

Artículo de Revisión

Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas

Electric power generation and wastewater treatment using microbial fuel cells

Mireya Sánchez^{1,2}, Lenys Fernández^{1*}, Patricio Espinoza-Montero^{1*}

¹Escuela de Ciencias Químicas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador, 17012184; mires-40@hotmail.com; pespinoza646@puce.edu.ec

²Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ciencias Naturales, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, 0501491

*Correspondencia: lmfernandez@puce.edu.ec

Citación: Sánchez, M., Fernández, L., & Zevallos, I., & Espinoza-Montero, P., (2021). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas. *NovasinerGía*. 4(1). 164-180. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.10>

Recibido: 10 abril 2020

Aceptado: 20 mayo 2021

Publicación: 01 junio 2021

NovasinerGía
ISSN: 2631-2654



Copyright: 2021 derechos otorgados por los autores a NovasinerGía.
Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC). (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Resumen: El agua es el recurso vital para los seres vivos, sin embargo, durante los últimos años su calidad se ha deteriorado convirtiéndose en un problema de contaminación a nivel mundial. Por otro lado, la crisis energética no permite que la población tenga una buena calidad de vida, lo que detiene de cierta manera, el desarrollo. Debido a ello, se requiere opciones para el tratamiento de agua residual y generación de energía eléctrica, siendo las celdas de combustible microbianas (MFCs, por sus siglas en inglés) una tecnología emergente que ha permitido una alianza entre las dos problemáticas. Las MFCs, aprovechan el metabolismo de las bacterias para el tratamiento de agua residual generando a su vez energía. En la presente obra se realiza una revisión, en base a investigaciones recientes, de los aspectos más importantes que rigen el funcionamiento de las MFCs, tales como clasificación, componentes, mecanismos de funcionamiento, actividad microbiana y material de electrodos. A partir del análisis de la información recolectada, se puede concluir que la generación de bioelectricidad a partir del tratamiento de aguas residuales es posible con esta tecnología que ha tomado mucha fuerza en los últimos años con resultados alentadores.

Palabras clave: Agua residual, bioelectricidad, celdas de combustible microbianas, electrodos, energía eléctrica, microorganismos.

Abstract: Water is a vital resource for living beings; however, during the last years, its quality has deteriorated, becoming a global pollution problem. On the other hand, the energy crisis does not allow the population to have a good quality of life, which stops in a certain way, the development. Because of this, options for wastewater treatment and electric power generation are required, being microbial fuel cells (MFCs), a representative technology that has allowed an alliance between the two problems. The MFCs take advantage of the metabolism of the bacteria for the treatment of wastewater while generating energy. In this work, based on recent research, the most important aspects that govern the operation of MFCs, such as classification, components, operating mechanisms, microbial activity, and electrode material. From the analysis of the information collected, it can be concluded that the generation of bioelectricity from wastewater treatment is possible with this unique technology that provides encouraging results.

Keywords: Bioelectricity, electrical energy, electrodes, microbial fuel cells, microorganisms, wastewater.

1. Introducción

La disminución de la contaminación ambiental constituye un reto para la humanidad, ya que gran parte se ha originado por actividades ejecutadas por el hombre. Es por ello que, el desarrollo sostenible se ha planteado para realizar un cambio integral enfocado a la naturaleza y los seres humanos, considerando el sentido de responsabilidad y perdurabilidad de los recursos para las actuales y futuras generaciones (López, 2020). Con el fin de cumplir con lo establecido, investigaciones científicas recientes se enfocan en impulsar tales objetivos, dando lugar a tecnologías amigables con el ambiente, protegiendo el suelo, aire, agua, además de brindar un beneficio social; ejemplo sobresaliente de ello son las MFCs.

La tecnología sobre las MFCs se fundamenta en conocimientos científicos que abarcan disciplinas como la biología, microbiología, electroquímica e ingeniería de materiales (Mohan *et al.*, 2019) en las que se produce energía a partir de la transformación de la materia orgánica con base en el metabolismo bacteriano. La MFCs presenta ventajas sobre otras metodologías convencionales ya que no genera lodos activados, no requiere aireación, se adapta a condiciones habituales y es respetuosa con el medio ambiente, además, de la generación de electricidad que puede optimizarse con estos dispositivos (Yaqoob, Ibrahim & Rodríguez-Couto, 2020). Es por ello, que en el presente trabajo se discute una revisión bibliográfica de conceptos fundamentales, funcionamiento, clasificación y aplicaciones sobre las MFCs con el fin de actualizar el conocimiento existente hasta el presente reporte.

2. Metodología

El presente trabajo se basó en una investigación cualitativa-documental relacionada a MFCs, la cual se fundamentó en bases de datos reconocidas como: ScienceDirect[®] y Google Scholar[™]. Se ha enfocado en áreas ambientales relacionadas con agua (específicamente residual). Las palabras claves utilizadas: MFCs, Water MFCs, Review microbial fuel cells y otros, con relación a microbiología, química y ambiente, comprendido desde el año 2015.

3. Resultados

Durante los últimos años, el tratamiento de efluentes basado en la electroquímica ha brindado resultados impresionantes ante su eficiencia para la remediación de contaminantes a partir de aguas y suelos. Además, da paso a la generación de energías renovables y su posible aplicación a escala macro, especialmente en zonas que carecen de energía eléctrica (Ganiyu, Martínez-Huitile, & Rodrigo, 2020). El diseño de una MFCs es un factor clave en el rendimiento, tratamiento de agua residual y producción de electricidad para futuras aplicaciones a nivel industrial (Munoz-Cupa, Hu, Xu & Bassi, 2021). De manera general los dispositivos MFCs se asemejan a baterías y las más comunes constan de dos cámaras compuestas de un bioánodo (biológico) además de un cátodo (abiótico), conectados por un cable eléctrico y separados por una membrana de intercambio de protones (Rahimnejad, Asghary & Fallah, 2020). El metabolismo de los microorganismos, procesos de oxidación de la materia orgánica, permite la transferencia de electrones hacia el ánodo de soporte y este a su vez lleva los electrones hacia el cátodo (Munoz-Cupa *et al.*, 2021).

Cabe recalcar la influencia que poseen los electrodos en el rendimiento y costo del sistema, por ello se requieren que estén conformados por materiales que permitan ser rentables y aplicables a diversas escalas, lo cual es un gran desafío. Uno de los elementos más utilizados en los últimos años, es el carbono, debido a la estabilidad química que presenta, alta conductividad, biocompatibilidad y bajo costo (Zhang, Liu, Van der Bruggen & Yang, 2017). Sin embargo, también se puede mencionar que

se ha extendido el uso de nanocompuestos en base a grafeno, polianilina y nanotubos de carbono, entre otros (Kaur, Marwaha, Chhabra, Kim, & Tripathi, 2020).

