlas en electricidad (Choudhury et al., 2017). Son dispositivos que transforman la energía química en electricidad mediante la actividad de microorganismos (Logan, 2008). El uso de bacterias o un consorcio de bacterias como catalizador brinda la posibilidad de utilizar una amplia gama de materia orgánica o inorgánica biodegradable, como desechos orgánicos y sedimentos del suelo (Roh y Woo, 2017). Tal como se muestra en la Figura 1, constan de dos compartimentos, ánodo y el cátodo, que a menudo están separados por una membrana de intercambio de protones (MIP). La cámara anódica contiene microorganismos que oxidan el sustrato disponible. La oxidación anaerobia se combina con la liberación de electrones que son transportados a través de la cadena respiratoria celular hacia el ánodo. Los sustratos utilizados varían desde azúcares y ácidos orgánicos como la glucosa o el acetato, hasta polímeros complejos como el almidón y la celulosa (Rismani et al., 2008).



**Figura 1.** Esquema general de una celda de combustible microbiana

### **Celdas de combustible microbianas acopladas a humedales construidos**

El rendimiento de las CCM puede verse afectado por diversos factores como: la arquitectura del sistema, la comunidad microbiana, el sustrato, pH, los donantes de electrones, los

aceptores de electrones, los materiales de los electrodos, el espaciado de los electrodos, la matriz y las condiciones de funcionamiento (Zhou et al., 2013; Aghababaie et al., 2015; Raimnejad et al., 2015). Para aumentar su rendimiento, se han integrado diferentes tratamientos biológicos con metodologías bioelectroquímicas (Saz et al., 2018), por ejemplo, las CCM se han combinado con: lagunas de oxidación, digestores anaeróbicos y humedales artificiales, con el objetivo de aumentar la eficiencia de utilización del sustrato (Li, 2017).

Los humedales artificiales (HC) son tecnologías naturales que se han utilizado para el tratamiento de aguas, utilizan procesos de autotratamiento naturales modificados que tienen lugar en el suelo, el agua y su entorno (Rozkošný et al., 2014) tales como: sorción, sedimentación, fotólisis, hidrólisis, volatilización, absorción y acumulación, exudación, degradación microbiana, filtración, precipitación y adsorción (García y Rodríguez, 2014). Se han utilizado para reducir las cargas de diversos contaminantes como: nutrientes (West et al. 2017; Nacphet et al., 2017), metales pesados (Marrugo et al., 2017; Papaevangelou et al., 2017), materia orgánica (SgROI et al., 2017), antibióticos (Almeida et al., 2017; Chen et al., 2017) y pesticidas en efluentes agrícolas (Lv et al., 2016).

Poseen algunas zonas aeróbicas cerca de una interfaz aire-agua (Corbella et al., 2014). A su vez, las CCM requieren un gradiente redox artificial, es decir, zonas aeróbicas y anaeróbicas para su funcionamiento (Xu et al., 2016). Recientemente, los gradientes redox estratificados naturalmente existentes de los HC se utilizan para desarrollar un nuevo tipo de tecnología de fusión con el nombre de celdas de combustible microbianas acopladas a humedales construidos (HC-CCM). Por lo tanto, estos sistemas se han posicionado como tecnología innovadora que integra ambos dispositivos para el tratamiento de aguas residuales y generación de energía, confiables y adecuados para la operación a largo plazo (Villaseñor *et al.*, 2013; Corbella *et al.*, 2014).