3.1. *Funcionamiento MFCs*

Las MFCs se considera como un reactor bioelectroquímico directo, en el cual se transforma energía química en eléctrica con una particular participación de bacterias. Las MFCs requieren de microorganismos para convertir la energía química, presente en el agua como sustrato, en energía eléctrica, mediante la transferencia de electrones generados por su actividad metabólica oxidativa hacia el ánodo. Los electrones entran en el circuito eléctrico y son llevados al cátodo donde pueden ser utilizados en diferentes procesos de reducción. El proceso anódico hace posible la degradación de la materia orgánica, la purificación del agua y la generación de electrones (Deval *et al.*, 2017), por otro lado, sobre el cátodo se puede llevar a cabo la biorremediación de compuestos tales como xenobióticos o metales pesados (Kumar, Yadav, & Patil, 2020). Las MFCs se las puede clasificar por el tipo de sustrato que las alimenta, por el tipo de baterías, tipo de bacterias, biopelículas adheridas a la superficie del electrodo, por sus características electroquímicas, por los factores químicos y elementos físicos que influyen en el rendimiento y por su arquitectura. En un sistema de MFCs, la bioelectricidad se puede generar por organismos heterotróficos y fotosintéticos o combinados (Ishii *et al.*, 2013)

3.2. *Clasificación MFCs*

MFCs son dispositivos bioelectroquímicos, los cuales permiten la conversión de energía química desde compuestos orgánicos e inorgánicos en electricidad utilizando microorganismos como catalizadores. Existen diversos diseños, sin embargo, los más utilizados son:

3.2.1. *MFCs Heterótrofos*

Las MFCs heterótrofos generan energía eléctrica a gracias al proceso metabólico de la respiración microbiana, en el cual continuamente se requiere de un suministro de materia orgánica. Están compuestas por cámaras anódicas y catódicas, separadas por una membrana de intercambio de protones (PEM, por sus siglas en inglés), la cual permite el paso de H^+ (u otros cationes) al cátodo. Debido a la diferencia de carga, los electrones se transportan a la cámara catódica por medio de un circuito eléctrico externo que conecta al ánodo y cátodo (Repuello, Ticlausaca, & Román, 2020); de tal manera, que los microorganismos oxidan la materia orgánica de la zona anódica completando la respiración y a su vez transfieren electrones al ánodo, proceso en el cual la energía química es capturada.

Las coenzimas dinucleótido de nicotinamida y adenina (NAD^+) y nicotinamida adenina dinucleótido deshidrogenasa ($NADH$) involucradas en el proceso, se oxidan y reducen con el fin de sintetizar ATP como se muestra en la figura 1 (Comeau, 2017). En el desarrollo de MFCs se implementan estrategias para incrementar la eficiencia metabólica y optimizar la transferencia de electrones desde la biopelícula al electrodo. Donantes de electrones como materia orgánica, se oxidan electroquímicamente debido al crecimiento de bacterias activas generando la biopelícula (Kiran & Patil, 2019), la cual también se define como comunidades de microorganismos adheridos a superficies bióticas o abióticas (Seow *et al.*, 2016). Los microorganismos electroquímicamente activos mejorarán la eficiencia ya que maximizan las densidades de corriente y por ende la eficiencia energética (Obileke, Onyeaka, Meyer & Nwokolo, 2021).

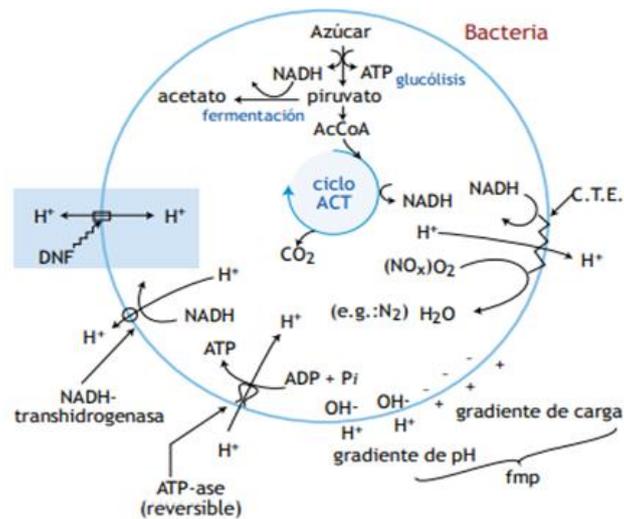


Figura.1: Bioenergética bacteriana (Comeau, 2017).

3.2.2. MFCs fotosintéticas

Estas MFCs son conocidas como células bio-solares, dado que producen energía eléctrica basado en reacciones biocatalíticas por organismos fotosintéticos, entre los más conocidos algas o cianobacterias. Se fundamentan en la fotosíntesis, donde microorganismos capturan energía del sol para convertir el dióxido de carbono y agua, en oxígeno y carbohidratos necesarios para la respiración. Se liberan electrones hacia las vías de transferencia extracelulares y el flujo eléctrico al cátodo por medio del circuito eléctrico externo (Figura 2). A su vez los protones liberados se difunden desde la cámara anódica a la catódica para combinarse con electrones y oxígeno y de esa forma producir agua (Obileke *et al.*, 2021); haciendo posible la generación de electricidad a partir de energía solar sin necesidad de materia orgánica, únicamente aumentando el potencial electroquímico en la celda para dividir y recrear agua, produciendo oxígeno, protones y electrones (Bazdar, Roshandel, Yaghmaei & Mardanpour, 2018).

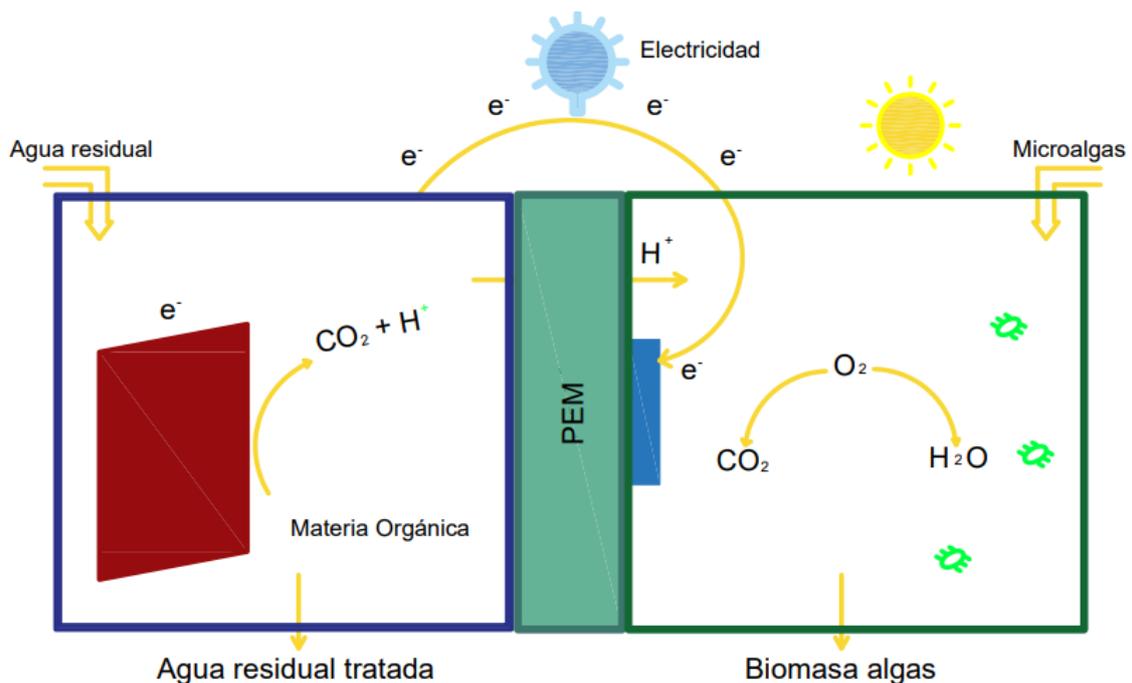


Figura 2: Esquema fotosintético MFCs. Adaptado de Bazdar *et al.*, 2018.

3.2.3. MFCs híbridas

Las MFCs híbridas son consideradas como una tecnología prometedora respecto a las MFCs independientes, sin embargo, se requiere reducir costos, e incrementar la productividad. Comprende procesos tales como físicos (desorción, membrana biorreactores), químicos (electro-fenton, fotoquímico) y biológicos (electrólisis) como lo menciona (Zhang *et al.*, 2019). Este sistema integra organismos heterótrofos (oxidan la materia orgánica y transferencia de electrones al ánodo) y fotosintéticos (proporcionan oxígeno *in situ*, el cual es un catalizador sostenible para el cátodo) encargados de generar electricidad (Obileke *et al.*, 2021).

3.3. Componentes de las MFCs

Una MFC consta de dos cámaras, anódica y catódica, mismas que contienen al ánodo y cátodo respectivamente, separadas por PEM, como se muestra en la figura. 3, en donde los microorganismos en la parte anódica proceden a degradar la materia orgánica de forma anaerobia con el fin de liberar electrones. Estos son transportados al cátodo por medio de un circuito externo, de igual forma los protones generados, serán selectivamente conducidos por la membrana de intercambio. Ambos productos dados en la cámara anódica pasarán al cátodo y reaccionarán con el oxígeno para producir agua (Ancona *et al.* 2020).

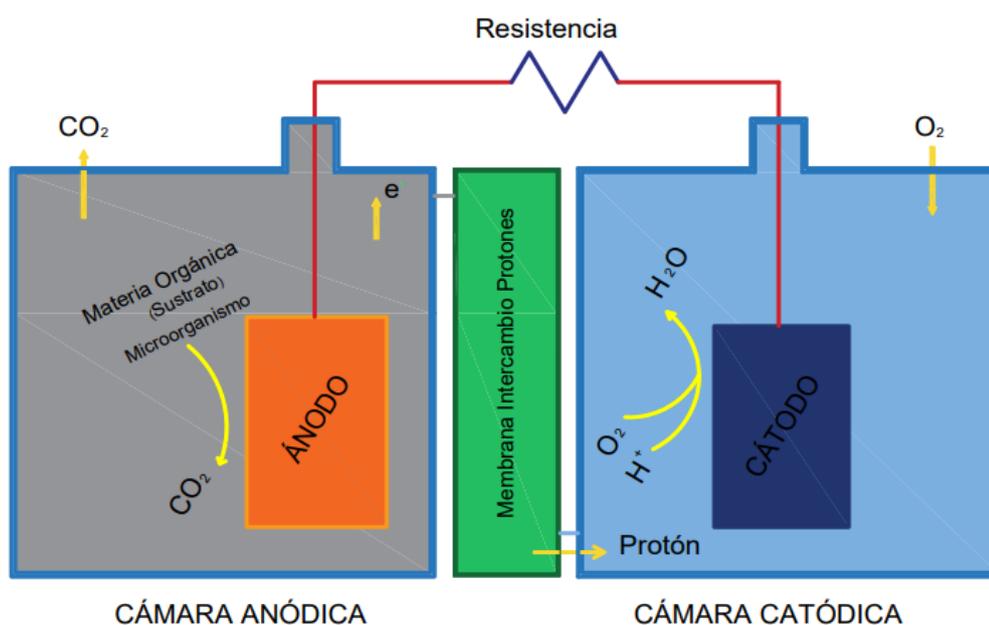


Figura 3: Esquema MFCs. Adaptado de Choi & Ahn (2015).

Los materiales de los cuales generalmente se construyen las cámaras para las MFCs son vidrio, policarbonato y plexiglás (Kitafa & Al-saned, 2021). Con el fin de lograr una eficiente transferencia de electrones y adhesión microbiana se debe considerar forma y porosidad de la superficie del electrodo. Para los electrodos comúnmente se usa papel y tela de carbón, grafito y fieltro de grafito, acero inoxidable, cerámica (Kalathil, Patil & Pant, 2018), platino o materiales catalíticos de Pt-negro (Kitafa & Al-saned, 2021). La cámara anódica debe alimentarse de sustratos orgánicos, que serán utilizados por los microorganismos para producir los electrones que fluirán al cátodo por el circuito externo, no obstante, debido a las características biológicas de MFCs, los electrodos deben promover la adhesión celular y poseer una tendencia limitada a la contaminación tanto química y biológica, siendo el material de carbono los más utilizados, además de rentabilidad y facilidad de producción (Jatoi *et al.*, 2021)

3.3.1. *Microorganismos*

En las MFCs, para la eficiente transferencia de electrones se requiere de la formación de una biopelícula en la superficie del ánodo (Guo, Wang, Zhang, Wen & Li, 2020). Con base en los estudios realizados las especies responsables en gran parte de la población microbiana son: *Geobacter*, *Shewanella* además de *Proteobacter*, *Pseudomonas*, *Firmicutes*, *Acidobacteria* y el reino de los hongos. No obstante, las bacterias fotosintéticas también son eficientes en estos sistemas debido a la eliminación de dióxido de carbono. Se ha propuesto la relación sinérgica entre bacterias fotosintéticas y heterótrofas (Liu & Choi, 2017), en este punto es importante resaltar el uso de algas como *Leptolyngbya* sp para este fin (Maity *et al.*, 2014). De manera general los microorganismos gram negativos pertenecen a su vez a la clasificación de electrógenos que poseen una capa celular externa que se adapta al sistema. Por último, se han utilizado cultivos mixtos de población microbiana, por ejemplo, comunidad microbiana natural de aguas residuales domésticas, sedimentos de aguas marinas y lacustres, así como aguas residuales de cervecerías (Yang & Chen, 2021).

3.3.2. *Plantas y sustratos*

La generación de bioelectricidad se puede lograr a través de consorcios microbianos como resultado de la degradación de la materia orgánica. Al hacer referencia a una celda de combustible microbiana vegetal (PMFC, por sus siglas en inglés), se relaciona a las plantas y microorganismos en la sección de la rizosfera para convertir la energía solar en electricidad. En su mayoría plantas pantanosas resistentes a la sal (como *Glyceria máxima*), pero además se requiere analizar características como morfología de la raíz, eficiencia fotosintética, entre otras (Nitorisravut & Regmi, 2017).