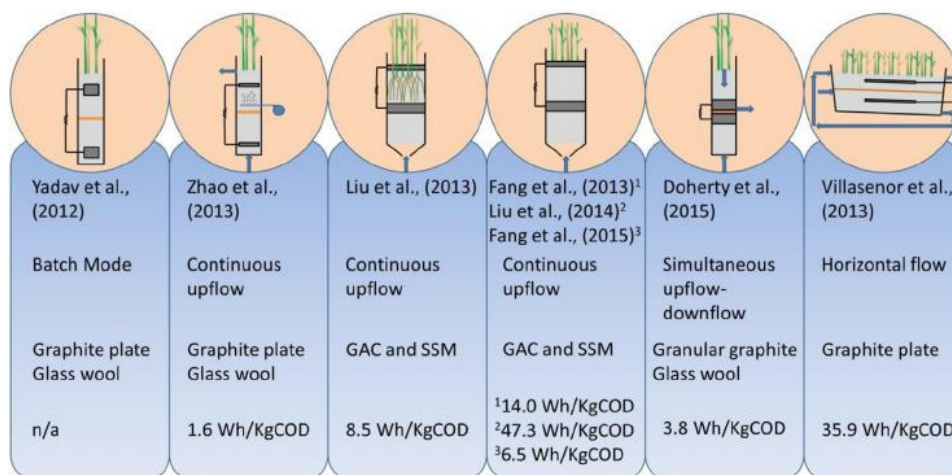
## AVANCES Y DESARROLLO

La evaluación del rendimiento de estos dispositivos se realiza mediante la medición de la máxima densidad de potencia o de corriente, la cual se mide en miliwatts (mW) o miliamperios (mA) por metro cubico ( $m^3$ ) respectivamente, datos que se obtienen mediante la elaboración de curvas de polarización, las cuales se construyen una vez que el sistema ha alcanzado cierto grado de madurez.

Los avances publicados acerca de CCM a nivel global presentan mínimas contribuciones de parte de los países en vías de desarrollo, siendo una alternativa tecnológica aún en investigación y con pocos resultados de aplicación a gran escala. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue realizar un análisis de los trabajos publicados sobre humedales construidos acoplados a celdas de combustible microbianas (HC-CCM), con la finalidad de identificar los aspectos básicos que rigen el funcionamiento de estos sistemas.

En la Figura 2 se observan las distintas configuraciones de sistemas CW-MFC que se han estudiado. Con la primera configuración (Yadav et al., 2012) se obtuvieron máximas densidades de potencia (MDP) de  $15.73 \text{ mW/m}^2$  y 75% de remoción de DQO; por otra parte, Zhao y colaboradores (2013) reportaron que la aireación tiene un efecto positivo sobre el rendimiento energético obteniendo una MDP de  $12.83 \mu\text{W/m}^2$  sin aireación del cátodo y  $9.4 \text{ mW/m}^2$  con aireación, además de una mejora en la remoción de carga orgánica. Liu y colaboradores (2013) evaluaron dos sistemas CW-MFC para convertir la energía solar en electricidad según los principios de MFC fotosintético utilizando exudados de raíz de *Ipomoea aquatica* como parte de combustible. La densidad de potencia máxima de  $12.42 \text{ mW/m}^2$  producida a partir del CW-MFC plantado con *Ipomoea aquatica* fue 142% mayor en comparación con un sistema no plantado; este mismo autor, pero en 2014 evaluó distintos

materiales para el biocátodo y configuraciones de reactores. Comparó y evaluó tres materiales de biocátodo de uso común, incluidos la malla de acero inoxidable (SSM), la tela de carbono (CC) y el carbón activado granular (GAC). El biocátodo GAC-SSM logró la mayor densidad de potencia máxima de 55.05 mW/m<sup>2</sup>.



**Figura 2.** Diversas configuraciones de CW-MFC. Fuente: Xu et al., (2016)

Doerthy y colaboradores (2015) investigaron los efectos del espaciado entre los electrodos y el patrón de flujo. Al proporcionar un régimen de flujo ascendente / descendente simultáneo, la densidad máxima de potencia aumenta en un 70% a 0.268 W/m<sup>3</sup> y se logró una eficiencia de eliminación de amoníaco del 75% y una remoción de DQO del 64% utilizando como influente residuos de una granja porcina.