Por otro lado, se debe examinar los sustratos orgánicos en las MFCs que permitan la digestión anaeróbica ya que proporciona carbono (nutrientes) y son fuentes de energía. Siendo en aguas residuales las más usadas para producir electricidad de manera continua (Sheikh, Karmaker, Solayman, & Mayna, 2018), incluyendo las provenientes de la industria del petróleo (Allami, Hasan, Redah, Hamody & Abd Ali, 2018), desecho de lodos (Ardakani & Gholikandi, 2020) restos de frutas y verduras (Logroño, Ramírez, Recalde, Echeverría, & Cunachi, 2015), y sustratos simples como glucosa, acetato, propionato y butirato (Sun, Zhang, Wu, Dong & Angelidaki, 2019). Destacándose acetato y glucosa, debido a que son los más utilizados en investigaciones, sin embargo, existe múltiples estudios que usan agua residual, doméstica e industrial como sustrato y catalizador (Dannys, Green, Wettlaufer, Madhurnathakam, & Elkamel, 2016)

3.3.3. *Membrana de Intercambio de protones (PEM)*

El objetivo principal la PEM es evitar la mezcla del catolito y analito, además del intercambio de protones entre los dos compartimientos. No obstante, el adecuado funcionamiento de las MFCs puede verse afectado por elevadas temperaturas, incrementos en la resistencia del sistema y alto costo de los materiales; aunque se puede evidenciar estudios que mitigan estos inconvenientes (Kim & Patel, 2020).

Las PEM son utilizadas con mayor frecuencia en MFCs de dos cámaras, conectadas directamente al cátodo para facilitar el transporte de protones en el sistema (Lee, Kim & Cho, 2015). Por otro lado, se debe considerar que puede ocurrir su degradación con el paso del tiempo debido a reacciones físicas, químicas y biológicas (Flimban, Hassan, Rahman, & Oh, 2020). Las PEMs mantienen un equilibrio tanto de iones y electrones, siendo vital su presencia en el sistema para la mejora del

rendimiento, dado que la conductividad del protón permite acelerar la cinética de la reacción electroquímica (Choi *et al.*, 2012).

3.3.4. Arquitecturas de las MFCs

El diseño y arquitectura de las MFCs varían por número de cámaras y modo de operación:

a.- MFCs dos cámaras

Como su nombre lo indica, consta de dos cámaras (anódica y catódica) separadas por una membrana de intercambio iónico, siendo la forma más conocida y utilizada en laboratorios (Li *et al.*, 2018b).

b.- MFCs cámara única

Posee una cámara anódica acoplada con un cátodo al aire, al cual se trasladan electrones y protones (Al Lawati, Jafary, Baawain & Al-Mamun, 2019).

c.- MFCs apilado

Se basa en la integración de MFCs interconectados en serie o paralelo y se dan en base a electrodo y flujo hidráulico como lo menciona Tharali, Sain & Osborne (2016):

- Conexiones de electrodos en serie en modo de flujo paralelo.
- Conexión de electrodos en paralelo en modo de flujo paralelo.
- Conexiones de electrodos en serie en modo de flujo en serie.
- Conexión de electrodos en paralelo en modo de flujo en serie modo.

De acuerdo con estudios realizados por Choi & Ahn (2013), se han obtenido mejores resultados en la reducción de contaminantes con la última clasificación tanto para la disminución de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), como en eficiencia coulumbica y densidades de potencias máximas.

d.- MFCs tubular

Utilizadas para el tratamiento de carga orgánica en bajas concentraciones. El diseño tubular permite distribuir de forma reproducible bioprocesos, permitiendo ejecutar etapas de pulido, reduciendo los requerimientos para la obtención de energía en el tratamiento de agua (Me & Bakar, 2020).

e.- MFCs múltiples ánodos y cátodos

Incorpora múltiples MFCs en una sola celda como se muestra en la figura 4; con la ventaja de generar mayor energía, menor costo y superficie requerida; obteniendo una eficiencia similar a la alcanzada de manera unitaria con las celdas. A pesar de ello, se debe considerar que la DQO es un limitante para el rendimiento debido al incremento de la densidad de potencia (Jiang *et al.*, 2011).

3.3.5. Mediadores redox

Para la transferencia de los electrones formados en la degradación, se requiere de compuestos con potencial redox bajo (mediadores redox) en el medio de reacción, los cuales extraen los electrones de las reacciones metabólicas y los transporta al ánodo. Entre las características que debe poseer un mediador redox, se encuentran formar un par redox reversible sobre el electrodo, vincularse a NADH y tener un valor potencial negativo alto, estabilidad en estado oxidado y reducido, además de ser soluble en medio acuoso y de baja toxicidad (Martinez & Alvarez, 2018).

Como ejemplo de mediadores redox utilizados en varias MFCs, se pueden mencionar PQQ (Pirrol quinolina quinona) (Rosenbaum, He, & Angenent, 2011); riboflavina, AQS (antraquinona-2-sulfonato) (Adelaja, Keshavarz & Kyazze, 2015) y Antraquinona-2,6-disulfonato (AQDS), siendo esta última la que permanecería electroquímicamente activa por un periodo más largo de tiempo, especialmente en el tratamiento de colorantes azoicos y degradación de materia orgánica (Tamirat, Guan, Liu, Luo, & Xia, 2020).

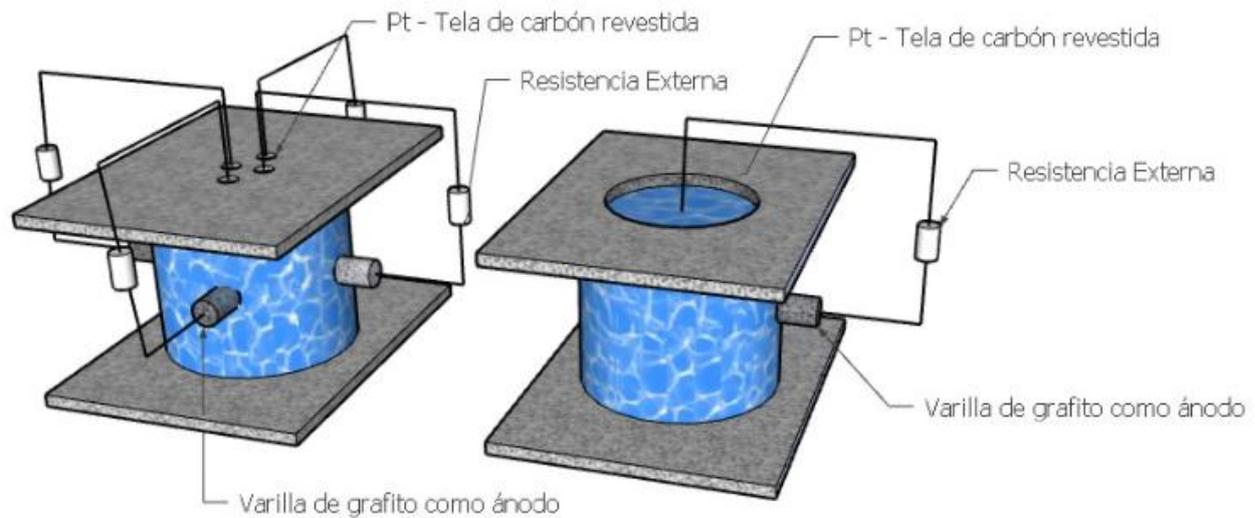


Figura 4: Diagrama de MFC múltiples ánodos y cátodos. Adaptado de Jiang *et al.*, 2011.

3.3.6. Electrodo

En el cátodo de una MFCs los protones, electrones y oxígeno forman agua, y el área de superficie electródica influye significativamente en la generación de bioelectricidad. Entre los materiales comúnmente utilizados son Pt-revestidos, tela de carbón (aunque poseen elevados costos), gránulos de grafito, carbón activado, entre otros. Por otro lado, la transferencia de electrones del ánodo al cátodo se da por un circuito externo, compuesto principalmente de gránulos, varillas, placas y materiales fibrosos (fieltro, espuma, malla, tela, papel y fibras) (Kalathil *et al.*, 2018). Durante los últimos años, se ha reconocido la importancia de los nanomateriales para electrodos ya que mejoran considerablemente propiedades mecánicas, físicas y térmicas, similares a los que se presenta con acero inoxidable tales como nanocompuestos de grafeno, polianilina, nanotubos de carbón que permitirían mejorar el sistema, además de convertirse en un catalizador eficaz (Kaur *et al.*, 2020).

3.4. Aplicaciones

Las MFCs es una tecnología ecológica que permite la simultánea generación de energía y tratamiento de agua residual, basado en diversos procesos de microorganismos, aplicado a campos y con diferentes compuestos como sustratos y diversos medios contenidos en las cámaras (Sonawane, Ezugwu, & Ghosh, 2020), además, de diversos materiales de electrodos, donde su aplicación en la reducción de diversos contaminantes ha sido significativa. Como se muestra en la tabla 1 el % de reducción de la DQO logrado en aguas residuales es alentador.

Tabla 1: Tratamiento de agua residual y bio-remediación mediante MFCs.

| Tipo de compuesto a tratar | Tipo MFC | Materiales de electrodo | Porcentaje de reducción DQO (%) | | Referencias |
|---|-------------------------------|---|---------------------------------|-------------------------------------|---|
| Aguas residuales urbanas | Cámara doble | Electrodos de grafito | 70 | | (Zhang, Li, Liu, 2014) |
| Aguas residuales doméstica | Flujo ascendente en serpentín | Electrodo de aire y carbón | 79.7 | | (Koffi & Okabe, 2020) |
| Residuos de biodiesel | Cámara simple | Fieltro de grafito y tela de carbono | 70 | | (Kondaveeti <i>et al.</i> , 2019) |
| MFCs PARA LA ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS A PARTIR DE AGUA RESIDUAL | | | | | |
| Tipo de Compuesto a Tratar | Tipo MFC | Materiales de electrodo | Reducción de contaminante | Porcentaje de reducción (%) | Referencias |
| Cadmio | Cámara simple | Tela de carbono | Cd (II) | 90 | (Chellaiah, 2018) |
| Mercurio (II) | Cámara doble | Grafito | Hg (II) | 98 | (Kumar <i>et al.</i> , 2020) |
| Cromo (VI) | Cámara doble | Fieltro de carbono (ánodo) y tela de carbono (cátodo) | Cr (VI) | 100 | (Li <i>et al.</i> , 2018a) |
| Cobre (II) | Cámara doble | Placa de grafito (ánodo) y lámina de grafito (cátodo) | Cu (II) | 99.88 (anaerobio) y 99.95 (aerobio) | (Wang, Song, Yu, Cao, Fang, & Li, 2016) |

Debido a las ventajas y versatilidad que brindan las MFCs, en los últimos años se ha incrementado los estudios y publicaciones, no obstante, es importante recalcar la presencia de factores que pueden afectar el rendimiento (como se muestra en la figura 5b). La tecnología en mención intenta beneficiarse de procesos bio-electroquímicos de la materia orgánica y metabolismo de los microorganismos con el fin de emplear en subproductos que puedan ser aprovechables (Gajda, Greenman & Ieropoulos, 2018). Entre ellas están generar energía directa (bioelectricidad) y a su vez brindar un tratamiento al recurso hídrico. Sin embargo, investigaciones realizadas en laboratorio han dado aplicaciones, además de las mencionadas, para biodetección y producción de hidrógeno (figura 5a).

Es importante recalcar en la biodetección que se puede interrelacionar el tratamiento con un biosensor para Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) debido a la relación lineal entre en rendimiento coulombico y la fuerza de las aguas residuales, presentando incluso ventajas (costo y tiempo de vida) sobre biosensores tradicionales. De igual manera, la producción de hidrógeno al adaptar una MFCs de doble cámara a una celda de electrólisis microbiana (Kumar, Singh & Zularisam, 2017).

En la tabla 2, se reporta microorganismos y fuente de inóculo, sustrato y los diversos materiales utilizados para la fabricación y adecuación de electrodos en las MFCs, que permiten la generación de bioelectricidad en base a estudios realizados con dicho fin.

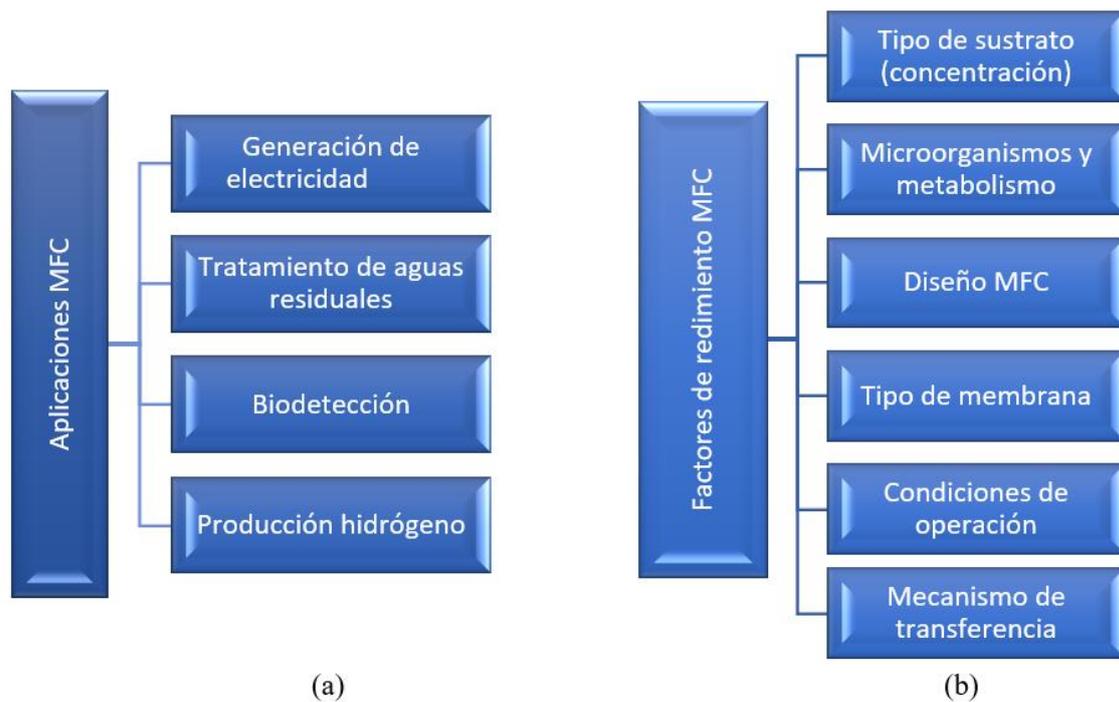


Figura 5: Aplicaciones (a) y factores de rendimiento en las MFCs (b). Adaptado de Kumar *et al.*, 2017