## Conclusiones

Las CCM acopladas a HC representan una fuente de energía renovable frente al objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Son una tecnología en desarrollo que si bien no ha mostrado un gran rendimiento energético, también representa una opción para optimización de los procesos de depuración de aguas residuales domésticas e industriales. Lo

anterior posiciona esta tecnología, no solo como una fuente de energía alternativa sino también como una alternativa para la recuperación de la calidad del agua en ecosistemas acuáticos.

## REFERENCIAS

Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). Formation and impact of granules in fostering clean energy production and wastewater treatment in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(3), 1696-1708.

Aghababaie, M., Farhadian, M., Jeyhanipour, A., & Biria, D. (2015). Effective factors on the performance of microbial fuel cells in wastewater treatment—a review. *Environmental Technology Reviews*, *4*(1), 71-89.

Almeida, C. M. R., Santos, F., Ferreira, A. C. F., Gomes, C. R., Basto, M. C. P., & Mucha, A. P. (2017). Constructed wetlands for the removal of metals from livestock wastewater—Can the presence of veterinary antibiotics affect removals? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *137*, 143-148.

Chen, J., Liu, Y. S., Zhang, J. N., Yang, Y. Q., Hu, L. X., Yang, Y. Y., & Ying, G. G. (2017). Removal of antibiotics from piggery wastewater by biological aerated filter system: Treatment efficiency and biodegradation kinetics. *Bioresource Technology*, *238*, 70-77.

Choudhury, P., Uday, U. S. P., Mahata, N., Tiwari, O. N., Ray, R. N., Bandyopadhyay, T. K., & Bhunia, B. (2017). Performance improvement of microbial fuel cells for wastewater treatment along with value addition: A review on past achievements and recent perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *79*, 372-389.



Corbella, C., Garfí, M., & Puigagut, J. (2014). Vertical redox profiles in treatment wetlands as function of hydraulic regime and macrophytes presence: Surveying the optimal scenario for microbial fuel cell implementation. *Science of the total environment*, 470, 754-758.

Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X., & Wang, W. (2015). Nutrient and organics removal from swine slurry with simultaneous electricity generation in an alum sludge-based constructed wetland incorporating microbial fuel cell technology. *Chemical Engineering Journal*, 266, 74-81.

Ebenhack, B. W., & Martínez, D. M. (2013). *The Path to More Sustainable Energy Systems: How Do We Get There from Here?* Momentum Press.

García-Rodríguez, A., Matamoros, V., Fontàs, C., & Salvadó, V. (2014). The ability of biologically based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminants—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(20), 11708-11728.

Li, K. (2017). *Analysis of Energy losses of Microbial Fuel Cells (MFCs) and Design of an Innovative Constructed Wetlands-MFC* (Doctoral dissertation, The Ohio State University).

Liu, S., Song, H., Li, X., & Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal of Photoenergy*, 2013.

Liu, S., Song, H., Wei, S., Yang, F., & Li, X. (2014). Bio-cathode materials evaluation and configuration optimization for power output of vertical subsurface flow constructed wetland—Microbial fuel cell systems. *Bioresource Technology*, 166, 575-583.

Logan, B. E. (2008). *Microbial fuel cells*. John Wiley & Sons.