Tabla 2: rendimiento de pilas de combustible microbiano en la generación de bioelectricidad

| Microorganismo o fuente de inóculo | Sustrato | Materiales de electrodo | Densidad de corriente (mW·m ⁻²) | Referencias |
|------------------------------------|-------------------------|---|---|---------------------------------------|
| Escherichia coli | Glucosa | Grafeno y carbon | 434 | (Kumar <i>et al.</i> , 2014) |
| Shewanella putrefaciens | Lactosa | Grafeno y níquel | 3903 | (Qiao, Wu, Ma, He, & Li, 2014) |
| Shewanella oneidensis | Lactosa | Carbón y Grafeno | 162 | (Zhao, Gai, Song, Zhang, & Zhu, 2015) |
| Rhodopseudomonas palustris | Agua residual doméstica | Papel carbón (ánodo) y tela de carbono (cátodo) | 2720 | (Pirbadian <i>et al.</i> , 2014) |
| Cyanobacteria | Agua residual | Fieltro de grafito (ánodo) y tela de carbono (cátodo) | 114 | (Kracke, Vassilev & Krömer, 2015) |
| Lodo digestor anaeróbico | Glucosa | Grafeno | 85.4 | (Wu <i>et al.</i> , 2015) |
| Lodo activado | Acetato-sodio | Carbon | 20.1 | (Li <i>et al.</i> , 2014) |
| Aguas residuales primarias | Ácido acético | Cepillo fibra de grafito (ánodo) y tela de carbono (cátodo) | 835 | (Baranitharan <i>et al.</i> , 2015) |
| Aguas residuales | Acetato-sodio | Carbono | 939 | (Liu <i>et al.</i> , 2014) |

4. Discusión

Los combustibles fósiles son una fuente de energía contaminante y dañina con el medio ambiente, por lo cual es necesario optar por alternativas amigables, destacándose MFCs que resulta un método novedoso y rentable en la conversión de materia orgánica en electricidad por medio del metabolismo de microorganismos. Entre las diversas aplicaciones que se han establecido para MFCs, se han brindado porcentajes alentadores para ampliar la cantidad de estudios y desarrollar factores adecuados para mejorar los resultados obtenidos. En general, poseen un elevado costo y baja producción de energía considerados como los principales inconvenientes; sin embargo, se

implementó un sistema de flujo ascendente en serpentín, la cual además de presentar un mejor porcentaje de reducción en DQO (tabla1) se muestra un periodo de operación de seis meses con agua residual real como sustrato. Por otro lado, es importante recalcar la reducción de metales pesados en agua residual especialmente en Cromo (VI), Cobre (II) y Hg (II) los cuales han dado buen resultado en su remoción, aunque en este último no existe una elevada cantidad de estudios recientes como en los anteriores.

A pesar de las ventajas que una MFCs presenta la densidad de potencia menor a una pila de combustible convencionales, no obstante, al utilizar la combinación de grafeno y níquel en la nanoestructura del ánodo ha permitido el crecimiento de las bacterias en los poros del electrodo, logrando de esa forma alcanzar una superioridad con respecto a los demás mencionados en la tabla 2.

Conclusiones

Las MFCs es una tecnología ecológica que se encuentra en auge durante los últimos años debido principalmente a las ventajas que presenta en la generación de electricidad y tratamiento de aguas residuales de manera alternativa. A pesar de los beneficios aún se requieren mejoras para alcanzar una estabilidad integral en el sistema, reducción de costos, especialmente en la selección de microorganismos y materiales para la construcción de electrodos, factores indispensables para alcanzar un nivel macro y una futura comercialización; especialmente en lugares donde no se tenga acceso a fuentes de energía. Por lo cual, básicamente se deberían realizar una extensa investigación sobre organismos y electrodos a utilizarse, ya que reducirían la complejidad de alcanzar una mayor salida de corriente. Por otro lado, proporcionaría una solución factible relacionado al costo que representa, de esta forma siendo una prometedora alternativa a futuro.

Contribuciones de los autores

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://casrai.org/credit/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

| | Sánchez, M. | Fernández, L. | Espinoza-Montero, P. |
|--------------------------------|-------------|---------------|----------------------|
| Conceptualización | | | |
| Análisis formal | | | |
| Investigación | | | |
| Metodología | | | |
| Redacción - revisión y edición | | | |

Conflicto de Interés

Los autores deben declarar que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna en la presente investigación.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y CEDIA (Corporación Ecuatoriana para el Desarrollo de la Investigación y la Academia) por su soporte técnico y por el apoyo financiero.

Referencias

- Adelaja, O., Keshavarz, T., & Kyazze, G. (2015). The effect of salinity, redox mediators and temperature on anaerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons in microbial fuel cells. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.08.066>
- Al Lawati, M. J., Jafary, T., Baawain, M. S., & Al-Mamun, A. (2019). A mini review on biofouling on air cathode of single chamber microbial fuel cell; prevention and mitigation strategies. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 22, 101370. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101370>
- Allami, S., Hasan, B., Redah, M., Hamody, H., & Abd Ali, Z. D. (2018). Using low cost membrane in dual-chamber microbial fuel cells (MFCs) for petroleum refinery wastewater treatment. In *Journal of Physics: Conference Series 1032*, 012061. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1032/1/012061>
- Ancona, V., Caracciolo, A. B., Borello, D., Ferrara, V., Grenni, P., & Pietrelli, A. (2020). Microbial fuel cell: an energy harvesting technique for environmental remediation. *International Journal of Environmental Impacts*, 3(2), 168-179. <https://doi.org/10.2495/EI-V3-N2-168-179>
- Ardakani, M. N., & Gholikandi, G. B. (2020). Microbial fuel cells (MFCs) in integration with anaerobic treatment processes (AnTPs) and membrane bioreactors (MBRs) for simultaneous efficient wastewater/sludge treatment and energy recovery-A state-of-the-art review. *Biomass and Bioenergy*, 141, 105726. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105726>
- Baranitharan, E., Khan, M. R., Yousuf, A., Teo, W. F. A., Tan, G. Y. A., & Cheng, C. K. (2015). Enhanced power generation using controlled inoculum from palm oil mill effluent fed microbial fuel cell. *Fuel*, 143, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.030>
- Bazdar, E., Roshandel, R., Yaghmaei, S., & Mardanpour, M. M. (2018). The effect of different light intensities and light/dark regimes on the performance of photosynthetic microalgae microbial fuel cell. *Bioresour. Technol.*, 261, 350-360. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.026>
- Chellaiah, E.R. (2018). Cadmium (heavy metals) bioremediation by *Pseudomonas aeruginosa*: A minireview. *Applied Water Science*, 8. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0796-5>.
- Choi, J., & Ahn, Y. (2013). Continuous electricity generation in stacked air cathode microbial fuel cell treating domestic wastewater. *Journal of Environmental Management*, 130, 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.065>
- Choi, J., & Ahn, Y. (2015). Enhanced bioelectricity harvesting in microbial fuel cells treating food waste leachate produced from biohydrogen fermentation. *Bioresour. Technol.*, 183, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.109>
- Choi, T. H., Won, Y. B., Lee, J. W., Shin, D. W., Lee, Y. M., Kim, M., & Park, H. B. (2012). Electrochemical performance of microbial fuel cells based on disulfonated poly(arylene ether

- sulfone) membranes. *Journal of Power Sources*, 220, 269-279. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.109>
- Comeau, Y. Metabolismo Microbiano. En C. M. López, G. Buitrón, H. García, & F. J. Cervantes (EDs.), *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño* (pp. 9-24) IWA publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780409146> (pp.9-24)
- Dannys, E., Green, T., Wettlaufer, A., Madhurnathakam, C. M. R., & Elkamel, A. (2016). Wastewater treatment with microbial fuel cells: a design and feasibility study for scale-up in microbreweries. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 6(1), 1-6. <https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000267>
- Deval, A.S., Parikh, H.A., Kadier, A., Chandrasekhar, K., Bhagwat, A.M., & Dikshit, A.K., (2017). Sequential microbial activities mediated bioelectricity production from distillery wastewater using bio-electrochemical system with simultaneous waste remediation. *Int. J. Hydrogen Energy* 42 (2), 1130–1141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.114>.
- Flimban, S. G., Hassan, S. H., Rahman, M. M., & Oh, S. E. (2020). The effect of Nafion membrane fouling on the power generation of a microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(25), 13643-13651. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.097>
- Gajda, I., Greenman, J., & Ieropoulos, I. A. (2018). Recent advancements in real-world microbial fuel cell applications. *Current Opinion in Electrochemistry*, 11, 78-83. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2018.09.006>
- Ganiyu, S. O., Martínez-Huitle, C. A., & Rodrigo, M. A. (2020). Renewable energies driven electrochemical wastewater/soil decontamination technologies: A critical review of fundamental concepts and applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 270, 118857. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118857>
- Guo, Y., Wang, G., Zhang, H., Wen, H., & Li, W. (2020). Effects of biofilm transfer and electron mediators transfer on *Klebsiella quasipneumoniae* sp. 203 electricity generation performance in MFCs. *Biotechnology for Biofuels*, 13. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01800-1>
- Ishii, S. I., Suzuki, S., Norden-Krichmar, T. M., Wu, A., Yamanaka, Y., Nealson, K. H., & Bretschger, O. (2013). Identifying the microbial communities and operational conditions for optimized wastewater treatment in microbial fuel cells. *Water research*, 47(19), 7120-7130. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.048>
- Jatoi, A. S., Akhter, F., Mazari, S. A., Sabzoi, N., Aziz, S., Soomro, S. A., ... & Ahmed, S. (2021). Advanced microbial fuel cell for waste water treatment—A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 5005-5019. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11691-2>
- Jiang D, Curtis M, Troop E, Scheible, K., McGrath, J., Hu, B.,Li, B. (2011). A pilot-scale study on utilizing multi-anode/cathode microbial fuel cells (MAC MFCs) to enhance the power production in wastewater treatment. *International Journal of Hydrogen Energy*. 36. 876–884. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.074>
- Kalathil, S., Patil, S. A., & Pant, D. (2018). Microbial fuel cells: electrode materials. *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry*, 309-318. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.13459-6>
- Kaur, R., Marwaha, A., Chhabra, V. A., Kim, K. H., & Tripathi, S. K. (2020). Recent developments on functional nanomaterial-based electrodes for microbial fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109551>

- Kim, J. M., & Patel, R. (2020). Review on proton exchange membranes for microbial fuel cell application. *Membrane Journal*, 30(4), 213-227. https://doi.org/10.14579/MEMBRANE_JOURNAL.2020.30.4.213
- Kiran, R., & Patil, S. A. (2019). Microbial electroactive biofilms. . In N. Krishnaraj & R. k. Sani (Eds.), *Introduction to Biofilm Engineering* (pp. 159-186). <https://doi.org/10.1021/bk-2019-1323.ch008>
- Kitafa, B. A., & Al-saned, A. J. O. (2021). A Review on Microbial Fuel Cells. *Engineering and Technology Journal*, 39(1A), 1-8. <https://doi.org/10.30684/etj.v39i1A.1518>
- Kondaveeti, S., Kim, I. W., Otari, S., Patel, S. K., Pagolu, R., Losetty, V., ... & Lee, J. K. (2019). Co-generation of hydrogen and electricity from biodiesel process effluents. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(50), 27285-27296. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.258>
- Kracke, F., Vassilev, I., & Krömer, J. O., (2015). Microbial electron transport and energy conservation—the foundation for optimizing bioelectrochemical systems. *Frontiers in Microbiology*, 6, 575. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00575>
- Kumar, G. G., Hashmi, S., Karthikeyan, C., GhavamiNejad, A., Vatankhah-Varnoosfaderani, M., & Stadler, F. J. (2014). Graphene oxide/carbon nanotube composite hydrogels—versatile materials for microbial fuel cell applications. *Macromolecular Rapid Communications*, 35(21), 1861-1865. <https://doi.org/10.1002/marc.201400332>
- Kumar, R., Singh, L., & Zularisam, A. W. (2017). Microbial fuel cells: Types and applications. In L. Singh & V. Kalia (Eds.), *Waste Biomass Management—A Holistic Approach* (pp. 367-384). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49595-8_16
- Kumar, R., Yadav, S., & Patil, S. A. (2020). Bioanode-assisted removal of Hg²⁺ at the cathode of microbial fuel cells. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(4), 04020034. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000533](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000533)
- Lee, Y. Y., Kim, T. G., & Cho, K. S. (2015). Effects of proton exchange membrane on the performance and microbial community composition of air-cathode microbial fuel cells. *Journal of Biotechnology*, 211, 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.07.018>
- Li, B., Zhou, J., Zhou, X., Wang, X., Li, B., Santoro, C., ... & Schuler, A. J. (2014). Surface modification of microbial fuel cells anodes: Approaches to practical design. *Electrochimica Acta*, 134, 116-126. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.04.136>
- Li, M., Zhou, S., Xu, Y., Liu, Z., Ma, F., Zhi, L., & Zhou, X., (2018a). Simultaneous Cr(VI) reduction and bioelectricity generation in a dual chamber microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 334, 1621–1629. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.144>
- Li, X., Liu, G., Sun, S., Ma, F., Zhou, S., Lee, J. K., & Yao, H. (2018b). Power generation in dual chamber microbial fuel cells using dynamic membranes as separators. *Energy Conversion and Management*, 165, 488-494. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.074>
- Liu, J., Liu, J., He, W., Qu, Y., Ren, N., & Feng, Y. (2014). Enhanced electricity generation for microbial fuel cell by using electrochemical oxidation to modify carbon cloth anode. *Journal of Power Sources*, 265, 391-396. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.005>
- Liu, L., & Choi, S. (2017). Self-sustaining, solar-driven bioelectricity generation in micro-sized microbial fuel cell using co-culture of heterotrophic and photosynthetic bacteria. *Journal of Power Sources*, 348, 138-144. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.014>