- Ly, T., Zhang, Y., Zhang, L., Carvalho, P. N., Arias, C. A., & Brix, H. (2016). Removal of the pesticides imazalil and tebuconazole in saturated constructed wetland mesocosms. *Water Research*, 91, 126-136.
- Marrugo-Negrete, J., Enamorado-Montes, G., Durango-Hernández, J., Pinedo-Hernández, J., & Díez, S. (2017). Removal of mercury from gold mine effluents using *Limnocharis flava* in constructed wetlands. *Chemosphere*, 167, 188-192.
- Nakphet, S., Ritchie, R. J., & Kiriratnikom, S. (2017). Aquatic plants for bioremediation in red hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus*, *Oreochromis mossambicus*) recirculating aquaculture. *Aquaculture International*, 25(2), 619-633.
- Papaevangelou, V. A., Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2017). Chromium removal from wastewater using HSF and VF pilot-scale constructed wetlands: Overall performance, and fate and distribution of this element within the wetland environment. *Chemosphere*, 168, 716-730.
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., & Oh, S. E. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: a review. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 745-756.
- Rennings, K., Brohmann, B., Nentwich, J., Schleich, J., Traber, T., & Wüstenhagen, R. (Eds.). (2012). Sustainable energy consumption in residential buildings (Vol. 44). Springer Science & Business Media.
- Rismani-Yazdi, H., Carver, S. M., Christy, A. D., & Tuovinen, O. H. (2008). Cathodic limitations in microbial fuel cells: an overview. *Journal of Power Sources*, 180(2), 683-694.
- Roh, S. H., & Woo, H. G. (2017). Microbial Fuel Cells. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.

Rozkošný, M., Kriška, M., Šálek, J., Bodík, I., & Istenič, D. (2014). Natural Technologies of Wastewater Treatment. GW CEE, pp 138, Dinamarca.

Saz, Ç., Türe, C., Türker, O. C., & Yakar, A. (2018). Effect of vegetation type on treatment performance and bioelectric production of constructed wetland modules combined with microbial fuel cell (CW-MFC) treating synthetic wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-16.

Sgroi, M., Pelissari, C., Ávila, C., Sezerino, P. H., Vagliasindi, F. G. A., García, J., & Roccaro, P. (2017, May). Removal of Conventional Water Quality Parameters, Emerging Contaminants and Fluorescing Organic Matter in a Hybrid Constructed Wetland System. In *Frontiers International Conference on Wastewater Treatment and Modelling* (pp. 313-317). Springer, Cham.

Srivastava, P., Yadav, A. K., Garaniya, V., & Abbassi, R. (2019). Constructed wetland coupled microbial fuel cell technology: development and potential applications. In *Microbial Electrochemical Technology* (pp. 1021-1036). Elsevier.

Stillwell, A. S., King, C. W., Webber, M. E., Duncan, I. J., & Hardberger, A. (2011). The energy-water nexus in Texas. *Ecology and Society*, 16(1).

Velo García, E. (2006). Desafíos del sector de la energía como impulsor del desarrollo humano. Cuadernos Internacionales de Tecnología para el Desarrollo Humano, 2006, núm. 5.

Weitemeyer, S., Kleinhans, D., Vogt, T., & Agert, C. (2015). Integration of Renewable Energy Sources in future power systems: The role of storage. *Renewable Energy*, 75, 14-20.

West, M., Fenner, N., Gough, R., & Freeman, C. (2017). Evaluation of algal bloom mitigation and nutrient removal in floating constructed wetlands with different macrophyte species. *Ecological Engineering*, 108, 581-588.

- Xia, C., Zhang, D., Pedrycz, W., Zhu, Y., & Guo, Y. (2018). Models for microbial fuel cells: a critical review. *Journal of Power Sources*, 373, 119-131.
- Xu, L., Zhao, Y., Doherty, L., Hu, Y., & Hao, X. (2016). The integrated processes for wastewater treatment based on the principle of microbial fuel cells: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(1), 60-91.
- Yadav, A. K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., & Mishra, B. K. (2012). Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. *Ecological Engineering*, 47, 126-131.
- Zhao, Y., Collum, S., Phelan, M., Goodbody, T., Doherty, L., & Hu, Y. (2013). Preliminary investigation of constructed wetland incorporating microbial fuel cell: batch and continuous flow trials. *Chemical Engineering Journal*, 229, 364-370.
- Zhou, M., Wang, H., Hassett, D. J., & Gu, T. (2013). Recent advances in microbial fuel cells (MFCs) and microbial electrolysis cells (MECs) for wastewater treatment, bioenergy and bioproducts. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 88(4), 508-518.