- Logroño, W., Ramírez, G., Recalde, C., Echeverría, M., & Cunachi, A. (2015). Bioelectricity generation from vegetables and fruits wastes by using single chamber microbial fuel cells with high Andean soils. *Energy Procedia*, 75, 2009-2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.259>
- López, I. G. (2020). *Desarrollo sostenible*. Madrid, España: Editorial Elearning, SL.
- Maity, J. P., Hou, C. P., Majumder, D., Bundschuh, J, Kulp, T. R., Chen, C. Y., ... Chien-Cheng, C. (2014). The production of biofuel and bioelectricity associated with wastewater treatment by green algae. *Energy*, 78, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.023>
- Martinez, C. M., & Alvarez, L. H. (2018). Application of redox mediators in bioelectrochemical systems. *Biotechnology Advances*, 36(5), 1412-1423. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.05.005>
- Me, M. H., & Bakar, M. A. (2020). Tubular ceramic performance as separator for microbial fuel cell: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(42), 22340-22348. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.115>
- Mohan, S. V., Sravan, J. S., Butti, S. K., Krishna, K. V., Modestra, J. A., Velvizhi, G., ... & Pandey, A. (2019). Microbial electrochemical technology: emerging and sustainable platform. In S. Venkata Mohan, S. Varjani, & A. Pandey (Eds.) *Microbial Electrochemical Technology: Sustainable platform for Fuels, Chemicals and Remediation* (pp. 3-18). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00001-7>
- Munoz-Cupa, C., Hu, Y., Xu, C. C., & Bassi, A. (2021). An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production. *Science of the Total Environment*, 754, 142429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142429>
- Nitorisravut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.064>
- Obileke, K., Onyeaka, H., Meyer, E. L., & Nwokolo, N. (2021). Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 125, 107003. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>
- Koffi, N., J., & Okabe, S. (2020). Domestic wastewater treatment and energy harvesting by serpentine up-flow MFCs equipped with PVDF-based activated carbon air-cathodes and a low voltage booster. *Chemical Engineering Journal*, 380, 122443. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122443>
- Pirbadian, S., Barchinger, S. E., Leung, K. M., Byun, H. S., Jangir, Y., Bouhenni, ... Gorby, Y. A. (2014). *Shewanella oneidensis* MR-1 nanowires are outer membrane and periplasmic extensions of the extracellular electron transport components. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(35):12883–12888. <https://doi.org/10.1073/pnas.1410551111>
- Qiao, Y., Wu, X. S., Ma, C. X., He, H., & Li, C. M. (2014). A hierarchical porous graphene/nickel anode that simultaneously boosts the bio-and electro-catalysis for high-performance microbial fuel cells. *RSC Advances*, 4, 21788-21793. <https://doi.org/10.1039/C4RA03082F>
- Rahimnejad, M., Asghary, M., & Fallah, M. (2020). Microbial fuel cell (MFC): An innovative technology for wastewater treatment and power generation. In R. N. Bharaga & G. Saxena (Eds) *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety, Volume II: Biological Agents and Methods for Industrial Waste Management* (pp. 215-235). https://doi.org/10.1007/978-981-13-3426-9_9

- Repuello, B. C., Ticlausaca, A. A., & Román, F. T. (2020). Generating of electricity and municipal wastewater treatment using microbial fuel cells (MFC) in the city of Huancavelica. *South Sustainability*, 1(2), e018-e018. <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-018>
- Rosenbaum, M., He, Z., & Angenent, L. T. (2010). Light energy to bioelectricity: photosynthetic microbial fuel cells. *Current Opinion in Biotechnology*, 21(3), 259-264. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2010.03.010>.
- Seow, T. W., Lim, C. K., Nor, M. H. M., Mubarak, M. F. M., Lam, C. Y., Yahya, A., & Ibrahim, Z. (2016). Review on wastewater treatment technologies. *Int. J. Appl. Environ. Sci.*, 11(1), 111-126. Recuperado de http://www.ripublication.com/ijaes16/ijaesv11n1_08.pdf
- Sheikh, R., Karmaker, S., Solayman, M., & Mayna, J. (2018). Bioelectricity from anaerobic co-digestion of organic solid wastes and sewage sludge using microbial fuel cells (MFCs). *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 8(3), 95-106. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2018.83007>
- Sonawane, J. M., Ezugwu, C. I., & Ghosh, P. C. (2020). Microbial fuel cell-based biological oxygen demand sensors for monitoring wastewater: state-of-the-art and practical applications. *ACS Sensors*, 5(8), 2297-2316. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c01299>
- Sun, H., Zhang, Y., Wu, S., Dong, R., & Angelidaki, I. (2019). Innovative operation of microbial fuel cell-based biosensor for selective monitoring of acetate during anaerobic digestion. *Science of The Total Environment*, 655, 1439-1447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.336>
- Tamirat, A. G., Guan, X., Liu, J., Luo, J., & Xia, Y. (2020). Redox mediators as charge agents for changing electrochemical reactions. *Chemical Society Reviews*, (20), <https://doi.org/10.1039/D0CS00489H>
- Tharali, A. D., Sain, N., & Osborne, W. J. (2016). Microbial fuel cells in bioelectricity production. *Frontiers in Life Science*, 9(4), 252-266. <https://doi.org/10.1080/21553769.2016.1230787>.
- Wang, H., Song, H., Yu, R., Cao, X., Fang, Z., & Li, X. (2016). New process for copper migration by bioelectricity generation in soil microbial fuel cells. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 13147-13154. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6477-8>
- Wu, X. Y., Tong, F., Song, T. S., Gao, X. Y., Xie, J. J., Zhou, C. C., ... Wei, P. (2015). Effect of zeolite-coated anode on the performance of microbial fuel cells. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 90(1), 87-92. <https://doi.org/10.1002/jctb.4290>
- Yang, X., & Chen, S. (2021). Microorganisms in sediment microbial fuel cells: Ecological niche, microbial response, and environmental function. *Science of The Total Environment*, 756, 144145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144145>
- Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., & Rodríguez-Couto, S. (2020). Development and modification of materials to build cost-effective anodes for microbial fuel cells (MFCs): An overview. *Biochemical Engineering Journal*, 164, 07779. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107779>
- Zhang P, Li K, Liu X., (2014). Carnation-like MnO₂ modified activated carbon air cathode improve power generation in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 264, 248-253. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.098>
- Zhang, Y., Liu, L., Van der Bruggen, B., & Yang, F. (2017). Nanocarbon based composite electrodes and their application in microbial fuel cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(25), 12673-12698. <https://doi.org/10.1039/C7TA01511A>.

- Zhang, Y., Liu, M., Zhou, M., Yang, H., Liang, L., & Gu, T. (2019). Microbial fuel cell hybrid systems for wastewater treatment and bioenergy production: Synergistic effects, mechanisms and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.027>.
- Zhao, C. E., Gai, P., Song, R., Zhang, J., & Zhu, J. J. (2015). Graphene/Au composites as an anode modifier for improving electricity generation in *Shewanella*-inoculated microbial fuel cells. *Analytical Methods*, 7, 4640-4644. <https://doi.org/10.1039/C5AY00976F>